

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

## ЭНЦИКЛОПЕДИЯ



**МАШИНОСТРОЕНИЕ  
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ**

**MECHANICAL ENGINEERING  
Encyclopaedia**

Главный редактор академик РАН  
**К.В. Фролов**



# МАШИНОСТРОЕНИЕ

## ЭНЦИКЛОПЕДИЯ В Сорока томах

---

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**ФРОЛОВ К.В.**

**Председатель редакционного совета**

#### Члены совета:

Белянин П.Н. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Колесников К.С. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Адамов Е.О., Анфимов Н.А., Асташов В.К., Бессонов А.П., Васильев В.В., Воронин Г.П., Глебов И.А., Долбенко Е.Т., Жесткова И.Н., Кирпичников М.П., Клюев В.В., Ковалевский М.А., Коптев Ю.Н., Ксенович И.П., Мартынов И.А., Новожилов Г.В., Носов В.Б., Образцов И.Ф., Панин В.Е., Паничев Н.А., Патон Б.Е., Пашин В.М., Платонов В.Ф., Пугин Н.А., Свищев Г.П., Силаев И.С., Туполев А.А., Федосов Е.А., Фортвов В.Е., Черный Г.Г., Шемякин Е.И.

Раздел III  
ТЕХНОЛОГИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА МАШИН

---

Том III-3  
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Редактор-составитель академик Академии проблем качества РФ,  
д-р техн. наук, профессор **А.Г. Сулов**

Ответственный редактор чл.-кор. РАН  
**П.Н. Белянин**

Редакторы тома: **А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.Г. Сулов**  
(Технология механической обработки деталей машин); **А.Г. Григорьянц,**  
**Ю.Ф. Назаров, В.П. Смоленцев, А.Г. Сулов** (Методы обработки деталей  
машин); **В.С. Стародубов, А.Е. Стешков, А.А. Шатилов** (Средства  
технологического оснащения механической обработки деталей машин);  
**Б.М. Базров, А.Г. Схиртладзе** (Типизация технологических процессов  
и групповая обработка); **И.М. Султан-Заде, А.Н. Овсеев, А.Г. Сулов**  
(Технология производства типовых деталей машин)

УДК 621.01/03  
ББК 34.4  
М38

*Федеральная целевая программа книгоиздания России*

Авторы: А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров, Б.М. Базров, В.И. Аверченков, В.И. Андреев, А.Ю. Албагачиев, В.Н. Андронов, А.П. Бабичев, Ю.М. Барон, В.Ф. Безъязычный, А.Г. Бойцов, Ю.А. Боровой, Г.В. Боровский, О.Ю. Герций, А.О. Горленко, О.А. Горленко, В.А. Гречишников, А.Г. Григорьянц, В.И. Дрожжин, Д.Г. Евсеев, А.Ю. Звоницкий, Б.Н. Золотых, Е.И. Ивкин, В.Б. Ильицкий, В.П. Инютин, Л.П. Калафатова, Н.М. Капустин, Л.И. Карпов, В.С. Коваленко, А.А. Колобов, З.И. Кремень, А.М. Кузнецов, Ю.И. Кузнецов, С.И. Лашнев, Б.Н. Леонов, В.Г. Логашев, А.И. Марков, А.И. Маханько, Р.К. Мещеряков, М.В. Миллохин, О.Н. Миляев, С.П. Митрофанов, А.Н. Михайлов, Ю.И. Нестеров, А.Н. Овсеенко, В.А. Остафьев, Б.С. Падун, Д.Д. Паншев, В.В. Петросов, В.Н. Подураев, В.А. Полетаев, С.А. Попов, В.Х. Постаногов, А.Н. Прокофьев, А.С. Проников, В.Б. Протасьев, А.В. Пуш, П.Р. Родин, В.Ф. Романов, Н.М. Рыжов, Э.В. Рыжов, И.А. Сенчило, Л.К. Сизенов, С.С. Силин, В.М. Смелянский, В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, А.А. Соколов, В.А. Солодков, В.Л. Сосонкин, В.С. Стародубов, А.Е. Стешков, Н.М. Султан-Заде, А.Г. Схиртладзе, В.С. Сысоева, Н.В. Талантов, Н.Э. Тернюк, А.В. Тотай, А.А. Углов, Р.С. Фахуртдинов, О.Н. Федонин, В.П. Федоров, А.В. Хандожко, В.С. Харченко, Л.А. Хворостухин, Л.В. Худобин, А.А. Шатилов, К.З. Шепеляковский, И.Н. Шиганов, В.М. Ярославцев

Рецензенты: д-р техн. наук Ю.С. Степанов, д-р техн. наук А.С. Ямников

Рабочая группа Редакционного Совета:

К.С. Колесников, В.К. Асташов, П.Н. Белянин, В.В. Васильев, А.П. Бессонов, Н.Н. Боброва, Е.Т. Долбенко, И.Н. Жесткова, Г.В. Москвитин

Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: М38 Машиностроение.

Технология изготовления деталей машин Т. III-3 / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А.Г. Суслова. 2000. 840 с., ил.

Приведены основы технологии механической обработки деталей машин, технологическое обеспечение качества деталей, методология разработки технологических процессов. Даны методы обработки деталей: резанием, абразивный, электроэрозионный, электрохимический, лазерный и электронно-лучевой, ультразвуковой, комбинированные методы, методы упрочнения и др.

Описаны средства технологического оснащения механической обработки деталей: станки, приспособления, режущие и измерительные инструменты и другая оснастка.

Изложены основы типизации технологических процессов и групповой обработки, ГПС; технологии производства типовых деталей машин.

ББК 34.4

ISBN 5-217-01958-1 (Т. III-3)  
ISBN 5-217-01949-2

© Издательство "Машиностроение", 2000

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	ПРЕДИСЛОВИЕ .....	10		
РАЗДЕЛ	<b>1. ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	12	обеспечение шероховатости и волнистости поверхностей (Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов) .....	61
Глава	<b>1.1. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ</b> .....	12	1.2.8. Технологическое обеспечение физико-механических свойств поверхностных слоев (Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов) .....	75
	1.1.1. Производственный и технологический процессы (А.М. Дальский) .....	12	Список литературы .....	77
	1.1.2. Классификация технологических процессов обработки (А.М. Дальский) .....	17	Глава	
	1.1.3. Требования к технологичности при обработке (Р.К. Мецерьков) .....	20	<b>1.3. РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ</b> .....	78
	1.1.4. Припуски на обработку (Р.К. Мецерьков) .....	25	1.3.1. Методология разработки технологических процессов (Л.И. Карпов, М.В. Милухин) .....	78
	1.1.5. Базирование и базы при обработке (Р.К. Мецерьков) .....	29	1.3.2. Размерный анализ технологических процессов (О.А. Горленко) .....	92
	1.1.6. Техничко-экономическое обоснование эффективности обработки (А.А. Колобов) .....	34	1.3.3. Автоматизация проектирования технологических процессов (Н.М. Капустин) .....	96
	Список литературы .....	39	Список литературы .....	106
Глава	<b>1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	40	РАЗДЕЛ	
	1.2.1. Требования к качеству деталей машин (Л.И. Карпов) .....	40	Глава	
	1.2.2. Современные концепции системы качества на этапе изготовления продукции (Л.И. Карпов) ..	44	<b>2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	107
	1.2.3. Виды погрешностей при размерной обработке (Б.М. Базров) .....	45	Глава	
	1.2.4. Вероятностно-статистические методы исследования точности обработки (Л.К. Сизенов) .....	49	<b>2.1. ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ</b> .....	107
	1.2.5. Определение суммарной погрешности размерной обработки (Л.К. Сизенов) .....	53	2.1.1. Нормативы режимов резания. Оптимизация условий обработки (В.Ф. Безязычный) .....	107
	1.2.6. Пути повышения точности обработки (Б.М. Базров) .....	55	2.1.2. Резание чугунов и сталей (О.Н. Федонин) .....	119
	1.2.7. Технологическое		2.1.3. Резание коррозионно-стойких и жаропрочных труднообрабатываемых материалов (Б.Н. Леонов) .....	131
			2.1.4. Резание пластмасс (В.И. Дрожжин) .....	137
			2.1.5. Резание стекломатериалов (Л.П. Калафатова) .....	142
			2.1.6. Резание полимерных композиционных материалов (В.М. Ярославцев) .....	146
			2.1.7. Смазочно-охлаждающие технологические средства (Л.В. Худобин) .....	158
			Список литературы .....	163
			Глава	
			<b>2.2. ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА</b> .....	164

	2.2.1. Точение ( <i>В.А. Остафьев</i> ) .....	164			
	2.2.2. Фрезерование ( <i>Н.В. Талантов, В.А. Солодков</i> ) .....	169			
	2.2.3. Сверление ( <i>А.М. Кузнецов</i> ) .....	187			
	2.2.4. Протягивание ( <i>А.М. Кузнецов</i> ) .....	198			
	2.2.5. Обработка резьбовых и фасонных поверхностей ( <i>С.С. Силин</i> ) .....	210			
	2.2.6. Обработка зубьев зубчатых колес ( <i>Н.Э. Тернюк</i> ) .....	218			
	Список литературы .....	223			
<b>Глава</b>	<b>2.3. АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА</b> .....	224			
	2.3.1. Шлифование ( <i>Д.Г. Евсеев, С.А. Попов</i> ) ..	224			
	2.3.2. Суперфиниширование ( <i>З.И. Кремень</i> ) ..	239			
	2.3.3. Полирование и наноабразивная обработка ( <i>Ю.Ф. Назаров</i> ) .....	245			
	2.3.4. Доводка ( <i>Ю.И. Нестеров</i> ) .....	253			
	2.3.5. Струйная, экструзионная и турбоабразивная обработка ( <i>З.И. Кремень</i> ) ..	257			
	2.3.6. Виброабразивная обработка ( <i>З.И. Кремень</i> ) ..	262			
	Список литературы .....	264			
<b>Глава</b>	<b>2.4. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА</b> .....	265			
	2.4.1. Технологические схемы и режимы обработки ( <i>Б.Н. Золотых, В.П. Смоленцев</i> ) .....	265			
	2.4.2. Качество поверхности ( <i>В.П. Смоленцев</i> ) .....	270			
	2.4.3. Оборудование и инструмент ( <i>В.П. Смоленцев</i> ) ..	271			
	Список литературы .....	276			
<b>Глава</b>	<b>2.5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА</b> .....	276			
	2.5.1. Методы и технологические процессы электрохимической обработки ( <i>В.П. Смоленцев</i> ) .....	276			
	2.5.2. Параметры качества поверхности ( <i>В.П. Смоленцев</i> ) .....	285			
	2.5.3. Электрод-инструмент ( <i>В.П. Смоленцев</i> ) .....	288			
	2.5.4. Оборудование ( <i>Г.П. Смоленцев, В.Х. Поستانогов</i> ) .....	293			
	2.5.5. Утилизация шлама ( <i>В.Х. Поستانогов</i> ) .....	297			
	2.5.6. Участки и цеха электрохимической обработки ( <i>В.П. Смоленцев</i> ) .....	298			
	Список литературы .....	300			
<b>Глава</b>	<b>2.6. ЛАЗЕРНЫЕ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ</b> .....	300			
	2.6.1. Лазерная резка ( <i>А.Г. Григорьянц</i> ) .....	300			
	2.6.2. Лазерная перфорация отверстий ( <i>А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов</i> ) .....	303			
	2.6.3. Лазерное термораскальвание ( <i>А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов</i> ) .....	307			
	2.6.4. Лазерное скрайбирование и маркирование ( <i>А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов</i> ) .....	315			
	2.6.5. Лазерное технологическое оборудование для размерной обработки ( <i>А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов</i> ) .....	319			
	2.6.6. Электронно-лучевая обработка материалов ( <i>А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов</i> ) .....	324			
	Список литературы .....	327			
<b>Глава</b>	<b>2.7. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА</b> .....	327			
	2.7.1. Ультразвуковая размерная обработка деталей из твердых хрупких материалов ( <i>А.И. Марков</i> ) .....	328			
	2.7.2. Ультразвуковое алмазное сверление глубоких отверстий и алмазное фрезерование ( <i>А.И. Марков, Е.И. Ивкин</i> ) .....	336			
	2.7.3. Ультразвуковое снятие заусенцев ( <i>А.И. Марков</i> ) .....	340			
	2.7.4. Ультразвуковая интенсификация процессов механической и упрочняюще-чистой обработки ( <i>А.И. Марков</i> ) .....	342			
	Список литературы .....	344			
<b>Глава</b>	<b>2.8. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ</b> .....	345			
	2.8.1. Классификация комбинированных методов обработки ( <i>В.Н. Подураев</i> ) ..	345			
	2.8.2. Деформационно-режущая механическая обработка ( <i>В.Н. Подураев</i> ) ..	348			

	2.8.3. Комбинированное вибромеханическое резание ( <i>В.Н. Подураев</i> ) .....	350		2.10.2. Разработка новых прогрессивных технологией изготовления деталей ( <i>А.Г. Суслов, А.Н. Михайлов</i> ) .....	444	
	2.8.4. Механоэлектрические методы резания ( <i>В.Н. Подураев</i> ) .....	353		2.10.3. САПР новых технологий ( <i>В.И. Аверченко</i> ) .....	449	
	2.8.5. Электромеханические методы обработки ( <i>А.О. Горленко</i> ) .....	356		Список литературы .....	451	
	2.8.6. Магнитно-абразивная обработка ( <i>Ю.М. Барон</i> ) .....	361	<b>РАЗДЕЛ</b>	<b>3. СРЕДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	452	
	Список литературы .....	364		<b>Глава</b>	<b>3.1. МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ</b> .....	452
<b>Глава</b>	<b>2.9. УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	365		3.1.1. Типы и область применения станков ( <i>А.С. Проников, В.С. Стародубов</i> ) .....	452	
	2.9.1. Назначение и классификация методов упрочнения ( <i>В.М. Смелянский</i> ) .....	365		3.1.2. Показатели технического уровня и критерии работоспособности станка ( <i>А.С. Проников, В.С. Стародубов</i> ) .....	465	
	2.9.2. Упрочнение термической объемной обработкой ( <i>Р.С. Фахуртдинов</i> ) ...	367		3.1.3. Технические характеристики станков ( <i>А.С. Проников, В.С. Стародубов</i> ) .....	474	
	2.9.3. Упрочнение термической поверхностной обработкой ( <i>К.З. Шенеляковский</i> ) .....	372		3.1.4. Характеристика систем управления станками ( <i>А.С. Проников, В.С. Стародубов</i> ) .....	504	
	2.9.4. Упрочнение химико-термической обработкой ( <i>Н.М. Рыжов</i> ) .....	377		Список литературы .....	509	
	2.9.5. Упрочнение поверхностным пластическим деформированием ( <i>В.М. Смелянский, В.В. Петросов, А.П. Бабичев, Д.Д. Папшев</i> ) .....	385	<b>Глава</b>	<b>3.2. СТАНОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ</b> .....	510	
	2.9.6. Упрочнение деталей концентрированными потоками энергии и физическими полями ( <i>А.А. Углов, В.С. Коваленко, А.Г. Бойцов, В.С. Харченков, И.А. Сенчило, О.Ю. Герций, В.А. Полетаев</i> ) .....	408		3.2.1. Типы приспособлений и их основные элементы ( <i>А.А. Шатилов, А.И. Маханько</i> ) .....	510	
	2.9.7. Комбинированное упрочнение ( <i>В.С. Сысоева, Л.А. Хворостухин, В.С. Харченков</i> ) .....	430		3.2.2. Приводы приспособлений ( <i>Ю.И. Кузнецов</i> ) .....	515	
	Список литературы .....	438		3.2.3. Стандартизованные приспособления многократного применения ( <i>Ю.И. Кузнецов</i> ) .....	525	
<b>Глава</b>	<b>2.10. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ</b> .....	440		3.2.4. Приспособления станков с ЧПУ и ГПС ( <i>Ю.И. Кузнецов</i> ) .....	528	
	2.10.1. Совершенствование существующих методов обработки деталей машин ( <i>А.Г. Суслов, В.П. Инютин, А.Н. Михайлов</i> ) .....	440	<b>Глава</b>	3.2.5. Контрольно-измерительные инструменты ( <i>А.И. Маханько</i> ) .....	532	
				Список литературы .....	537	
				<b>3.3. МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ</b> .....	538	
				3.3.1. Лезвийный инструмент ( <i>В.Б. Протасьев, С.И. Лашнев</i> ) .....	538	

	3.3.2. Расчет и конструирование лезвийных инструментов (А.Е. Стецков) ..	549			
	3.3.3. Система автоматизированного проектирования лезвийного инструмента (САПР-И) (А.В. Хандожко)	555			
	3.3.4. Износ лезвийного инструмента (В.И. Андреев)	560			
	3.3.5. Затачивание лезвийного инструмента (П.Р. Родин) .....	566			
	3.3.6. Абразивный инструмент (Д.Г. Евсеев) .....	575			
	3.3.7. Инструменты из сверхтвердых материалов (В.Ф. Романов, А.В. Тотай, В.Н. Андронов, Г.В. Боровский) .....	587			
	3.3.8. Режущие и вспомогательные инструменты для автоматизированного производства (В.А. Гречишников, Ю.Л. Боровой) .....	595			
	Список литературы .....	610			
<b>РАЗДЕЛ</b>	<b>4. ТИПИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ГРУППОВАЯ ОБРАБОТКА</b> .....	611			
<b>Глава</b>	<b>4.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b> .....	611			
	4.1.1. Последовательность проектирования типовых и групповых технологических процессов (С.П. Митрофанов, В.Г. Логашев) ...	611			
	4.1.2. Разработка модульной технологии изготовления деталей (Б.М. Базров) .....	619			
	4.1.3. Классификация элементов деталей (Б.С. Падун) .....	625			
	4.1.4. Классификация элементов технологии (В.Г. Логашев) .....	628			
	4.1.5. Группирование объектов производства при проектировании типовых и групповых процессов (Б.С. Падун) .....	631			
	4.1.6. Автоматизированные системы классификации, группирования и проектирования технологических процессов (Б.С. Падун) ....	637			
	Список литературы .....	642			
	<b>Глава 4.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b> .....	643			
	4.2.1. Специализированная и универсально-наладочная оснастка для типовой и групповой технологий (В.Г. Логашев) .....	643			
	4.2.2. Групповая технологическая оснастка (В.Г. Логашев) .....	646			
	4.2.3. Вспомогательная переналаживаемая оснастка (О.Н. Миляев) .....	651			
	4.2.4. Автоматизированная система выбора, заимствования и унификации приспособлений для типовых и групповых процессов (В.Г. Логашев) .....	655			
	Список литературы .....	660			
<b>Глава</b>	<b>4.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b> .....	660			
	4.3.1. Модернизация универсального оборудования (О.Н. Миляев) .....	660			
	4.3.2. Оборудование с ЧПУ (О.Н. Миляев) .....	662			
	4.3.3. Агрегатированное и специализированное оборудование (О.Н. Миляев) ...	662			
	4.3.4. Вспомогательное и транспортно-накопительное оборудование для типовых и групповых процессов (О.Н. Миляев) .....	679			
	Список литературы .....	690			
<b>Глава</b>	<b>4.4. ОРГАНИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА</b> .....	690			
	4.4.1. Организация работ по наладке, переналадке и обслуживанию группового производства (С.П. Митрофанов, А.Ю. Звоницкий) .	690			
	4.4.2. Цехи и участки группового производства (О.Н. Миляев) .....	698			
	4.4.3. Оперативное планирование и управление (О.Н. Миляев) .....	699			
	4.4.4. Техничко-экономические показатели группового производства (О.Н. Миляев) .....	708			

<b>Глава</b>	<b>4.5. ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ</b> .....	709			Список литературы .....	792
	4.5.1. Принципы организации, классификация и структура ГПС ( <i>А.Г. Схиртладзе</i> ).....	709		<b>Глава</b>	<b>5.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ</b> .....	792
	4.5.2. Программное обеспечение ГПС ( <i>В.Л. Сосонкин</i> ) .....	729			5.3.1. Кинематические схемы изготовления сложных деталей, заготовки, инструмент, оборудование ( <i>В.П. Федоров</i> ) .....	792
	4.5.3. Автоматизированное проектирование технических и программных средств ГПС ( <i>А.В. Пуш</i> ) ....	738			5.3.2. Обработка на станках с ЧПУ ( <i>В.П. Федоров</i> ) .	796
	Список литературы .....	749			5.3.3. Обработка резьб, в том числе на крупногабаритных деталях ( <i>А.Н. Прокофьев</i> ) .....	799
<b>РАЗДЕЛ</b>	<b>5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	750			Список литературы .....	802
<b>Глава</b>	<b>5.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ</b> .....	750		<b>Глава</b>	<b>5.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС</b> .....	803
	5.1.1. Классификация валов и предъявляемые к ним требования ( <i>А.Г. Суслов</i> ) .....	750			5.4.1. Материалы и способы получения заготовок зубчатых колес ( <i>Н.Э. Тернюк</i> ) .....	804
	5.1.2. Выбор заготовок и технологических баз ( <i>В.Б. Ильицкий</i> ) .....	751			5.4.2. Влияние конструктивных факторов на технологию изготовления зубчатых колес ( <i>Н.Э. Тернюк</i> ) .....	806
	5.1.3. Методы обработки валов ( <i>А.Г. Суслов</i> ) .....	752			5.4.3. Технологические маршруты обработки зубчатых колес ( <i>Н.Э. Тернюк</i> ) .....	807
	5.1.4. Выбор оборудования и оснастки ( <i>В.Б. Ильицкий</i> ) .....	757			5.4.4. Контроль зубчатых колес ( <i>Н.Э. Тернюк</i> ) .....	814
	5.1.5. Изготовление типовых деталей (валы, шпиндели, ходовые винты) ( <i>А.Г. Суслов</i> ) .....	761			Список литературы .....	816
	Список литературы .....	769		<b>Глава</b>	<b>5.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ</b> .....	816
<b>Глава</b>	<b>5.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ</b> .....	769			5.5.1. Классификация деталей малой жесткости, доминирующие погрешности и принципы обработки ( <i>А.Н. Овсенко</i> ) .....	816
	5.2.1. Требования к типовым конструкциям корпусных деталей ( <i>И.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев</i> ) .....	769			5.2.2. Повышение точности обработки путем управления упругими деформациями ( <i>А.Н. Овсенко</i> ) .....	818
	5.2.2. Способы получения заготовок ( <i>И.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев</i> ) .....	773			5.5.3. Повышение точности обработки путем снижения технологических остаточных деформаций ( <i>А.Н. Овсенко</i> ) .....	823
	5.2.3. Обоснование выбора технологических баз ( <i>И.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев</i> ) .....	775			Список литературы .....	831
	5.2.4. Технология механической обработки корпусных деталей ( <i>И.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиев</i> ) .....	776			Предметный указатель .....	832

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Технический прогресс в машиностроении в большей степени зависит от конкурентоспособности выпускаемых машин. В то же время эта конкурентоспособность зависит от качества и себестоимости деталей, которые определяются технологией их изготовления, занимающей 30-70 % в общей трудоемкости производства машин.

Исследования перспектив развития технологии обработки деталей машин, проведенные в России, в развитых странах Западной Европы и в США, убедительно показали, что объемы механической обработки в машиностроении не будут снижаться. Это объясняется тем, что непрерывно повышаются требования к точности размеров и качеству поверхностного слоя деталей машин, обеспечить которые заготовительные процессы в ближайшие десятилетия не смогут. А так как затраты труда для повышения точности размеров на один квалитет и уменьшения высотных параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей в 2-3 раза увеличиваются на 20-30%, то в технологии изготовления деталей все больше и больше будут использоваться чистовые и отделочные операции. Все это убедительно говорит о необходимости обращать особое внимание на основы разработки технологических процессов и технологическое обеспечение качества деталей машин. Этим вопросам посвящен первый раздел данного тома.

Значительный вклад в решение этих вопросов за последние 50 лет после первого издания энциклопедии «Машиностроение» внесли отечественные ученые: Б.М. Базров, Б.С. Балакшин, В.Ф. Безъязычный, П.Н. Белянин, Б.В. Бойцов, О.А. Горленко, А.М. Дальский, Д.Г. Евсеев, М.А. Елизаветин, А.И. Исаев, К.С. Колев, В.В. Кован, И.А. Коганов, И.М. Колесов, В.С. Корсаков, С.И. Корчак, А.Г. Косилова, Л.В. Подзей, А.Д. Макаров, А.Н. Малов, Р.К. Мещеряков, В.Г. Митрофанов, А.В. Мухин, В.С. Мухин, А.А. Маталин, В.Н. Подураев, А.А. Рыжкин, Э.В. Рыжов, Э.А. Сател, С.С. Силин, А.П. Соколовский, Ю.М. Соломенцов, В.К. Старков, А.М. Сулима, И.Н. Султан-Заде, А.Г. Суслов, Л.В. Худобин, Д.В. Чарнко, М.А. Якобсон, А.С. Ямников, А.Б. Яхин.

К концу XX-го века разработано и реализовано в машиностроении много различных методов обработки деталей. В целом их можно разбить на несколько видов: механическая обработка (лезвийная, алмазно-абразивная, отделочно-упрочняющая обработка пластичным деформированием); электрофизическая обработка (электроэрозионная, электронно-лучевая, лазерная, ультразвуковая); электрохимическая и комбинированная обработка. Описанию различных технологических методов обработки деталей машин посвящен второй раздел данного тома.

Большой вклад в усовершенствование, разработку и исследование технологических методов обработки деталей машин внесли отечественные ученые: В.И. Аверченков, П.Г. Алексеев, Б.М. Аскинази, А.П. Бабичев, Ю.М. Барон, О.А. Горленко, А.Г. Григорьянц, В.И. Дрожжин, Д.Г. Евсеев, В.А. Исаченко, Л.И. Карпов, В.С. Коваленко, Е.Г. Коновалов, И.В. Кудрявцев, А.М. Кузнецов, А.Д. Макаров, А.И. Марков, Е.Н. Маслов, В.С. Мухин, Ю.Ф. Назаров, Ю.К. Новоселов, А.Н. Овсенко, П.М. Орлов, В.Л. Остафьев, Ю.В. Панфилов, Д.Д. Папшев, В.Н. Подураев, С.А. Попов, В.В. Петров, Ю.Г. Проскураков, А.Н. Резников, О.А. Розенберг, А.А. Рыжкин, Э.В. Рыжов, Н.Н. Рыкалин, М.Д. Семко, В.М. Смелянский, В.П. Смоленцев, А.А. Соколов, А.М. Сулима, А.Г. Суслов, Н.В. Талантов, А.В. Тотай, А.А. Углов, В.П. Федоров, В.С. Харченков, Л.А. Хворостухин, Л.В. Худобин, Ю.Г. Шнейдер, Д.Л. Юдин, А.С. Ямников, В.М. Ярославцев, П.И. Яшеричин.

Средствам технологического оснащения механической обработки деталей машин посвящен третий раздел. В нем приведены основные типы металлорежущих станков, их технические характеристики, станочные приспособления, металлорежущие и контрольно-измерительные инструменты. Описаны области их рационального применения. В решение этих вопросов значительный вклад внесли: Н.С. Ачеркан, В.В. Бушуев, В.М. Вальков, А.С. Верещака, В.Б. Ильицкий, В.А. Гречишников, В.В. Клюев, В.А. Кудинов, Ю.И. Кузнецов, С.И. Лашнев, А.И. Марков, В.В. Ми-

китянский, В.В. Протасьев, А.С. Проников, В.Р. Пуш, Д.Н. Решетов, П.Р. Родин, В.Ф. Романов, В.С. Стародубов, В.С. Хомяков, Б.И. Черпаков.

Четвертый раздел посвящен вопросам типизации технологических процессов, групповой и модульной технологии и гибким производственным системам механической обработки деталей машин. Основоположником создания типовых технологических процессов и групповой обработки деталей является российский ученый С.П. Митрофанов. Б.М. Базров разработал модульную технологию. Созданию гибких производственных систем для обработки деталей машин посвящены работы отечественных ученых: П.Н. Белянина, В.А. Исаченко, В.Г. Логашева, О.Н. Миллева, В.Г. Митрофанова, В.В. Пав-

лова, А.В. Пуша, В.А. Ратмирова, Г.И. Рапопорта, Ю.М. Соломенцева, В.Л. Сосонкина, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Черпакова, М.Г. Косова.

Технология производства типовых деталей машин изложена в пятом разделе. Классические технологии изготовления деталей машин формировались десятилетиями. Значительный вклад в это внесли: Б.С. Балакшин, Б.Л. Беспалов, А.М. Дальский, М.Е. Егоров, Н.М. Капустин, Н.В. Кибальченко, И.А. Коганов, И.М. Колесов, Л.И. Карпов, В.С. Корсаков, А.А. Маталин, А.И. Овсенко, В.В. Писаренко, А.П. Соколовский, А.И. Спришевский, Н.Э. Тернюк.

В дальнейшем научные разработки в области технологии машиностроения могут привести к изменению сформировавшихся классических технологий типовых деталей.

# РАЗДЕЛ 1

## ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Глава 1.1

#### ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

##### 1.1.1. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССЫ<sup>1</sup>

Объектами машиностроительного производства являются машины различного назначения. Технологический процесс изготовления машин предусматривает производство деталей, сборочных единиц (узлов) и изделий.

*Изделие* - продукт конечной стадии машиностроительного производства. Изделием может быть машина, сборочная единица или деталь в зависимости от того, какую продукцию выпускает завод (предприятие). Так, например, для одного из заводов изделием может быть металлорежущий станок, для другого - робот к нему, для третьего - обычный болт. Помимо изделий основного производства возможно получение на том же заводе изделий вспомогательного производства, которые используются для собственных нужд. Примером может служить крупный автомобильный завод, выпускающий металлорежущие станки специального назначения.

*Деталь* - первичный элемент изделия. Детали изготавливают из однородного по наименованию и марке материала. Отличительной особенностью детали является отсутствие в ней каких-либо соединений как разъемных, так и неразъемных. Покрытия различного вида не являются отдельными деталями. Различают детали с покрытиями и без покрытий. При сборке детали сопрягаются с другими деталями по поверхности, образуя соединения. Геометрические и физико-механические показатели поверхностей и поверхностных слоев являются важнейшими характеристиками качества деталей.

*Сборочная единица (узел)* - разъемное или неразъемное соединение частей изделия. С технологической точки зрения узел представляет собой обособленную часть изделия, которую можно собрать отдельно от других частей.

*узел* и пр. Узловая сборка деталей проводится на заводе основного производства либо на отдельных заводах, выпускающих такие узлы в качестве изделий, и способствует совершенствованию технологических процессов изготовления машин. С конструкторской точки зрения узел представляет собой часть машины в соответствии с функциональным назначением без учета особенностей сборки. Так, распределительный механизм машины, расположенный, например, наряду с другими механизмами в ее корпусной детали, является конструктивной сборочной единицей (узлом), но не является технологической сборочной единицей, так как не может быть собран обособленно. Наиболее совершенной является сборочная единица, которая одновременно отвечает условию ее функционального назначения в изделии и условию обособленной сборки.

В зависимости от положения сборочной единицы в изделии различают их порядок. Так, сборочные единицы, входящие в процессе сборки непосредственно в изделие, называют сборочными единицами первого порядка. Те сборочные единицы, которые входят в сборочные единицы первого порядка, называют сборочными единицами второго порядка и т.д. Такое представление о деталях и сборочных единицах существенно помогает описать в целом изделие и его элементы. Общая компоновка элементов изделия представлена

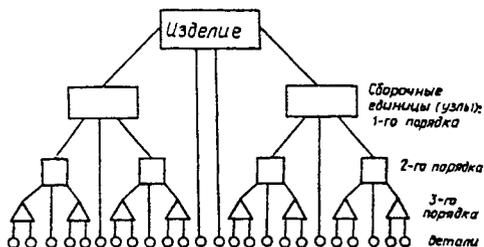


Рис. 1.1.1. Общая компоновка элементов изделия

<sup>1</sup>Многие термины и определения регламентируются Государственными стандартами, но периодически претерпевают изменения.

на рис. 1.1.1. Очевидно, что собственно детали могут входить как в сборочные единицы любого порядка, так и непосредственно в изделие вне сборочных единиц. Общая компоновка элементов изделия позволяет разработать *технологическую схему сборки* и увязать воедино процесс изготовления деталей, узловую сборку и сборку всего изделия. Целесообразность разработки схемы сборки определяется сложностью изделия.

Особую роль играют *базовые детали*. Они имеют базовые поверхности, с помощью которых другие детали и сборочные единицы ориентируются относительно друг друга. Сборка, как правило, начинается с базовых деталей. При сборке машины одна из сборочных единиц (узлов) может играть роль базовой сборочной единицы (базового узла). Чаще всего базовыми являются корпусные детали.

Условия производства могут требовать, чтобы на сборку изделия его элементы подавались группами. Каждая такая группа называется *сборочным комплектом*. Если эти элементы не вводят в состав машины на заводе-изготовителе, а они имеют вспомогательное назначение, то такая группа называется *комплектом* (например, комплекты запасных частей). Изделие предприятия-поставщика, используемое на заводе-изготовителе, называется *комплектующим изделием*. Сборочная единица, способная самостоятельно выполнять в изделии определенные функции, называется *агрегатом*.

Основное место в производстве машин отводится разработке технологических процессов. В свою очередь эти процессы являются составной частью производственных процессов (рис. 1.1.2).

*Производственный процесс* характеризуется совокупностью действий, в результате которых материалы и полуфабрикаты превращаются в готовые изделия в соответствии с их служебным назначением. Для функционирования производственного процесса необходимы соответствующие исходные данные. Так, директивное задание содержит необходимые указания о разрывании производства машин определенного назначения или серии машин с указанием объема годового выпуска. Прорабатываются вопросы обеспечения данного производства материалами, полуфабрикатами, оценивается возможная система управления производством. В качестве исходных рассматривают также социально-экономические факторы, возможную экологическую обстановку в регионе размещения данного предприятия. Создание производственного процесса является задачей высшего порядка сложности и рассматривается на государственном уровне. Так, в понятие

”производственный процесс” будет входить все, что связано, например, с созданием автомобильного завода.

Каждый элемент производственного процесса может представляться соответствующим производственным подразделением, функции которого определяются предельно четко. Одно из подразделений берет на себя функции снабжения материалами, комплектующими изделиями и т.д., а также функции хранения готовой продукции (хотя хранение может быть организовано и в другом подразделении). Вопросы обслуживания различного рода поручаются второму подразделению, а в третьем - разрабатывается структура управления производственным процессом, формируются органы управления и т.д.

Полезно выделять вспомогательный производственный процесс (см. рис. 1.1.2). Он может предусматривать обеспечение производства технологической оснасткой, различными инструментами, включать систему транспортирования объектов труда, обеспечивать уход за оборудованием и его наладку. Каждый из элементов вспомогательного производственного процесса в зависимости от масштаба производства может представляться участком, цехом или отдельным заводом.

*Технологический процесс* - часть производственного процесса, включающая в себя последовательное изменение размеров, форм и других свойств предмета производства. Это понятие имеет весьма широкие границы и в различные периоды времени уточняется соответствующими стандартами, однако главным остается понятие о непосредственном изменении состояния объекта труда. Технологический процесс представляется чаще всего совокупностью процессов, основанных на применении различных методов их выполнения (см. рис. 1.1.2). Так, важной составной частью технологического процесса может быть процесс изготовления заготовок (литье, обработка давлением, сварка и др.), процесс изготовления деталей, т.е. превращение заготовок в составные элементы машины, процесс сборки и другие. Прогрессивным оказывается такой технологический процесс, когда уже на стадии изготовления заготовок сразу выдается готовая деталь.

*Технологическая операция* - это часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте, над одним или несколькими одновременно обрабатываемыми предметами, одним или несколькими рабочими. Аналогичные понятия рассматриваются для процесса изготовления заготовок, сборки и др. Наличие рабочего места является неизменным условием проведения операции. *Рабочее место* представляет собой часть про-

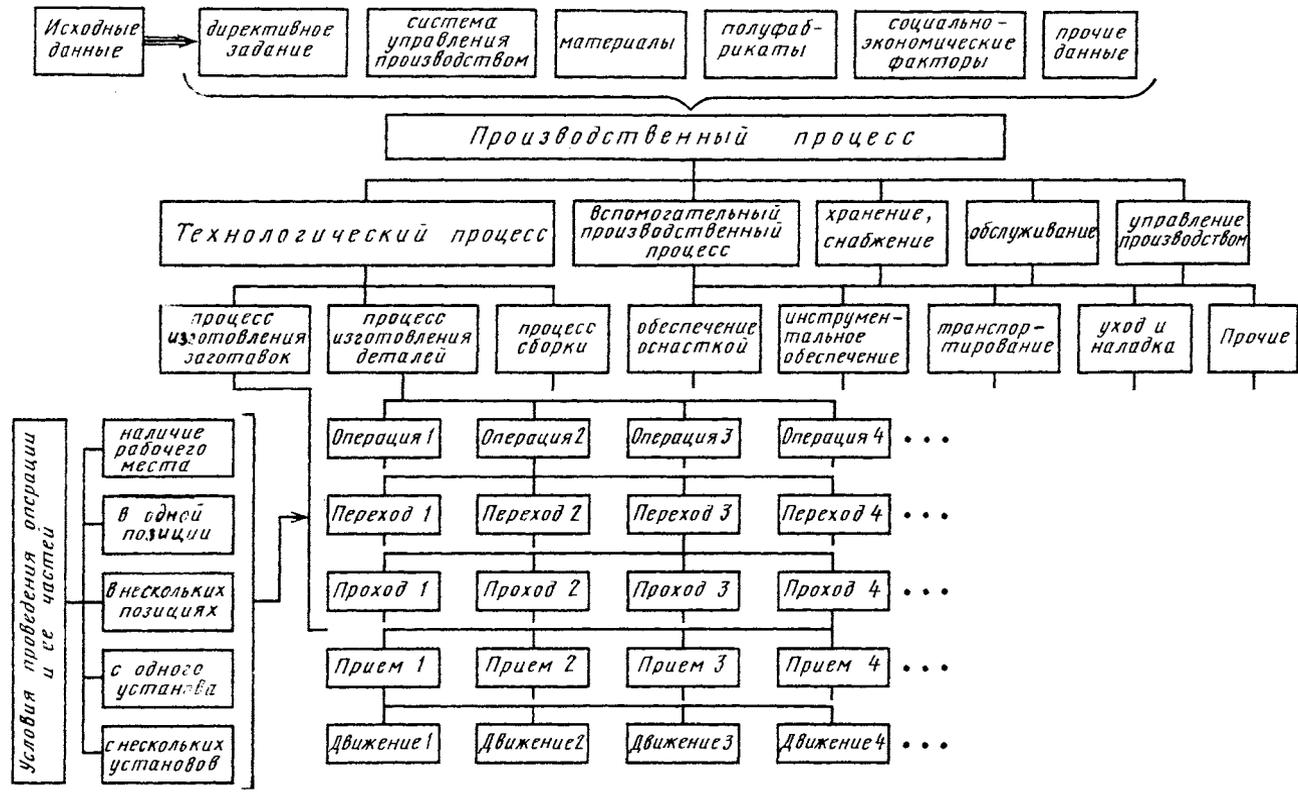


Рис. 1.1.2. Структура производственного и технологического процессов

изводственной площади, оборудованной в соответствии с выполняемой работой. Работа в рамках одной операции предусматривает условие непрерывности в том смысле, что исключается переход к выполнению другой работы. В автоматизированном и гибком автоматизированном производствах понятие технологической операции несколько изменяется. Технологический процесс предусматривает также наличие *вспомогательных операций*, связанных с транспортированием, контролем и другими действиями, не изменяющими свойств объектов труда.

Составными частями операции являются технологические переходы, характеризующиеся постоянством применения инструмента и обрабатываемых поверхностей. *Технологический переход* - законченная часть технологической операции, выполняемая над одной или несколькими поверхностями заготовки, одним или несколькими одновременно работающими инструментами при неизменных режимах обработки. Обработка следующей поверхности заготовки или изменение режимов обработки означают наличие нового перехода. *Вспомогательный переход* не изменяет состояние объекта труда, но сопровождает выполнение технологического перехода. Затраты времени на вспомогательные операции и переходы следует неизменно сокращать.

*Проход* (рабочий ход) - часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки и связанная с изменением состояния этой заготовки. В свою очередь частью прохода является *прием* - законченная совокупность действий человека, применяемых при выполнении перехода или его части и объединенных одним целевым назначением. Приемы состоят из отдельных движений.

Операции, переходы и проходы всегда выполняются на рабочих местах в одной или нескольких позициях, а также с одного или нескольких установов. *Позиция* - фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой совместно с оснасткой относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения операции или ее части. *Установ* - часть операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок.

Аналогичная структура может быть представлена для технологического процесса сборки, окраски и др. Технологическая операция является основной единицей производственного планирования и учета.

Каждый технологический процесс разрабатывают применительно к определенному типу производства, который представляет

собой классификационную категорию производства, выделяемую по принципу объема годового выпуска продукции и широте номенклатуры производства изделий. Технологический процесс, прогрессивный для одного типа производства, может быть совершенно неприемлемым для другого типа производства. Современное производство подразделяется на массовое, серийное и единичное.

*Массовое производство* характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, изготавливаемых непрерывно в течение большого отрезка времени. Это означает, что на каждом рабочем месте постоянно выполняется одна и та же работа, т.е. технологические операции постоянно повторяются (например, сверление отверстий в поршнях автомобиля данной модели). Поэтому используют специальное оборудование, которое расставляют в цехах в полном соответствии с выполнением операций технологического процесса; ему подчиняют работу транспортирующих устройств, контроль, работу складов заготовок и др. Современное массовое производство использует роботы, автоматические линии и целые производственные системы, управляемые ЭВМ. Применяемые заготовки характеризуется высокой точностью.

*Серийное производство* характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями, сравнительно большим объемом выпуска. Такой тип производства является основным и на его предприятиях выпускается 75-80 % всей продукции машиностроения. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство.

Типаж оборудования для серийного производства оказывается весьма широким. Используют универсальные, специализированные и специальные станки, автоматические линии. Большое распространение получают станки с ЧПУ. Расстановка станков чаще всего проводится по технологическим группам, хотя встречаются и другие виды компоновки станков. Заготовками являются горячий и холодный прокат, поковки, точные штампованные заготовки и отливки.

*Единичное производство* характеризуется широкой номенклатурой выпускаемых изделий и малым объемом их выпуска. Такой объем, как правило, исчисляется штуками или десятками штук. Технологические операции, выполняемые в производстве этого типа, повторяются нерегулярно или не повторяются совсем. Используют универсальное оборудование, которое расставляется по технологическим группам. Заготовки имеют простейшую форму.

### 1.1.1. Количество изделий одного наименования и типоразмера, изготавливаемых за год

Производство	Крупные изделия (тяжелые машины)	Изделия средних размеров	Мелкие изделия (легкие машины)
Единичное	До 5	До 10	До 100
Мелкосерийное	5-100	10-200	100-500
Среднесерийное	100-300	200-500	500-5000
Крупносерийное	300-1000	500-5000	5000-50000
Массовое	Св. 1000	Св. 5000	Св. 50000

Установить четкие границы между типами производства не представляется возможным. Так, крупносерийное производство приближается к массовому, а мелкосерийное - к единичному. Однако установление типа производства при разработке технологических процессов является крайне необходимым, поскольку в каждом типе производства для изготовления деталей одного и того же наименования используют совершенно различные технологические процессы. Решение такой задачи оказывается весьма сложным и, как правило, связано с выполнением ряда этапов. Для очень грубых прикидок пользуются данными, приведенными в табл. 1.1.1.

Очевидно, что отнесение изделий по их габаритам в ту или иную группу без учета других особенностей этих изделий, является в значительной степени произвольным. Тем не менее, представляется возможным в самом первом приближении наметить тип производства. Эта работа требует дальнейших уточнений на основе использования *коэффициентов закрепления операций*, т.е. отношения числа всех различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест. Принимают следующие значения *коэффициентов закрепления операций*: для мелкосерийного производства св. 20 до 40 вкл.; для среднесерийного производства св. 10 до 20 вкл.; для крупносерийного производства св. 1 до 10 вкл. Для массового производства коэффициент закрепления операций равен 1.

Определение коэффициентов закрепления операций требует в свою очередь прикидочных расчетов и определения числа операций и рабочих мест исходя из заданного объема месячного выпуска изделий. Следовательно, такие расчеты уже делаются с ориентацией на определенный тип производства и в дальнейшем требуют ряда последовательных уточнений. Выполняя эту работу, технологи опираются на опыт изготовления аналогичных изделий в конкретных производственных

условиях.

Вид оборудования, применяемого в различных типах производства, определяется технологическим процессом. Однако в мировой практике уже сложилось представление о необходимости использования оборудования с учетом гибкости в зависимости от номенклатуры изготавливаемых деталей и объема годового выпуска продукции (рис. 1.1.3).

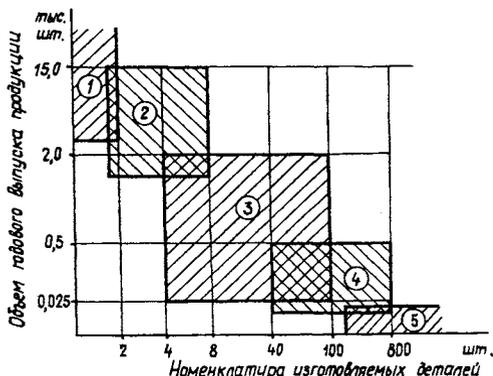


Рис. 1.1.3. Области рационального использования оборудования

Область 1 предусматривает использование автоматических линий с жесткими связями. В этом случае обеспечивается самая низкая себестоимость продукции. Автоматические линии имеют специальное оборудование, широко используются совмещение рабочих и вспомогательных движений при многопозиционной обработке. Область 2 характеризуется использованием специальных линий, на которых обрабатывают однотипные заготовки, но различных размеров. В области 3 используют гибкие производственные комплексы, а в области 4 - гибкие модули. Те и другие обладают достаточно высокой гибкостью, т.е. сравнительно быстро могут быть переналажены для обработки новой заготовки. Гибкий модуль представляет собой переналаживаемую

производственную ячейку. Для оборудования областей 3 и 4 характерна очень высокая стоимость. Область 5 представляется станками с ЧПУ, обладающими еще большей гибкостью. При последовательном переходе от области 1 к области 5 гибкость оборудования увеличивается, а производительность - уменьшается.

### 1.1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ

В зависимости от количества изделий и условий их изготовления различают три вида технологических процессов: единичный, типовой и групповой.

*Единичный технологический процесс* - это процесс изготовления изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства. Такой процесс разрабатывают, как правило, для оригинальных деталей или сборочных единиц, которые по своим формам, свойствам поверхностных слоев, материалу и другим показателям не имеют общих конструктивных и технологических признаков с изделиями, изготавливаемыми ранее на данном предприятии. Единичный технологический процесс создают на основе общих закономерностей (правил) разработки процессов изготовления деталей, однако при этом требуется учет специфики и требований, предъявляемых к точности размера, форм, взаимному расположению поверхностей, а также к поверхностным слоям. Так, например, для корпусной детали, которая по своим параметрам принципиально отличается от обрабатываемых ранее, требуется растачивание главных отверстий высокой степени точности с соблюдением жестких допусков по отклонению от соосности, а сама корпусная деталь изготавливается из коррозионно-стойкого материала. В этом случае необходима разработка единичного технологического процесса. Такие процессы должны создаваться каждый раз для массового, серийного или единичного производства. Учет современных достижений науки и техники, которые следует использовать на данном предприятии при подготовке и изготовлению изделий, требует применения нового перспективного оборудования, инструментов и условий реализации единичного технологического процесса.

*Типовой технологический процесс* - это технологический процесс изготовления группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками. Такая общность позволяет в свою очередь разработать общность содержания и последовательности выполнения большинства технологических операций и переходов для всей группы изде-

лий, что имеет неоспоримые преимущества технического и экономического характера. Типизация технологических процессов в машиностроении является безусловно прогрессивным явлением, так как позволяет при всем многообразии деталей машиностроительного производства обеспечить устранение многообразия технологических процессов обоснованным сведением их к ограниченному числу. Каждый типовой технологический процесс основывается при этом на применении наиболее совершенных способов обработки, которые обеспечивают достижение наивысшей производительности при наименьших затратах труда.

Типовой технологический процесс предусматривает выделение в группе однотипных изделий, изготавливаемых в конкретных производственных условиях, типового представителя группы. В качестве представителя выбирают изделие, для изготовления которого требуется наибольшее количество основных и вспомогательных операций, характерных для изделий, входящих в эту группу. Процесс, разработанный для типового представителя, может быть положен в основу процесса для любого другого изделия, входящего в группу.

В ходе указанной работы предусматривают типизацию технологических процессов по трем направлениям. Первое - связано с типизацией обработки отдельных поверхностей, второе - с обработкой типовых сочетаний поверхностей, третье - с обработкой заготовок. Эти направления, реализуемые на уровне классификации, направлены на представление всего многообразия заготовок, поверхностей и их сочетаний к минимальному количеству типов, для которых следует разрабатывать типовые технологические процессы. Каждый из таких процессов может быть в свою очередь разработан в нескольких вариантах применительно к конкретным производственным условиям для выбора оптимального варианта.

Классификация элементарных поверхностей основывается на описании формы изделия (детали), точности (по основным показателям), размеров поверхностей и материала изделия. Практика технологии машиностроения уже располагает богатым опытом построения технологических процессов обработки элементарных поверхностей, что нашло отражение в многочисленной справочной литературе с учетом экономических показателей. Вместе с тем работа по типизации элементарных поверхностей, важная сама по себе, не дает оснований для решения вопросов о типизации заготовки, оборудования и технологических операций.

Классификация сочетания поверхностей основывается на выделении таких комбина-

ций поверхностей, которые могут быть обработаны при использовании неизменной технологической базы на одном и том же оборудовании, одинаковыми режущими инструментами, с одним и тем же содержанием технологических операций. Такие комбинации встречаются у самых различных заготовок. Признаками классификации сочетания поверхностей являются точностные параметры, описание связей взаимного расположения поверхностей, размеры поверхностей, материал обрабатываемой заготовки.

Наибольшее значение для типизации технологических процессов имеет классификация заготовок. Различают следующие основные признаки их классификации: конфигурацию заготовок, их размеры, точность обработки и качество поверхностных слоев, материал заготовок. Кроме того, необходим учет и дополнительных признаков, к которым относят объем выпуска продукции и конкретную производственную обстановку (наличие оборудования и инструментов, систему организации производства и др.). В основе построения технологической классификации лежат классы заготовок. *Класс* представляет собой совокупность заготовок, характеризующих общностью технологических задач, объединяемых признаками классификации. Наибольшее распространение получила классификация, предусматривающая 14 классов - валы, втулки, диски, рычаги, плиты, зубчатые колеса и другие заготовки, имеющие общий машиностроительный характер. Допускается создание дополнительных классов, характерных для отдельных отраслей промышленности (например, турбинные лопатки). В свою очередь классы разделяются на *подклассы*, *группы* и *подгруппы*, что позволяет в итоге создать тип заготовок. К одному типу относятся заготовки, для которых можно составить общую карту типового процесса.

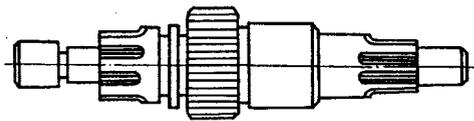


Рис. 1.1.4. Ступенчатый вал со шлицами без центрального отверстия

Деталь, представленная на рис. 1.1.4, относится к классу валов, подклассу ступенчатых валов без центрального отверстия (вид), соответствующего диапазона диаметров и длин, с точностью, например, 6-8-го качества. Тип вала представляется эскизом и имеет обозначение в виде трехзначной цифры, в которой первая обозначает вид, вторая -

размерную группу, третья - порядковый номер типа в данном виде. Типовые технологические процессы представляются специальной документацией, которая включает в себя классификатор заготовок и собственно типовой процесс. Использование такой документации существенно упрощает разработку технологических процессов.

Размерные группы деталей связаны с размерными рядами станков, на которых эти детали могут быть обработаны. Так для изготовления валов приняты токарные, шлицефрезерные и шлифовальные станки. В зависимости от расстояния между центрами этих станков валы по длине разбиты на две группы: 150-500 мм и 500-1000 мм. Аналогично этому определяют размерные группы других заготовок.

*Групповой технологический процесс* - это процесс изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками. Такой процесс создается с использованием определенных классификационных признаков. Таковыми являются технологические признаки, которые позволяют создать для группы заготовок общую наладку оборудования и использовать общую технологическую оснастку. Работа по созданию групповых технологических процессов проводится только для отдельных предприятий вне зависимости от типа производства.

Групповые технологические процессы появились как развитие типовых процессов, но в первых технологическая классификация заготовок связывается с видами обработки на станках определенных групп - токарных, револьверных, сверлильных, фрезерных и пр. В группе объединяются заготовки, у которых имеется общность обрабатываемых поверхностей или их сочетаний. При этом (в отличие от типовых процессов) в одну группу могут попасть заготовки различных конфигураций и разного служебного назначения.

Формирование группы заготовок проводится на основе учета ряда признаков. Важнейшим является общность геометрических элементов, составляющих конфигурацию заготовки (цилиндрические, конические поверхности, канавки, фаски, резьбы, торцовые поверхности). Геометрическая точность и шероховатость, общая для заготовок, является вторым признаком для формирования их в группу. Кроме того, группа создается из заготовок однородного материала и близких по своим размерам. Соблюдение этих признаков позволяет применять для всей группы одинаковые способы обработки (например, обтачи-

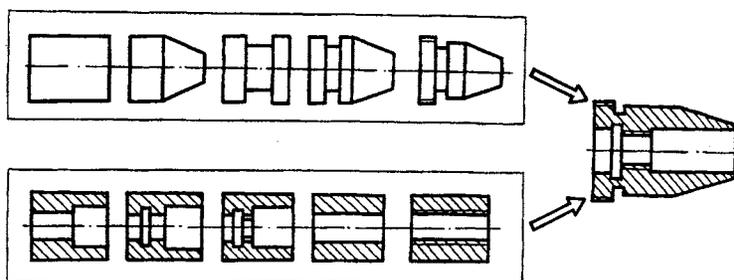


Рис. 1.1.5. Схема формирования комплексной заготовки

вание, растачивание, нарезание резьбы и др.) на одних и тех же станках, одинаковые режущие инструменты и технологическую оснастку. Формирование групп проводится также с учетом серийности выпуска деталей и трудоемкости их изготовления.

Собственно групповую обработку классифицируют также по отдельным групповым операциям. Так, возможна групповая обработка на уровне заготовительного производства, или на уровне отдельных операций, проведения специфических операций и др., а также создание групповых технологических процессов для изготовления детали в целом.

Группа заготовок обрабатывается по общему технологическому маршруту на специализированном рабочем месте. Его особенностью является возможность проведения подналадки средств технологического оснащения. При реализации общего технологического маршрута для отдельных заготовок некоторые операции могут быть пропущены целиком, или при их проведении может быть пропущена обработка отдельным инструментом, а также проведена подналадка инструментов и приспособлений (например, сверл, положений упоров, схем закрепления и др.). Мероприятия такого типа вполне себя оправдывают экономически, так как позволяют приблизить преимущества массового и крупносерийного производства к условиям серийного, мелкосерийного и единичного производств. Однако, указанное сближение возможно лишь в том случае, если подналадка будет по своему характеру незначительной, а время на ее осуществление - минимальным. Наиболее успешно групповая обработка применяется, если одна или две группы заготовок обрабатываются на одном станке в течение месяца. При этом за счет специализации станка растет производительность обработки.

Экономические соображения играют весьма существенную роль при формировании группы заготовок. При этом приходится преодолевать ряд технологических и организационных препятствий особенно в условиях мелкосерийного производства, когда партия заготовок составляет 5-10 шт. Желание загрузить

станок в течение месяца приводит к необходимости объединить в группу заготовки до 60-80 наименований, но это в свою очередь требует многопереходных настроек станков, работу без совмещения переходов и без специальных инструментов и приспособлений. В результате производительность по сравнению с работой на станках, настраиваемых на изготовление одной, а не группы деталей, снижается.

Установление по классификационным признакам состава группы для данного предприятия приводит к созданию комплексной заготовки. Она должна содержать в себе все поверхности, встречающиеся у заготовок, входящих в группу (рис. 1.1.5). Допустим, что в группу занесли заготовки, имеющие различные конфигурации наружных поверхностей (верхний ряд) деталей, необходимых определенному предприятию в данный период времени. Эти же детали имеют различные конфигурации внутренних поверхностей (показаны в нижнем ряду). Комплексная заготовка должна наследовать как наружные, так и внутренние поверхности. Тогда металлорежущий станок настраивают на изготовление комплексной заготовки, хотя она может и не требоваться производству. Изготовление же любой группы детали на таком станке возможно без серьезной переналадки с пропуском в работе отдельных инструментов. Групповая наладка особенно удобна для станков токарно-револьверной группы. Для некоторых других станков понятие комплексной заготовки теряет смысл.

Групповые технологические процессы дают наибольший эффект, когда изготовление связано с применением одной операции (например, токарная револьверная обработка). Вместе с тем, после групповой обработки детали данной группы могут быть разобщены и отдельные представители группы могут входить в другие группы (например, для отдельных операций). Развитие групповой технологии вызвало к жизни создание быстропереналаживаемых приспособлений. Как правило в их основе лежит постоянная составная часть в виде корпусной детали, на которой

устанавливают быстросъемные элементы, изменяемые в зависимости от вида заготовки.

### 1.1.3. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ

Технологичность конструкции является комплексным понятием, которое относится к изделию в целом и его составным частям. Это понятие включает и производственную (конструирование, технологическую подготовку, процессы изготовления) и эксплуатационную (техническое обслуживание, ремонт) области. Технологичность конструкции обеспечивается на основе достижения технологической рациональности и оптимальной конструктивной и технологической преемственности. Технологическая рациональность предполагает решение, соответствующее имеющимся ресурсам, конкретным условиям изготовления и эксплуатации. Конструкция, признанная технологичной для одних условий (например, для изготовления в массовом производстве), в других условиях (при серийном выпуске) может быть нетехнологичной. Конструктивно-технологическая преемственность также рассматривается комплексно, как совокупность свойств и предполагает использование в изделии частей, применяемых или применявшихся ранее в подобных изделиях. Таких частей может быть до 80 %. Под технологической преемственностью понимается возможность использования при изготовлении нового изделия и его составных частей лучших, освоенных и проверенных в производстве и эксплуатации решений по типовым технологическим процессам, операциям, оборудованию, оснастке и т.п. При отработке конструкции на технологичность рассматриваются несколько вариантов решений с выбором наиболее рационального для данных условий. Основные положения, по которым должна проводиться оценка технологичности - сокращение длительности типового производственного процесса (ТПП), снижение трудоемкости, расхода материалов, топливно-энергетических ресурсов. При этом предполагается, что качество продукции неизменно или повышается.

Оценка технологичности конструкции детали может быть качественная и количественная. Качественная оценка (хорошо-плохо, допустимо-недопустимо) предшествует количественной. Количественная оценка характеризуется показателями технологичности.

Система показателей технологичности включает: базовые (исходные) значения, являющиеся предельными нормативами технологичности, обязательными при разработке конструкции; значения показателей технологичности конструкции, достигнутые при раз-

работке; показатели уровня технологичности (отношение достигнутых показателей к базовым).

Определение уровня технологичности конструкции детали, для которой в техническом задании установлены базовые показатели технологичности, является обязательным. В других случаях количественная оценка технологичности детали проводится по усмотрению разработчика: при высокой трудоемкости (себестоимости) детали относительно сборочной единицы; для обоснования выбора оптимального варианта конструкций; для контроля качественной оценки; для пополнения статистических данных о технологических показателях конструкций различных классов деталей и последующего использования этих данных при отработке на технологичность однотипных деталей.

Последовательность и содержание работы по обеспечению технологичности изделий на различных стадиях разработки конструкторской документации, а также рекомендуемый перечень показателей технологичности в зависимости от вида изделия определяется комплексом стандартов ЕСТПП.

Для количественной оценки технологичности детали рекомендованы следующие показатели: трудоемкость изготовления, технологическая себестоимость, коэффициент унификации конструктивных элементов. Определение этих показателей обязательно проводится точными методами. Кроме того, определяют средние оперативные трудоемкость, стоимость и продолжительность технического обслуживания (ремонта) данного вида. Определение этих показателей в общем случае необязательно.

Помимо частных (характеризующих одно из входящих в технологичность свойств) в ряде случаев предусмотрено определение комплексных (характеризующих несколько входящих в понятие частных или комплексных свойств) показателей технологичности конструкции изделия.

В состав работ по обеспечению технологичности входят: планирование показателей технологичности, отработка конструкции на технологичность на всех стадиях разработки изделия; технико-экономический анализ конструкции; метрологическая экспертиза конструкторской документации; технологический контроль конструкторской документации. Конструкцию детали следует обрабатывать на технологичность комплексно, учитывая области производства и эксплуатации, технологичность исходной заготовки, каждый вид обработки в технологическом процессе изготовления, технологичность сборочной единицы, в которую эта деталь входит. Отработка конст-

рукции на технологичность проводится совместно разработчиками конструкторской и технологической документации, предприятиями-изготовителями и представителями заказчика, специалистами по техническому обслуживанию и ремонту техники.

Мероприятия, обеспечивающие технологичность конструкций (до 50...80 %) общего эффекта, который принят за 100 %): выбор рационального принципа действия; сокращение протяженности кинематической цепи; рациональное членение и компоновка конструкции; преимущество конструктивных решений; ограничение номенклатуры конструкционных материалов; обеспечение соответствия конструкции условиям производства и эксплуатации; унификация составных частей изделия, методов их изготовления и контроля; применение нормальных рядов размеров; обеспечение соответствия конструкции требованиям типовых технологических процессов.

Последовательность и содержание работ по обеспечению технологичности детали на отдельных стадиях разработки конструкции определяют в зависимости от сложности и принадлежности детали. В зависимости от принадлежности различают детали взаимосвязанные, являющиеся составными частями других изделий, и самостоятельные, например, сверла, цельные фрезы и т.п.

Правила обеспечения технологичности конструкции самостоятельных деталей предусматривают, что технологичность должна обеспечиваться на всех стадиях ее разработки с указанием базовых показателей технологичности в техническом задании.

Технологичность конструкции взаимосвязанной детали должна удовлетворять общим требованиям, предъявляемым к изделию, и частным требованиям, связанным непосредственно с ее изготовлением. На стадиях разработки проектной конструкторской документации на изделие правила обеспечения технологичности взаимосвязанных деталей предусматривают проведение работ в следующей последовательности: выявляют функции и конструктивные схемы основных деталей; определяют; возможности объединения функций и уменьшение числа деталей в конструкции изделия; возможности преимущества, включая стандартизацию и унификацию конструкций деталей; технологическую рациональность конструктивных решений в части габаритных размеров, используемых материалов, методов получения заготовок и соединений; выявляют сменные детали, требующие специального контроля при техническом обслуживании и плановом ремонте; определяют требования к конструкции таких деталей и

предпосылки к удовлетворению этих требований при компоновке разрабатываемого изделия.

Устанавливают зависимость отдельных показателей качества изделия и технико-экономических требований к нему от применения новых материалов и способов изготовления основных деталей. Если эта зависимость есть, то устанавливают базовые показатели технологичности конструкции этих деталей (по согласованию с разработчиком изделия). При анализе принципиальных схем и компоновок изделия на стадии разработки технического предложения выявляют оригинальные детали, сложные по конструкции и требующие применения новых материалов, технологических процессов, специальных средств технологического оснащения. Результаты этого анализа учитывают на стадии разработки эскизного проекта при отработке конструктивной схемы и компоновке изделия. На этой стадии проводится: выявление номенклатуры и параметров основных сложных деталей; анализ сложности конструкции деталей и возможности их унификации и стандартизации; определение рационального членения или объединения отдельных деталей; анализ условий сборки, точности изготовления и требований к параметрам шероховатости рабочих поверхностей основных деталей, определение номенклатуры сменных и ремонтируемых деталей.

При подготовке окончательных конструктивных решений на стадии разработки технического проекта выполняют дальнейшие работы по обеспечению технологичности сложных деталей. На этой стадии необходимо исключить или довести до минимума механическую или другую обработку при сборке, определить основные технические характеристики специальных средств технологического оснащения для их изготовления. Отработка конструкции на технологичность зависит от программы выпуска и от способов обработки и применяемого оборудования.

На стадии разработки рабочей документации проводят: технологический контроль конструкторской документации на детали (за исключением документации на стандартные и покупные изделия); оценку технологичности конструкции детали на соответствие основным требованиям, предъявляемым к конструкции деталей и их элементам с учетом сборки изделий.

В ряде отраслей на этой стадии организация-разработчик должна: осуществить отработку конструкции на технологичность механически обрабатываемых, литых, горячештампованных и термически обрабатываемых деталей; установить технологические базы при

изготовлении, оптимальную номенклатуру контролируемых параметров, методов и средств их контроля; обеспечить возможность использования робототехники, ГПС и других средств автоматизации, если это необходимо.

Работы по обеспечению технологичности конструкций деталей в общем случае проводят в следующей последовательности: выявление главных конструктивных элементов, влияющих на качество выполнения рабочих функций изделия в условиях эксплуатации; отработка конструкции детали на технологичность сначала по главным, а затем по остальным конструктивным элементам.

Считают, что последующий этап ТПП, заключающийся в разработке технологических процессов, проводится на изделие, которое отработано на технологичность (Р50-54-93-88). Однако и в процессе технологического проектирования отработка технологичности конструкции продолжается. На этом этапе необходимо учесть в конструкции особенности маршрута, способов обработки, оборудования, оснастку, принятые при изготовлении данной детали. При необходимости вносят соответствующие изменения в конструкцию с целью повышения производственной технологичности.

Требования к технологичности конструкции детали можно разбить на несколько групп. Это деление условное, но может облегчить и систематизировать отработку конструкции на технологичность.

Общие требования технологичности конструкции относятся ко всем деталям вне зависимости от способа их изготовления. При разработке конструкции детали следует широко применять принцип стандартизации и унификации. Конструкции, состоящие из стандартных или унифицированных элементов, позволяют использовать при их изготовлении унифицированную, стандартную технологическую оснастку, инструмент и типовые технологические решения. Количество типоразмеров геометрических элементов наружного и внутреннего контуров должно быть наименьшим. Причем каждый контур, по возможности, должен быть образован из участков прямых и окружностей.

Физико-химические и механические свойства материала детали должны соответствовать требованиям эксплуатации, технологии изготовления, хранения и транспортирования. Следует избегать неоправданного многообразия материалов; это скажется на разнообразии технических решений при изготовлении, термической обработке заготовок, на хранении материалов, заготовок и отходов. Разброс свойств материалов, особенно для условий автоматизированного производства, должен

соответствовать заданным требованиям.

Требования по точности и качеству поверхностного слоя (включая шероховатость поверхности) должны быть оптимальными - экономически и конструктивно обоснованными.

Требования технологичности к деталям, подлежащим изготовлению на металлорежущих станках, относятся ко всем деталям, получаемым различными способами обработки резанием.

Конструкция детали должна обладать достаточно высокой жесткостью, что обеспечивает малую деформацию при закреплении и обработке, а следовательно, более высокую точность обработки, возможность назначения высокого уровня режимов резания без вибрации, простую схему установки и возможность легко осуществлять автоматизацию. Автоматизировано в первую очередь изготовление деталей, имеющих высокую жесткость.

Следует правильно назначать технологические базы для обработки, так как это в значительной степени определяет производительность и точность изготовления детали. При этом технологические базы должны удобно размещаться, не мешать обработке поверхностей на данном установе, иметь достаточную протяженность и обеспечивать точную ориентацию и надежное крепление заготовки на станке. С точки зрения получения необходимой точности обработки руководствуются тремя принципами: 1) принцип совмещения баз рекомендует, по возможности, совмещение конструкторской, технологической и измерительной баз; 2) принцип постоянства базы указывает, что наименьшее отклонение взаимного расположения поверхностей обеспечивается при обработке за один установ или при использовании одной и той же базы на разных установах; 3) в случае необходимости смены баз каждая база, используемая на выполняемом переходе, должна обеспечивать большую точность установки, чем базы на предшествующих переходах. Точность и шероховатость поверхности технологической базы заготовки должны обеспечивать точность установки при обработке и контроле.

Предпочтительна конструкция, характеризующаяся относительной простотой наружных и внутренних форм, сечений, переходов и сопряжений всех элементов. Особо точные поверхности рекомендуется выполнять сквозными (для отверстий), гладкими и допускающими обработку напроход. Конструкция детали должна обеспечивать выход инструмента по окончании обработки (например, канавки для выхода резьбообразующего инстру-

мента и т.д.).

Возможности технологических систем и их элементов (оборудования, режущего инструмента, заготовок и т.д.) должны соответствовать требованиям к детали и планируемым условиям изготовления. Так, масса заготовок и оснастки, габариты, требования по точности размеров, формы, взаимного расположения и шероховатости поверхности должны соответствовать техническим возможностям станков.

Требования технологичности деталей учитывают способ обработки, классы деталей и тип производства. Данная группа требований развивает общие требования к обработке, дополняя их и конкретизируя к данным условиям производства. Так, требование высокой жесткости для операций, связанных с деформированием заготовки (протягивание, калибрование), дополняется повышенными требованиями по стабильности жесткости и механических свойств в продольном и поперечном сечениях как одной заготовки, так и партии. В таком случае эти параметры являются определяющими.

Жесткость заготовок типа тел вращения учитывают при выборе схемы базирования. В зависимости от отношения длины  $L$  к диаметру  $D$  эти детали изготавливают с установкой в патроне (при  $L:D \leq 5$ ), на центрах (при  $L:D \leq 10$ ), с использованием люнетов (при  $L:D > 10$ ). Наиболее технологичными являются детали высокой жесткости. Простая схема базирования способствует автоматизации производства деталей такого типа.

Обычно наружные и внутренние поверхности имеют ступенчатую форму. Для возможности обработки детали с одной стороны диаметры должны уменьшаться в одну сторону. Если диаметры изменяются в обе стороны, то необходимо применять специальные станки с центральным приводом, проводить обработку вращающимся инструментом с двух концов, применять токарные станки, позволяющие вести обработку как от задней к передней бабке, так и наоборот; вести обработку за два станова. В этих случаях усложняется наладка, увеличивается количество необходимого инструмента и т.д.

Во всех случаях при обработке ступенчатых поверхностей наружного и внутреннего контуров возможность радиального перемещения резцов (на станках токарной группы, при использовании план-суппортов на расточных станках) резко уменьшает потребность в инструментах. Для станков с одновременным перемещением инструментов (например, токарных многорезцовых) целесообразно подбирать детали с одинаковой длиной ступеней. При использовании гидрокопировальных станков, станков с ЧПУ это требование не

действует. Следует по возможности уменьшать потери времени на врезание и выход инструмента. Это достигается, в частности, при одновременном изготовлении нескольких деталей. Форма детали, позволяющая одновременную обработку, например, при зубофрезерованию колеса с односторонней ступицей или без ступиц, в этих случаях будет более технологичной.

При изготовлении деталей на станках с ЧПУ необходимо учитывать требования технологичности, установленные для аналогичных станков без ЧПУ, и ряд специфических требований. Эти станки приспособлены для выполнения разнообразных переходов, характеризуются достаточно высокой точностью, но значительно более дорогие, работают обычно последовательно одним (в исключительных случаях одновременно несколькими) инструментом (количество их определяется вместимостью магазина, револьверной головки и т.п.), поэтому здесь высокая производительность не может быть достигнута за счет многоинструментной, параллельной схемы выполнения переходов. Задача заключается в том, чтобы для повышения производительности на станках с ЧПУ использовать другие преимущества: возможность полной обработки при малых потерях времени на вспомогательные перемещения и смену инструмента, малые потери, часто перекрываемые временем обработки, на наладку и снятие детали, на наладку и переналадку системы, возможность диагностики элементов системы и внесение коррекций в ее работу и т.д. Возможность полной обработки обеспечивается в тех случаях, когда требования к детали могут быть полностью обеспечены на данной технологической системе за минимальное (в пределах  $\pm$  за один) количество установов. Технологичными при изготовлении на станках с ЧПУ следует считать детали, требования к которым по точности, качеству поверхностного слоя, по габаритам, массе, материалу, по необходимому количеству инструментов удовлетворяют техническим возможностям станков, в том числе и по вместимости магазинов и т.д.

В зависимости от сложности детали базирование осуществляется по необработанным, по заранее обработанным поверхностям, в один установ или в несколько установов с последовательной сменой баз. Технологическая база должна обеспечивать надежность крепления, возможность обработки с одного станова поверхностей, связанных наиболее жесткими допусками. К поверхностям, используемым в качестве баз, предъявляют повышенные требования по точности, по совмещению технологической базы с конструкторской. В заготовках, не имеющих поверхно-

стей, удобных для использования в качестве технологических баз, следует предусмотреть искусственные базы (центровые отверстия, платики и т.п.). При изготовлении корпусных деталей на станках с ЧПУ наиболее часто применяют базирование в координатный угол (по трем плоскостям) и по плоскости и двум отверстиям с осями, перпендикулярными плоскости, с установкой на пальцы (с цилиндрической и ромбической формой рабочей поверхности). Межцентровое расстояние между отверстиями должно быть не менее 0,8 длины детали, и это расстояние должно совпадать с расстоянием между фиксирующими отверстиями плиты приспособления или стола станка. Для заготовок с габаритными размерами менее 320×200×100 мм это расстояние кратно 40 мм, при больших размерах - кратно 60 мм. Диаметр базовых отверстий 4 мм (при наибольшем размере заготовки до 100 мм), 6 мм (св. 100 до 200 мм), 10 мм (св. 200 до 500 мм) и 18 мм (св. 500 мм). Базовые отверстия выполняют с полем допуска Н7, Н8, Н9 в зависимости от требуемой точности при изготовлении детали. Если конструкция каких-то элементов детали требует дополнительных переустановов, то следует изменить конструкцию детали, чтобы избежать этого.

При изготовлении деталей на станках с ЧПУ особенно эффективны меры по унификации элементов, по сокращению многообразия форм и размеров отверстий, углублений и т.п. При этом уменьшается трудоемкость программирования и количество необходимого для обработки инструмента. При получении отверстий следует применять сверла, используемые для обработки отверстий под резьбу, штифты; обработку канавок на токарных станках, по возможности, следует проводить проходными и канавочными резцами и т.п. Не рекомендуется располагать отверстия под разными углами, с пересекающимися осями; диаметры внутренних резьб следует назначать максимально возможными; резьбы, меньшие М3, применять не рекомендуется. Конструкция детали должна обеспечивать свободный доступ инструмента к поверхностям, следует располагать отверстия и другие элементы детали на таком расстоянии от других элементов (ребер жесткости, стенок и т.п.), чтобы при их обработке можно было использовать стандартный режущий и вспомогательный инструмент.

Более технологичными считаются детали типа тел вращения, изготавливаемые на токарных станках с ЧПУ, которые допускают обработку за один установ, не имеют глухих отверстий с двух сторон, имеют малое количество элементов, которые для обработки требуют фиксации шпинделя или вращающегося

инструмента. Для обработки отверстий, ось которых не совпадает с осью шпинделя станка, для фрезерования лысок, пазов - необходимы более дорогие и сложные токарные многоцелевые станки с ЧПУ или другое оборудование.

Наиболее эффективно изготавливать на токарных станках с ЧПУ детали, имеющие сложный контур с небольшим перепадом диаметров, продолжительность обработки которых более чем в 3 раза превышает продолжительность подготовительных, заключительных и контрольных работ, выполняемых непосредственно на станке. При изготовлении деталей типа корпусов, плит (не тел вращения) эффективно использовать многоцелевые станки с ЧПУ, особенно при изготовлении детали со сложным контуром, требующим многокоординатной обработки, с карманами, отверстиями на разных уровнях.

Для размещения элементов зажимных устройств приспособлений и для создания условий максимальной обработки за один установ целесообразно использовать и предусматривать в деталях отверстия, пазы, уступы, карманы, окна и т.п.

Сопряжение поверхностей следует проводить единым радиусом, совпадающим с радиусом инструмента. Для обеспечения необходимой жесткости режущего инструмента соотношение между радиусом сопряжения  $R$  и высотой  $H$  ( $R:H$ ) обрабатываемого контура следует принимать для деталей из легких сплавов  $R:H \geq 1/6$ , для конструкционных сталей  $R:H \geq 1/3$ , из труднообрабатываемых материалов  $R:H \geq 1/2$ . Не рекомендуется поверхности на входе и выходе осевого инструмента располагать под углом к оси, отличным от  $90^\circ$ .

Простановка размеров на чертежах должна быть рациональной, удобной для восприятия и исключать необходимость пересчета при подготовке управляющей программы. Предпочтительно проставлять размеры в прямоугольной системе координат от конструкторских баз детали. При использовании при обработке поворотных столов следует проставлять размеры в полярной системе координат. Размеры сложных контуров задают в собственной системе координат, положение которой необходимо определить относительно конструкторских баз. От конструкторских баз следует задавать размеры до начальной точки отсчета собственной системы координат и, если необходимо, угол поворота этих координат. Необходимо указывать координаты центров всех отверстий. Для сложных деталей для каждой плоскости приводят координаты начала отсчета и таблицы положения осей всех отверстий.

При изготовлении деталей в ГПС на станках с ЧПУ требования по технологичности назначают с учетом условий работы на этом оборудовании, а также при транспортировке и контроле, т.е. комплексно для условий работы всех элементов системы. При изготовлении деталей, обрабатываемых одновременно в комплекте, следует учитывать, что в один комплект могут объединяться детали, выполненные из одного или близкого по химическому составу материала. Более жесткие требования предъявляют и к точности заготовок как по геометрическим параметрам, так и по качеству поверхностного слоя и физико-механическим свойствам. Так, не рекомендуется в ГПС применять отливки, полученные литьем в песчаные формы, из-за наличия посторонних включений повышенной твердости; заготовки из титановых сплавов рекомендуются предварительно обрабатывать вне ГПС для снятия альфированного слоя. При изготовлении в ГПС следует закруглять острые кромки и снимать заусенцы непосредственно при обработке в автоматическом цикле. Всякая ручная обработка в этом случае недопустима.

#### 1.1.4. ПРИПУСКИ НА ОБРАБОТКУ

Элементарная поверхность детали (заготовки) характеризуется номинальными, предельными значениями (а значит и отклонениями) ряда параметров: размера, формы, расположения (далее - параметры геометрической точности), микронеровностями и физико-механическими свойствами (далее - параметры качества поверхностного слоя). Для достижения после обработки заданных значений параметров необходимо и перед обработкой у заготовки обеспечивать значения параметров в определенных границах. Одни и те же результаты по нескольким определяющим параметрам могут быть получены по разным вариантам операций, технологических процессов. Количество, условия выполнения переходов обработки поверхностей устанавливают на предшествующих этапах технологического проектирования.

При назначении припусков и расчете промежуточных и исходных размеров заготовок известными являются переходы обработки элементарных поверхностей, условия установки заготовок на каждом переходе обработки и параметры геометрической точности и качества поверхностного слоя элементарной поверхности до (индекс  $i-1$ ) и после (индекс  $i$ ) каждого перехода. По этим исходным данным определяют припуск и проводят расчет промежуточных и исходных размеров заготовок. Расчет могут вести по нескольким вариантам

обработки. В конце на основе технико-экономического анализа выбирают наилучший для данных условий вариант получения заготовки и ее механической обработки.

Под *припуском* понимают нормируемую для данных условий толщину слоя материала, которую необходимо удалить при механической обработке с данной элементарной поверхности для достижения заданных геометрической точности (номинальных величин и допускаемых отклонений размера, формы, расположения) и параметров качества поверхностного слоя (микронеровностей, глубины дефектного слоя и т.п.). Различают промежуточные и общие припуски на обработку.

*Промежуточный припуск* характеризует слой материала, который удаляют при выполнении отдельного технологического перехода обработки. Припуск на выполняемый ( $i$ -й) переход обработки обозначают  $Z_i$ . Общий припуск на обработку  $Z_0$  характеризует весь слой материала, который снимается с данной элементарной поверхности при выполнении всех технологических переходов обработки. Промежуточный припуск связывает размеры заготовки на предшествующем и выполняемом переходе.

*Общий припуск* определяет связь между размерами поверхности исходной заготовки и детали. Таким образом, припуск необходим при технологическом проектировании только для определения размеров после всех переходов обработки (промежуточные припуски) и для определения размеров заготовки (общие припуски). Исходя из размеров заготовки и детали, вычисляют глубину резания. Припуск и глубина резания разные величины, хотя для большинства переходов обработки взаимосвязанные.

Методика определения глубины резания рассмотрена ниже. Назначение режима резания включает в указанной последовательности определение глубины резания, подачи, скорости резания. Всякое увеличение припусков приведет к соответствующему увеличению размеров заготовки и глубины резания. А это, в свою очередь, приведет к уменьшению подачи и скорости резания, уменьшению эффективности обработки. Увеличится время, трудоемкость обработки, отходы (стружка), расход энергии, расходы на оборудование, инструмент, сбор и переработку стружки. Неблагоприятно изменится виброустойчивость системы, условия для внедрения малолюдного автоматизированного производства. Но и уменьшение снимаемого слоя имеет определенные пределы. Во всех случаях должна обеспечиваться обработка без черноты, т.е. должен быть удален слой, включающий отклонения размера, формы, расположе-

ния поверхности, а также микронеровности, и дефектный поверхностный слой предшествующего перехода обработки. Таким образом, припуск в значительной степени определяет эффективность обработки. Всякие ошибочные решения на этапе технологического проектирования при назначении припуска и расчете размеров заготовки усугубляются потом при назначении подачи, скорости резания. Поэтому оптимизация выбора условий обработки является комплексной задачей, включающей и обоснованное решение по назначению припусков на обработку.

На практике применяют несколько способов определения припусков: 1) табличный способ суммарного назначения припусков, основанный на статистических данных по величине промежуточных и общих припусков, назначаемых в действующем производстве; 2) расчетные методики, основанные на дифференцированном определении факторов, ранее установленных при анализе действующего производства; расчет промежуточных, общих припусков, размеров заготовок проводится по предложенным в методиках зависимостям, предусматривающим определение суммарного эффекта от начальных (элементарных) факторов; 3) табличный способ назначения припусков; таблицы в этом случае составлены на основе расчетных методик для типовых условий обработки.

В первом случае величины припусков могут быть достаточно близки к реальным, но только для тех условий, для которых они определены. Они отражают конкретные условия производства (модели оборудования, режимы обработки, характеристики деталей и т.д.), и всякое изменение начальных условий скажется на точности определения припусков, причем чувствительность к изменению условий не установлена. Способ не дает возможности разработать мероприятия по сокращению величин и увеличению стабильности припусков. Этот способ может применяться ограниченно, в тех случаях, когда допустимо завышенное (для наиболее неблагоприятных условий) снятие материала.

Расчетные методики и таблицы для назначения припусков (второй и третий способы) позволяют более полно учесть конкретные условия обработки. Легко можно установить пути сокращения припусков за счет уменьшения, в первую очередь, доминирующих факторов. Способы имеют большую перспективу применения, особенно в условиях автоматизированного технологического проектирования. Погрешности расчетных методик обусловлены методическими ошибками и ошибками в назначении элементарных факторов для данных условий обработки. Возни-

кают также ошибки при переходе к табличному способу: упрощения, дискретность данных и т.п. Далее рассмотрен расчетный метод определения припусков и его приложения для типовых случаев обработки.

В общем случае необходимо установить:

1) факторы, определяющие припуск;  
2) природу факторов и способ их суммирования;

3) методику определения размеров элементарной поверхности по переходам и размеров исходной заготовки;

4) способы уменьшения трудоемкости технологического проектирования при назначении припусков для типовых условий.

Факторы, определяющие припуск. Рассмотрим  $i$ -й переход обработки номинально цилиндрической наружной поверхности. Положение точки на поверхности будем определять радиусом-вектором  $r(\varphi, Z)$ ; здесь  $\varphi$  - угловая координата;  $Z$  - координата по оси поверхности до рассматриваемого поперечного сечения. Величина предшествующего перехода присваивается индекс  $(i-1)$ , выполняемого перехода - индекс  $(i)$ . По определению припуск на данный переход обработки

$$Z_i = r_{i-1}(\varphi, Z) - r_i(\varphi, Z).$$

Радиус-вектор  $r(\varphi, Z)$  можно представить в виде суммы двух величин: постоянного радиуса  $r_n$  и функции погрешности  $f(\varphi, Z)$ . Функция  $f(\varphi, Z)$  при определенных условиях может быть представлена в виде ряда Фурье, причем члены ряда имеют явный физический смысл, характеризуя отклонение размера  $\Delta r$ , формы  $\Delta F$ , расположения  $\Delta P$  данной поверхности. Совокупность ряда Фурье также характеризует волнистость, микронеровности (шероховатость) поверхности. Ограничимся членами ряда, характеризующими геометрическую точность (размера, расположения, формы). Введем коэффициент направления  $u_q$ , равный +1 для размера наружной поверхности на предшествующем переходе и -1 для выполняемого перехода. Для внутренней поверхности знаки коэффициента меняют. Итак, с учетом сделанных замечаний припуск

$$Z_i = \sum_{q=i-1}^i u_q [r_{nq} + \varphi_q (\Delta r, \Delta F, \Delta P)].$$

Очевидно, что припуск на обработку, характеризуя толщину удаляемого при обработке слоя материала, является случайной величиной, подчиненной закону нормального

распределения (закону Гаусса), так как все величины, его составляющие, при определенных условиях также подчинены этому закону. Принимая ширину предельного поля рассеяния припуска и факторов, его определяющих, равными допускам, имеем

$$TZ_i = \gamma(T_r, TF, TP)_{i,i-1}.$$

В общем случае, когда для расчетов принят средний припуск  $\bar{Z}_i$ , величина его равна  $\bar{Z}_i = \Pi_1 + \Pi_2$ . Здесь  $\Pi_1$  - параметр качества поверхностного слоя, полученного на предшествующем переходе. Во всех методиках принято определять  $\Pi_1$  как сумму предельных (наибольших) величин, характеризующих высоту микронеровностей  $R_{i-1}$  и дефектный поверхностный слой толщиной  $h_{i-1}$  предшествующего перехода обработки  $\Pi_1 = (R + h)_{i-1}$ .

Приближенно для всех переходов механической обработки  $R_{i-1} \approx Rz_{i-1}$ , где  $Rz$  - высота неровностей по десяти точкам. Для заготовок параметр  $R$  не полностью учитывает дефекты, образовавшиеся на поверхности при получении заготовок. Для отливок (ГОСТ 26645) принято учитывать также высотный параметр  $H_w$  волнистости поверхности отливки, поэтому

$$\Pi_1 = (R + h + H_w)_{i-1}.$$

Параметр геометрической точности  $\Pi_2$  определяется в зависимости от допуска на припуск  $\Pi_2 = 0,5TZ_i$ .

Суммирование факторов, определяющих припуск. Допуск на припуск  $TZ_i$ , а следовательно, и припуск на обработку зависят от отклонений размера, расположения поверхности относительно выбранного положения и формы. За переход обработки уменьшаются все отклонения; при этом  $TD_{i-1} > TD_i$  ( $TD$  - допуск на диаметр);  $TP_{i-1} >> TP_i$ ,  $TF_{i-1} >> TF_i$ . Согласно критерию ничтожности при определении припуска можно не учитывать факторы, несущественно влияющие на результат. Поэтому отклонения расположения и формы ( $TP_i$ ,  $TF_i$ ) после выполнения перехода обработки можно не учитывать при расчете. Из-за явлений наследования следует считать также размеры до и после выполнения перехода как случайные величины с коэффициентом корреляции  $\rho_{i(i-1)}$ ; тогда для поверхностей вращения имеем

$$TZ_i = \sqrt{TD_{i-1}^2 + TD_i^2 - 2\rho_{i(i-1)}TD_{i-1}TD_i + 4TP_{i-1}^2 + 4TF_{i-1}^2};$$

при обработке плоских поверхностей соответственно имеем

$$TZ_i = \sqrt{TH_{i-1}^2 + TH_i^2 - 2\rho_{i(i-1)}TH_{i-1}TH_i + TP_{i-1}^2 + TF_{i-1}^2};$$

где  $Z_i$  - припуск на сторону на выполняемый переход обработки;  $H$  - размер от плоскости до технологической базы;  $TP_{i-1}$  - отклонение расположения обрабатываемой поверхности относительно технологических баз.

В тех случаях, когда коэффициент корреляции неизвестен или пренебрегают взаимосвязью между размерами до и после обработки, принимают  $\rho_{i(i-1)} \approx 0$ . Если допуски размера включают в себя допуски формы и расположения, то из расчетных формул эти слагаемые (содержащие  $\rho_{i(i-1)}$  и допуски) исключают.

Определение размеров поверхности после промежуточных переходов обработки. Средний припуск  $Z_i$  устанавливает соотношение между средними диаметрами (с учетом допусков) поверхности на предшествующем и выполняемом переходах обработки поверхности. В этом случае размеры заготовки на предшествующем переходе обработки при определении диаметра наружной  $D_{i-1}$ , внутренней  $d_{i-1}$  цилиндрической поверхности и размера между плоскостью и базой  $H_{i-1}$  соответственно равны:

$$\bar{D}_{i-1} = \bar{D}_i + 2\bar{Z}_i;$$

$$\bar{d}_{i-1} = \bar{d}_i - 2\bar{Z}_i;$$

$$\bar{H}_{i-1} = \bar{H}_i + \bar{Z}_i.$$

После определения средних размеров определяют наибольший и наименьший предельные размеры. Они равны алгебраической сумме среднего размера и части допуска между средними и предельными размерами. Принято для промежуточных переходов механической обработки номинальный размер устанавливать равным наибольшему (для наружных поверхностей) или наименьшему (для внутренних поверхностей) предельным размерам. Поле допуска располагают "в тело" заготовки. Для отливок на размеры элементов, подвергаемых механической обработке, согласно ГОСТ 2645 рекомендуется симметричное расположение полей допусков; в этом случае номинальный размер совпадает со средним. Для стальных штампованных поковок, выполняемых согласно ГОСТ 7505, установлено несимметричное расположение полей

допусков. Конкретные величины следует брать по этому стандарту.

Особенности определения припусков на механическую обработку на отливки и поковки по стандарту. Припуски на обработку установлены по изложенной выше методике. На отливки (ГОСТ 26645) припуск устанавливают в зависимости от общего допуска элемента отливки, ряда припуска и требований по точности элемента, указанной на чертеже детали. Общий допуск элемента отливки учитывает допуск размера относительно технологической базы, а также смещение и коробление отливки, не учитываемых при определении допуска размера. Суммирование факторов геометрической точности проведено при определении  $P_{2i}$  и  $TZ_i$ . Ряд припусков характеризует значение параметра  $P_{1i}$  качества поверхностного слоя отливок и также определяется стандартом.

Припуски на механическую обработку стальных штампованных поковок (ГОСТ 7505) состоят из основных и дополнительных припусков. Основной припуск учитывает только допуски размера поковки и детали и параметр качества их поверхностного слоя. Основной припуск устанавливается в зависимости от требований к поверхности детали (в данном случае от требований к высотному параметру шероховатости поверхности детали). Так как между этим параметром и параметрами, характеризующими геометрическую точность поверхности детали, есть достаточно сильная взаимосвязь, то практически устанавливается связь между припуском и точностью поверхности детали, получаемой за один, два и три перехода обработки. По этому стандарту общий припуск определяется алгебраической суммой основного и дополнительного припусков; последний учитывает отклонение расположения обрабатываемого элемента относительно технологической базы: смещение элементов поковки, изогнутость, отклонение от плоскостности и прямолинейности, междоосевого и межосевого расстояний.

В этом стандарте определение расчетных припусков проведено также по указанной выше методике, но в стандарте приведены припуски, устанавливающие взаимосвязь между номинальными размерами элемента детали и заготовки. Для определения соответствующего размера поковки исходим из размеров элементов по чертежу детали. К номинальному размеру по чертежу детали алгебраически добавляют (для внутренних поверхностей со знаком -, для наружных со знаком +) припуск и получают размер элемента поковки. Так как припуск берется на

сторону, то для цилиндрических поверхностей припуск на диаметр удваивают. Допуски и предельные отклонения устанавливают в зависимости от массы поковки, группы стали, степени сложности, класса точности поковок.

Стандарты на отливки (ГОСТ 26645) и поковки (ГОСТ 7505) соответствуют рекомендациям ИСО по классам точности и допускам размеров. Однако в отличие от международных стандартов предусмотрена более полная оценка точности заготовок: помимо допусков размеров приведены величины отклонений элементов заготовок, припуски на механическую обработку и т.п. Новым здесь является подход к оценке точности заготовок, когда в комплексное понятие "точность" помимо геометрических параметров точности (т.е. соответствия параметрам чертежа) включается припуск на обработку, характеризующий близость параметров качества поверхностного слоя и параметров геометрической точности заготовки и детали.

Дефектный поверхностный слой образуется при получении заготовок и при механической обработке заготовок из стали. Глубина дефектного слоя после механической обработки чугунов и цветных металлов, а также после термической обработки, при определении припуска не учитывается в случае применения расчетных методик. При расчетах припуска можно установить более полно и влияние термической обработки. В этом преимуществе расчетного метода перед табличным. В частности на переходах, предшествующих термической обработке, следует обеспечить такую точность заготовки, чтобы переходы механической обработки после термической обработки позволяли получить стабильный термообработанный поверхностный слой.

Расчет позволяет получить обычно припуски меньше стандартных, наметить пути экономии материала. В тех же обоснованных случаях, когда требования стандарта не выдерживаются, необходимо согласование новых требований с изготовителем заготовок.

Определение глубины резания при механической обработке. При применении резцов, торцовых, дисковых и концевых фрез при обработке уступа, фасонных и шпоночных фрез глубина резания измеряется перпендикулярно обрабатываемой поверхности и характеризует толщину удаляемого материала. Так например, при точении глубина резания

$$t = 0,5(D_{нi-1} - D_{нi}),$$

где  $D_{нi-1}$  - номинальный диаметр до обработки;  $D_{нi}$  - то же после перехода обработки. При работе шпоночными фрезами глубина резания отнесена к каждому рабочему

ходу; при сверлении глубина резания равна половине диаметра сверла; при фрезеровании паза в сплошном материале дисковыми, прорезными, отрезными фрезами глубина резания равна глубине паза, а концевыми фрезами - половине диаметра инструмента.

Рассмотрим случай наружного обтачива-ния, когда глубина резания определяется по приведенному выше соотношению. Номинальный диаметр на предшествующем переходе (в том числе и размер исходной заготовки) определяется с учетом припуска (нормируемой величины) и напуска или части напуска, приходящейся на удаление на дан-ном переходе ( $H_{i-1}$ ). Если напуск не учитыва-ют (он может быть образован уклонами по-верхности, радиусами закругления и т.д. на заготовке), то соотношения между номиналь-ными, предельными размерами и глубина резания определяются приведенными выше зависимостями.

При определении припуска учитывают отклонения размеров, формы и расположения поверхности относительно базы и параметры качества поверхностного слоя; после назначе-ния припуска устанавливают размеры на предшествующем переходе. При расчете глу-бины резания исходят из уже известных раз-меров по переходам, поэтому припуск и глу-бина резания являются по физическому смыслу, по методике назначения, по приме-нению в технологических расчетах разными величинами.

Напуск на цилиндрическую поверхность или торец удаляют, исходя из условия обеспе-чения минимального времени на обработку и возможностей технологической системы. Глу-бину резания при снятии напуска обычно назначают максимально возможной. Предель-ные размеры заготовки после снятия напуска должны обеспечить необходимые припуски на последующую обработку.

Расчет припусков и проме-жуточных размеров по методике В. М. Кована. В работах [2, 3, 5, 6] опубликованы измененная методика расчета и уточненные нормативные данные. В послед-нем варианте [6] принята гипотеза, которая наиболее полно отражает лишь условия чер-новой обработки. Сущности ее в том, что ме-жду размерами поверхности на смежных пе-реходах обработки действует закон копирова-ния размеров, означающий, что наибольшему (наименьшему) предельному размеру на предшествующем переходе обработки соответ-ствует наибольший размер (наименьший раз-мер) на выполняемом переходе. По этой ме-тодике расчетным размером является наи-меньший (для наружных) и наибольший (для внутренних поверхностей) размер. Соответст-

вующие размеры на предшествующем перехо-де определяют с учетом минимального при-пуска  $Z_{i \min}$  на переходе и допуска

$$D_{i-1 \min} = D_{i \min} + 2Z_{i \min};$$

$$D_{i-1 \max} = D_{i \min} + TD_{i-1}$$

для наружных и

$$d_{i-1 \max} = d_{i \max} - 2Z_{i \min};$$

$$d_{i-1 \min} = d_{i-1 \max} - Td_{i-1}$$

для внутренних поверхностей. Здесь  $D$ ,  $TD$  и  $d$ ,  $Td$  - размеры и допуски соответственно наружной и внутренней поверхности. На ос-нове методики В. М. Кована созданы ряд руководящих материалов для различных от-раслей промышленности и собраны необхо-димые справочные материалы.

#### 1.1.5. БАЗИРОВАНИЕ И БАЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ

Если размерная механическая обработка выполняется при перемещении инструмента и заготовок с определенной кинематикой, то не-обходима точная взаимная ориентация всех элементов технологической системы в про-цессе обработки. Заготовка должна с заданной точностью быть установлена в рабочей зоне. Установка включает базирование и закрепле-ние. При базировании заготовке придают требуемое положение. Это положение опреде-ляют в выбранной системе координат, причем принимают, что при базировании не действу-ют силы. Закрепление связано с приложением сил и пар сил к заготовкам, обеспечивающих постоянно их положения, достигнутого при базировании.

Поверхность (или сочетание поверхно-стей, выполняющее ту же функцию), принад-лежащая заготовке и используемая для бази-рования, называют *базой*. По назначению различают базы, используемые для определе-ния положения: детали или сборочной еди-ницы в изделии (*конструкторская база*), заго-товки или изделия при изготовлении или ремонте (*технологическая база*) и средств из-мерения (*измерительная база*). Комплект баз включает совокупность баз, образующих систе-му координат заготовки или изделия. По характеру проявления базы делят на *скрытые* (в виде воображаемой плоскости, оси или точки) и *явные* (в виде реальной поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисок). База может быть *проектной* (исполь-зуется при проектировании изделия, техно-

логического процесса) или *действительной* (фактически используется в конструкции при изготовлении, эксплуатации или ремонте). Кроме указанных вводится классификация баз по лишаемым степеням свободы, но предпочтительно введем еще ряд понятий.

*Опорная точка* символизирует одну из связей заготовки или изделия с выбранной системой координат. Для обеспечения требуемого положения заготовки или изделия (рассматриваемых как твердое тело) в пространстве в выбранной системе координат на них необходимо наложить шесть двухсторонних геометрических связей. Они лишают изделие шести степеней свободы: перемещений вдоль и поворота вокруг трех координатных осей. В ряде случаев допускаются некоторые перемещения при базировании, поэтому соответствующие связи снимают. Схему расположения опорных точек на базах называют *схемой базирования*. При полной ориентации призматической заготовки на схеме базирования указывают шесть опорных точек (правило шести точек). Базам заготовки в этом случае присвоены специальные названия, отражающие классификацию баз по лишаемым степеням свободы. На установочной базе расположено три опорные точки; три связи в этом случае лишают заготовку трех степеней свободы (перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг двух других осей)

*Направляющая база* (здесь расположены две опорные точки) накладывает на заготовку две связи, лишаящие ее двух степеней свободы - перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси.

*Опорная база*, на которой расположена одна опорная точка, накладывает на заготовку одну связь, лишаящую ее одной степени свободы - перемещения вдоль одной координатной оси или поворота вокруг оси. При базировании заготовки с цилиндрической поверхностью *двойной направляющей* является база, лишаящая заготовку четырех степеней свободы - перемещений вдоль и поворота вокруг двух координатных осей; на ней расположены четыре опорных точки. Эта база накладывает на заготовку четыре связи. Базу, лишаящую заготовку двух степеней свободы - перемещения вдоль двух координатных осей - в этом случае называют *двойной опорной*. Две опорные точки на этой базе создадут две связи.

На различных стадиях изготовления детали требования к базированию, к базам, комплекту баз отличаются. В тех случаях, когда заготовка не лишается всех степеней свободы (т.е. допустима менее точная ориентация по оси или угловому положению), на схеме базирования неиспользуемые при бази-

ровании опорные точки и базы не указывают. Это упрощает конструкцию приспособления, систему применяемых установочных элементов.

При анализе базирования рассматривалась заготовка как твердое тело. В реальных условиях приходится обрабатывать и заготовки малой жесткости. В этих случаях помимо указанных выше применяют дополнительные подводимые установочные элементы. После доведения до поверхности заготовки эти опоры закрепляют, предотвращая их смещение по оси опоры под действием сил обработки и уменьшая деформацию элементов системы.

Базирование заготовок проводится с помощью станочных приспособлений. Поверхности заготовки приводятся в соприкосновение с установочными элементами приспособления. В зависимости от способа базирования (а таких способов - три) используют различные установочные элементы.

Если технологическая база неподвижна относительно этих элементов, то при базировании без выверки заготовки применяют постоянные элементы (постоянные опоры и опорные пластины). Требуемое положение достигается при контакте баз заготовки с установочными элементами, рабочая поверхность которых изготовлена с заданной точностью. Этот способ базирования характеризуется малой трудоемкостью и его широко применяют в массовом и крупносерийном производстве. В этом случае отклонение установки  $\epsilon_y$  учитывает элементарные отклонения, обусловленные базированием  $\epsilon_b$ , закреплением  $\epsilon_z$  и точностью изготовления и износа элементов при эксплуатации приспособления  $\epsilon_{пр}$ :  $\epsilon_y = f(\epsilon_b, \epsilon_z, \epsilon_{пр})$ . Эти элементарные отклонения определяют дифференцированно.

Во втором варианте базирования используют регулируемые установочные элементы. Требуемого положения достигают с помощью этих элементов, а проверку проводят с выверкой по поверхностям заготовки или по разметочным рискам, нанесенным ранее. Этот способ более трудоемок, но позволяет в ряде случаев обеспечить большую равномерность среза при обработке слоя. Способ применяют в серийном и единичном производствах. В этом случае обычно определяют только комплексное отклонение установки с выверкой  $\epsilon_{y,в}$ , не оценивая дифференцированно элементарные отклонения базирования и закрепления.

Третий вариант базирования применяется на оборудовании с ЧПУ (станки с ЧПУ, координатно-измерительные машины). После установки заготовки в приспособлении проводится проверка фактического положения ряда поверхностей. Отклонение в положении

заданной поверхности может быть компенсировано смещениями и поворотами стола соответствующей коррекцией программы работы. В этом случае наиболее рациональным образом можно "выкроить" деталь из конкретной заготовки, равномернее распределить припуски на обработку элементарных поверхностей. Трудоемкость такого базирования достаточно высокая, но процесс легко подвергается автоматизации. Точность этого способа установки с ЧПУ обусловлена погрешностями измерения, методическими погрешностями. Способ применяют в серийном производстве.

В ряде случаев база заготовки и база оснастки подвижны (установка на центра, использование при обработке подвижных и неподвижных люнетов, шлифование на башмаках, сверление и растачивание отверстий с использованием инструментов одностороннего резания и т.п.). При такой установке наследуются отклонения формы и расположения участка поверхности, служащего базой, причем эта база заготовки может сама являться и обрабатываемой поверхностью. В любом случае отклонение в положении заготовки или оснастки переменено во времени. Степень переноса, наследования исходных отклонений определяется здесь условиями обработки, характеристикой (например, жесткостью) элементов системы и принятой схемой базирования (расположением опорных точек). Все эти варианты установок являются специальными и здесь не рассматриваются. Использование при обработке заготовок схемы базирования с поверхностями опор (подшипников), принятых в конструкции изделия, может оказаться эффективным для повышения точности. Примером тому может служить операция шлифования отверстия в шпинделе токарного станка с базированием по шейке под подшипник.

В общем случае фактическое отклонение положения заготовки от требуемого обозначим  $\epsilon$ . Можно считать, что это отклонение обусловлено действием ряда факторов  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , которые можно считать независимыми:

$$\epsilon = F(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Среднее значение отклонения  $\bar{\epsilon}$  определим как среднее арифметическое отклонение функции:

$$\bar{\epsilon} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n),$$

где  $\bar{x}$  - среднее арифметическое значение фактора. Очевидно,  $\bar{\epsilon}$  можно рассматривать как систематически возникающее отклонение. Обычно это отклонение компенсируют настройкой технологической системы. Если эту

компенсацию не проводят, то  $\bar{\epsilon}$  следует учитывать при расчетах точности и припусков на обработку.

Погрешность, определяемая как предельное поле рассеяния соответствующей величины,

$$\Delta\epsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial X_i} \right)_{\bar{x}_i}^2 (k_i \Delta x_i)^2},$$

где  $k_i$  - коэффициент относительного рассеяния; для закона нормального распределения (закона Гаусса)  $k = 1,0$ ; для других законов распределения  $k \leq 1,73$ ;  $\Delta x_i$  - поле рассеяния параметра  $X_i$ .

Индексы при частных производных  $\bar{x}_i$  показывают, что после дифференцирования необходимо для всех величин принять средние арифметические значения  $x$ .

Таким образом, отклонения установки, базирования, закрепления, приспособления, определяемые в направлении выдерживаемого размера, следует рассматривать как случайные величины, характеризующие погрешностями  $\bar{\epsilon}_y, \Delta\epsilon_y; \bar{\epsilon}_b, \Delta\epsilon_b; \bar{\epsilon}_z, \Delta\epsilon_z; \bar{\epsilon}_{пр}, \Delta\epsilon_{пр}$ . Отклонение расположения оси номинальной цилиндрической поверхности необходимо рассматривать как вектор, характеризуемый не только амплитудой, но и фазой (углом). Так, положение оси отверстия в общем случае определяется фактическим расстоянием от двух технологических баз, что и необходимо учесть при расчете точности обработки (положения отверстия). Рассмотренные выше отклонения характеризуют положение конкретной поверхности; при расчетах точности отклонения относятся к обработанной на данном выполняемом переходе ( $i$ ) поверхности, а при расчетах припуска характеризуют положение поверхности, полученное на предшествующем переходе ( $i-1$ ); во избежание ошибок целесообразно указывать обозначение размера и перехода, к которому относится данное отклонение, например:

$$\bar{\epsilon}_y(h_i), \Delta\epsilon_y(h_i), \bar{\epsilon}_y(h_{i-1}), \Delta\epsilon_y(h_{i-1}).$$

Отклонения расположения поверхности при расчетах точности обработки и при определении припусков могут весьма существенно различаться. В первом случае в итоге анализа устанавливаются суммарную погрешность обработки при выдерживании данного размера от измерительной базы. Если при расчетах отклонения базирования учитывают только погрешности размера, то при совмещении технологической и измерительной баз принима-

ют  $\bar{\varepsilon}_6(h_i) = 0$ ;  $\Delta\varepsilon_6(h_i) = 0$ . Действительно, согласно принятой методике определения отклонений, обусловленные базированием, определяют при условии, что все остальные элементарные погрешности, влияющие на положение обработанной поверхности, не учитывают, так что и обработанная поверхность и базы при этом занимают постоянное положение.

При расчетах же припусков на обработку отклонение базирования  $\varepsilon_6(h_{i-1})$  характеризует положение обрабатываемой поверхности заготовки и всегда  $\varepsilon_6(h_{i-1}) \neq 0$ . Другой пример. При определении точности обработки по диаметру поверхности вращения на станках токарной группы отклонение базирования не учитывают. В случае же определения припуска отклонение базирования (расположения обрабатываемой поверхности относительно оси вращения), обусловленное погрешностями заготовки (изогнутостью и смещением) и обработки технологической базы (зацентровки), может быть весьма существенным. Влияние геометрических погрешностей (размера, формы, расположения) технологической базы особенно внимательно следует анализировать для случаев подвижной относительно установочных элементов базы. Часто при обработке необходимо выдержать с разной точностью размеры от баз. Так, положение оси отверстия в корпусной детали может быть задано с разными допусками на размеры от баз и угловых положений. Погрешности обработки следует определять по каждому параметру отдельно или оценивать комплексно позиционное отклонение. При назначении же припуска можно ограничиться только наибольшим смещением от номинального положения, которое и следует учитывать при назначении припуска.

Итак, суммарная погрешность обработки включает отклонения в положении обработанной на данном переходе поверхности, причем это отклонение определяют относительно другой действительной (фактически используемой в производстве) базы. Таким образом, действительный размер учитывает и погрешности обработанной поверхности и погрешности (формы, расположения) относительно технологической (базы) поверхности заготовки, используемой в качестве измерительной базы. При назначении припусков необходимо знать взаимное отклонение расположения обрабатываемой поверхности и инструмента (например, при обработке поверхности отверстия).

Отклонение при базировании определяют соответствующими геометрическими расчетами или расчетом размерных цепей, что

обеспечивает в ряде случаев более быстрое, простое и наглядное решение задачи.

Рассмотрим пример определения отклонений при базировании по наружной цилиндрической поверхности диаметром  $D$  в призме с углом между гранями  $2\alpha$ . Начало системы координат целесообразно разместить в точке пересечения линий граней призмы, а ось  $Z$  провести через эту точку и центр заготовки. Здесь для упрощения расчетов принята плоская расчетная схема (т.е. ограничиваются рассмотрением смещений только в одной плоскости; если необходимо учесть отклонения формы поверхности заготовки, то следует учесть смещения в двух плоскостях). В общем случае

$$h_i = H - \frac{D}{2} \left( \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} + u \right) q,$$

где  $h_i$  - размер от обрабатываемой плоскости лыски или паза, оси отверстия в торце до поверхности заготовки; при  $h > 0,5D$  следует принимать  $u = -1$ ; при  $h = 0,5D$  имеем  $u = 0$ ; при  $h < 0,5D$  имеем  $u = -1$ ;  $\beta$  - угол между осью  $Z$  и обрабатываемой плоскостью; при  $\beta = 0 + \alpha$  имеем  $u = -1$  и  $q = -1$ ; в остальных случаях  $q = +1$ ;  $H$  - расстояние от начала координат до плоскости или оси обрабатываемого отверстия.

Пользуясь указанными выше зависимостями, найдем

$$\bar{\varepsilon}_6(h_i) = \bar{H} - \frac{\bar{D}}{2} k;$$

$$\Delta\varepsilon_6(h_i) = 0,5 \cdot TD \cdot k,$$

где  $k = \left( \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} + u \right) q$ . Здесь  $k$  - коэффициент

базирования, учитывает влияние схемы базирования на отклонение положения, возникающее при базировании. В общем случае среднее отклонение  $\bar{\varepsilon}_6(h_i)$  должно быть учтено при настройке; закон распределения  $\varepsilon_6$  и  $D$  одинаков и в ряде случаев может считаться нормальным (Гаусса). Выше принято, что поле рассеяния размера  $D$  равно допуску на этот размер  $TD$ .

Отклонение положения поверхности возникает и при закреплении заготовок в связи с контактными деформациями стыка: база заготовки - установочные элементы приспособления. Смещение при закреплении  $\varepsilon_3$  определяют по эмпирическим зависимостям вида  $\varepsilon_3 = c Q^n \cos \gamma$ , где  $c, n$  - коэффициенты, характеризующий условия контакта, материал и твердость поверхностей соприкасающихся элементов;  $Q$  - сила, действующая на устано-

вочный элемент (опору);  $\gamma$  - угол между направлением выдерживаемого размера и направлением смещения. В случае, когда  $\gamma = \pi/2$ , не учитывается влияние смещения при закреплении на выдерживаемый размер. Такие условия обеспечиваются при закреплении заготовок типа тел вращения по торцу, например, при изготовлении колец подшипников с установкой в магнитном патроне. Средняя величина  $\bar{\epsilon}_3$  и погрешность закрепления  $\Delta\epsilon_3$  в этом случае равны:

$$\bar{\epsilon}_3 = \bar{c}\bar{Q} \cos \gamma;$$

$$\Delta\epsilon_3 = \bar{c}\bar{Q}^n \cos \gamma \sqrt{\left(\frac{\Delta c}{\bar{c}}\right)^2 + \left(\frac{n\Delta Q}{\bar{Q}}\right)^2};$$

где  $\bar{c}$  и  $\bar{Q}$  - средние значения;  $\Delta c$  и  $\Delta Q$  - предельные рассеяния параметров.

Если силы, действующие на опоры, различаются, то помимо смещения может возникнуть поворот заготовки. Для некоторых вариантов установок

$$\epsilon_3 = [k_{Rz} Rz + k_{НВ} НВ + c_1] c Q^n,$$

где  $Rz$  - средняя высота неровностей профиля;  $НВ$  - твердость по Бринеллю поверхности заготовки;  $k_{Rz}$ ,  $k_{НВ}$ ,  $c_1$  и  $c$  - коэффициенты, учитывающие условия закрепления; они определяются экспериментально.

Среднее смещение  $\bar{\epsilon}_3$  и погрешность  $\Delta\epsilon_3$  тогда равны:

$$\bar{\epsilon}_3 = [k_{Rz} \bar{Rz} + k_{НВ} \bar{НВ} + c_1] \bar{c} \bar{Q}^n;$$

$$\Delta\epsilon_3 = \bar{\epsilon}_3 \sqrt{(k_{Rz} \Delta Rz)^2 + (k_{НВ} \overline{НВ}^{p-1} \Delta НВ)^2},$$

где показатель степени при установке на постоянные опоры и опорные пластины принимают  $p = 1$ ; при установке на призму  $p = -1$ .

Отклонение положения заготовки, связанное с погрешностями изготовления и износом установочных элементов приспособления, в общем случае не должны превышать 1/3 - 1/10 части допуска на выдерживаемый размер детали.

Отклонение установки заготовки вычисляют с учетом элементарных отклонений, возникших при базировании ( $\epsilon_6$ ), закреплении ( $\epsilon_7$ ) и связанных с изготовлением и износом приспособления ( $\epsilon_{пр}$ ). Как для элементарных отклонений, так и для комплексной величины  $\epsilon_y$ , может быть принят закон нормального распределения. Тогда среднее от-

клонение  $\bar{\epsilon}_y$  и погрешность установки  $\Delta\epsilon_y$  равны:

$$\bar{\epsilon}_y = \bar{\epsilon}_6 + \bar{\epsilon}_7 + \bar{\epsilon}_{пр};$$

$$\Delta\epsilon_y = \sqrt{\Delta\epsilon_6^2 + \Delta\epsilon_7^2 + \Delta\epsilon_{пр}^2}$$

или 
$$\sqrt{\left(\frac{\Delta\epsilon_6}{\Delta\epsilon_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\epsilon_7}{\Delta\epsilon_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\epsilon_{пр}}{\Delta\epsilon_y}\right)^2} = 1.$$

Если какая-то относительная погрешность  $\Delta\epsilon/\Delta\epsilon_y$  меньше 0,1, то из рассмотрения эту погрешность можно исключить.

Основные принципы базирования заготовок при механической обработке. При обработке могут встретиться два варианта: к положению заготовки в каких-то направлениях не предъявляют высоких требований или стремятся выбрать рациональный способ установки, при котором обеспечивается заданная точность обработки.

При выборе способа установки по первому варианту обращают основное внимание на упрощение конструкции приспособления и удобства работы. Например, при фрезеровании лысок, пазов заготовку с цилиндрической базой устанавливают на жесткую призму, хотя при этом и возникает большая погрешность.

Во втором случае стремятся принять такие схемы базирования, а также конструкцию приспособления, чтобы погрешность установки была меньше допустимой величины. В общем случае суммарная погрешность обработки  $\Delta\epsilon$  определяется с учетом всех элементарных погрешностей  $\Delta_j$  и погрешности установки  $\Delta\epsilon_y$  учтено отдельно. Имеем

$$\Delta\epsilon = \sqrt{\sum (k_j \Delta_j)^2 + \Delta\epsilon_y^2},$$

где  $k_j$  - коэффициент, учитывающий отличие закона распределения данной погрешности от закона нормального распределения. Принято, что закон распределения случайной величины  $\Delta\epsilon_y$  нормальный; для него  $k = 1,0$ .

Если при суммировании случайных величин  $\sum (k_j \Delta_j)^2 > 10\Delta\epsilon_y^2$ , то можно пренебречь меньшей величиной и принять 
$$\Delta\epsilon \approx \sqrt{\sum (k_j \Delta_j)^2}.$$
 Таким образом, необходимо стремиться выполнять это условие.

Наибольшую точность взаимного расположения поверхностей обеспечивают при обработке за одну установку (изготовление деталей на автоматах, станках с ЧПУ). При

использовании одной базы (установка на центровые отверстия, на плоскость и установочные пальцы цилиндрической и ромбической формы) достигается высокая точность. Отклонения в положении заготовок в этом случае обусловлены геометрическими отклонениями поверхностей заготовок, служащих базой, погрешностями изготовления, износом и смятием установочных элементов и зазором между этими элементами и технологическими базами заготовки.

В общем случае при базировании следует придерживаться следующих принципов.

1. При высоких требованиях к точности обработки необходимо выбирать такую схему, которая обеспечивает наименьшую погрешность установки.

2. Для повышения точности базирования необходимо применять принцип совмещения баз - совмещать технологическую, измерительную и конструкторскую базы.

3. Целесообразно соблюдать принцип постоянства баз. При перемене баз в ходе технологического процесса точность обработки снижается из-за погрешности взаимного расположения новых и применявшихся ранее технологических баз. Технологические базы, применяемые на последующих переходах, должны обеспечивать большую точность положения заготовки, чем базы, применявшиеся ранее. Необработанные поверхности в качестве базы используют однократно.

4. В тех случаях, когда поверхности заготовки не удовлетворяют требованиям к технологическим базам по размерам, форме, расположению и точности, на заготовке создают искусственные базы (центровые отверстия, платики, выточки, технологические отверстия). Эти базы могут быть удалены в конце технологического процесса или оставлены на детали для установки ее при ремонте.

#### 1.1.6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ

Выбор наилучшего варианта реализации технологических процессов механической обработки проводится на этапе технико-экономического обоснования и осуществляется в несколько этапов:

1) отбор вариантов из потенциально возможных, каждый из которых удовлетворяет заданным техническим требованиям и условиям изготовления определенной детали, а также ограничениям социальных стандартов и экономических требований; в число рассматриваемых вариантов необходимо включать наиболее прогрессивные, технико-экономические показатели которых превосходят или соответствуют лучшим мировым достижениям;

2) по каждому варианту из числа отобранных определяют затраты, результаты и экономический эффект;

3) лучшим считается вариант, у которого экономический эффект максимален, а при условии тождества результата - затраты на его реализацию минимальны.

Для случаев, когда технологические процессы механической обработки деталей обеспечивают повышение их эксплуатационных свойств, наилучший вариант определяется максимумом экономического эффекта по годам расчетного периода

$$\mathcal{E}_T = P_T - 3_T,$$

где  $P_T$  - стоимостная оценка результатов, полученных за счет повышения эксплуатационных свойств деталей за расчетный период;  $3_T$  - стоимостная оценка затрат на реализацию технологического процесса, обеспечивающего повышение эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей за расчетный период.

Для технологических процессов этого вида, характеризующихся стабильностью технико-экономических показателей (объемов производства, показателей качества, затрат и результатов) по годам расчетного периода, экономический эффект

$$\mathcal{E}_T = \frac{P_T - 3_T}{R_p + E_n},$$

где  $P_T$  - неизменная по годам расчетного периода стоимостная оценка результатов от повышения эксплуатационных свойств деталей;  $3_T$  - неизменные по годам расчетного периода затраты на реализацию технологического процесса;  $R_p$  - норма реновации основных фондов, используемых при реализации технологического процесса, с учетом фактора времени;  $E_n$  - норматив приведения разновременных затрат и результатов, численно равный эффективности капитальных вложений ( $E_n = 0,1$ ).

Стоимостная оценка результатов  $P_T$ , полученных от повышения эксплуатационных свойств деталей, определяется либо вследствие изменения их цены и объема выпуска, либо уменьшения потребности в этих деталях за счет увеличения их срока службы или других показателей надежности в процессе эксплуатации.

В случаях, когда варианты технологического процесса механической обработки обеспечивают тождественные эксплуатационные свойства деталей (тождественный полезный результат), выбор наиболее экономического варианта осуществляется по минимуму затрат на реализацию данного технологического процесса.

$$3_T = И + (R_p + E_n)K,$$

где  $I$  - годовые текущие издержки, связанные с реализацией технологического процесса механической обработки (без учета амортизации на реновацию);  $K$  - единовременные капитальные вложения, необходимые для реализации технологического процесса механической обработки.

Годовые текущие издержки производства  $I$  при реализации технологического процесса механической обработки

$$I = \left( M_0 + \sum_{i=1}^n \frac{t_{ш.к.i} \cdot C_i}{60} \right) A,$$

где  $M_0$  - затраты на основной материал с учетом утилизации отходов, руб/шт;  $n$  - число технологических операций ( $i = \overline{1, n}$ );  $t_{ш.к.i}$  - норма штучно-калькуляционного времени на  $i$ -ю операцию технологического процесса, мин;  $C_i$  - стоимость одного часа работы оборудования на  $i$ -й операции, руб/ч;  $A$  - годовая программа выпуска деталей, шт/год.

Затраты на основной материал определяются:

при использовании специальных затрат заготовок:

$$M_0 = C_{заг} - m_{отх} C_{отх},$$

при использовании сортового материала:

$$M_0 = \frac{m_d}{K_{и.м.}} \left[ C_M - C_{отх} (1 - K_{и.м.}) \right];$$

здесь  $C_{заг}$  - цена заготовки, руб/шт;  $m_{отх}$  - масса отходов на одну деталь, кг/шт;  $C_{отх}$  - цена реализации отходов, руб/кг;  $m_d$  - чистая масса детали, кг/шт;  $K_{и.м.}$  - коэффициент использования материала;  $C_M$  - цена материала, руб/кг.

Стоимость 1 ч работы оборудования (без учета амортизации на реновацию)

$$C = C_{з.о} + C_{з.н} + C_{э.с} + C_{э.н} + C_{в.м} + C_{и.н} + C_{п.о} + C_{т.р} + C_{к.р} + C_{у.у} + C_{п.п},$$

где  $C_{з.о}$  - часовая заработная плата (основная и дополнительная) основных производственных рабочих с отчислениями в фонд социального страхования;  $C_{з.н}$  - то же, наладчика;  $C_{э.с}$  - затраты на силовую электроэнергию;  $C_{э.н}$  - затраты на энергоносители (пар, сжатый воздух, воду и т.п.);  $C_{в.м}$  - затраты на вспомогательный материал;  $C_{ин}$  - затраты на инструмент;  $C_{п.о}$  - затраты на приспособления и оснастку;  $C_{т.р}$  - затраты на текущий ремонт и межремонтное обслуживание оборудования;  $C_{к.р}$  - затраты на капитальный ремонт оборудо-

вания;  $C_{у.у}$  - затраты на содержание и ремонт управляющих устройств;  $C_{п.п}$  - затраты на содержание производственных площадей.

Расчетные формулы для определения отдельных элементов затрат стоимости 1 ч работы оборудования представлены в табл. 1.1.2.

На стадии технико-экономического обоснования технологических процессов механической обработки при недостаточности информации для точного расчета текущих издержек могут быть использованы ориентировочные значения технологической себестоимости обработки, полученные с помощью многофакторных корреляционных зависимостей ее от конструкторско-технологических параметров.

Технологическая себестоимость механической обработки в зависимости от материала заготовки и метода ее получения, конструктивно-технологической сложности детали, ее массы и программы выпуска

$$C_{мех} = B_0 \left( \frac{m_d}{K_{и.м.}} \right)^{b_1} A^{b_2} B_1^{c_m - 1},$$

где  $C_{мех}$  - технологическая себестоимость механической обработки детали, руб/шт;  $B_0$  - постоянный коэффициент, учитывающий вид материала заготовки, а также метод и способ ее получения;  $b_1$  и  $b_2$  - показатели степени уравнения регрессии;  $B_1$  - постоянный коэффициент, учитывающий конструктивно-технологическую сложность детали для механической обработки;  $c_m$  - номер группы конструктивно-технологической сложности детали по механической обработке (определяется по специальным классификаторам).  $B_0, B_1, b_1, b_2$  - представляют собой нормативы, определяющие технологическую себестоимость механической обработки детали при заданных значениях основных факторов. Значения  $B_0, B_1, b_1, b_2$  для различных методов получения заготовок и различных материалов представлены в табл. 1.1.3.

Единовременные капитальные вложения, необходимые для реализации технологического процесса механической обработки,

$$K = K_{т.п} + K_0 + K_{осн} + K_{пл} + K_{о.с.}$$

где  $K_{т.п}$  - затраты на исследования и техническую подготовку производства;  $K_0$  - капиталовложение в оборудование;  $K_{осн}$  - то же, в техническую оснастку и приспособления;  $K_{пл}$  - то же, в производственную площадь;  $K_{о.с.}$  - капитальные вложения в оборотные средства.

## 1.1.2. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Расчетная формула	Расчетная формула
$C_{з.о} = \sum_{i=1}^p C_{Ti} K_1 K_2,$ <p>где <math>C_{Ti}</math> - часовая тарифная ставка основного рабочего <math>i</math>-го разряда; <math>p</math> - число основных рабочих, обслуживающих данное оборудование; <math>K_1</math> - коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату; <math>K_2</math> - коэффициент, учитывающий отчисления в фонд социального страхования.</p>	$C_{в.м} = C_{об} + C_{см} + C_{ох};$ $C_{об} = R_m \cdot g_{об} \cdot U_{об};$ $C_{см} = R_m \cdot g_{см} \cdot U_{см};$ $C_{ох} = g_{ох} \cdot U_{ох},$ <p>где <math>C_{об}</math>, <math>C_{см}</math>, <math>C_{ох}</math> - соответственно затраты на материалы обтирочные, смазочные, охлаждающие (вода, эмульсия); <math>R_m</math> - категория ремонтной сложности механической части оборудования; <math>g_{см}</math>, <math>g_{об}</math> - среднечасовая норма расхода соответственно обтирочных и смазочных материалов на единицу ремонтной сложности, (кг/руб); <math>g_{ох}</math> - среднечасовая расход охлаждающих материалов; <math>U_{об}</math>, <math>U_{см}</math>, <math>U_{ох}</math> - соответственно средняя стоимость обтирочных, смазочных и охлаждающих материалов (руб/кг, руб/м<sup>3</sup>)</p>
$C_{з.н} = \frac{C'_T \cdot K_1 \cdot K_2}{f},$ <p>где <math>C'_T</math> - часовая тарифная ставка наладчика данного разряда; <math>f</math> - число единиц оборудования закрепленного за одним наладчиком.</p>	
$C_{з.с} = \frac{N \cdot K_M \cdot K_B \cdot K_C \cdot U_3}{K_{п.д} \cdot K_{п.д}},$ <p>где <math>N</math> - установленная мощность всех электродвигателей и других энергоприборов, кВт; <math>K_M</math> - коэффициент использования мощности электродвигателей; <math>K_B</math> - коэффициент загрузки электродвигателей по машинному времени; <math>K_C</math> - коэффициент, учитывающий одновременную работу электродвигателя; <math>U_3</math> - цена 1 кВт·ч силовой электроэнергии, руб/ч; <math>K_{п.д}</math> - коэффициент, учитывающий потери в сети; <math>K_{п.д}</math> - коэффициент полезного действия электродвигателей.</p>	$C_{ин} = \gamma_m \cdot \sum_{i=1}^h C_{инi} \cdot \rho_i;$ $C_{инi} = \frac{U_i + n_{pi} \cdot S_{pi}}{T_{сти} (n_{pi} + 1)} K_{уб},$ <p>где <math>\gamma_m</math> - удельное значение машинного времени работы оборудования в общем времени его работы; <math>h</math> - количество типов инструмента, применяемого на данном оборудовании; <math>C_{инi}</math> - себестоимость 1 ч работы инструмента <math>i</math>-го типа, руб/ч; <math>U_i</math> - цена нового инструмента <math>i</math>-го типа, руб/шт; <math>n_{pi}</math> - число переточек до полного износа; <math>S_{pi}</math> - затраты на одну переточку инструмента <math>i</math>-го типа, руб/пер.; <math>K_{уб}</math> - коэффициент случайной убыли инструмента; <math>T_{сти}</math> - средняя стойкость <math>i</math>-го типа инструмента между переточками, ч; <math>\rho_i</math> - доля времени работы инструмента <math>i</math>-го типа.</p>
$C_{ЭН} = C_{пар} + C_{возд} + C_{вода}$ $C_{пар} = g_{пар} \cdot U_{пар}$ $C_{возд} = g_{возд} \cdot U_{возд}$ $C_{вода} = g_{вода} \cdot U_{вода},$ <p><math>C_{пар}</math>, <math>C_{возд}</math>, <math>C_{вода}</math> - часовые затраты соответственно на пар, сжатый воздух, воду, необходимых для работы оборудования; <math>g_{пар}</math>, <math>g_{возд}</math>, <math>g_{вода}</math> - среднечасовой расход пара (кг/ч), воздуха, воды (м<sup>3</sup>/ч); <math>U_{пар}</math>, <math>U_{возд}</math>, <math>U_{вода}</math> - цена собственного пара (руб/кг), воздуха, воды (руб/м<sup>3</sup>)</p>	
$C_{тр} = W_{тр.м} \cdot R_M + W_{тр.э} \cdot R_3,$ <p>где <math>W_{тр.м}</math>, <math>W_{тр.э}</math> - среднечасовые удельные затраты на межремонтное обслуживание и текущий плановый ремонт на единицу ремонтной сложности соответственно механической и электрической части оборудования, руб/ч; <math>R_M</math> и <math>R_3</math> - категории ремонтной сложности соответственно механической и электрической частей данного оборудования.</p>	$C_{у.у} = \frac{350j}{a},$ <p>где <math>j</math> - число смен работы управляющих устройств в течение суток; <math>a</math> - число обработанных деталей по данной программе за год.</p>

Продолжение табл. 1.1.2

Расчетная формула	Расчетная формула
$C_{кр} = (W_{кр.м} \cdot R_m + W_{кр.э} \cdot R_э) \cdot \mu,$ <p>где <math>W_{кр.м}</math>, <math>W_{кр.э}</math> - среднечасовые затраты (удельные) на капремонт на единицу ремонтной сложности соответственно механической и электрической части оборудования, руб/ч; <math>\mu</math> - коэффициент, учитывающий класс точности ремонтируемого оборудования.</p>	$C_{п.п} = \frac{H_{п} S \cdot \gamma}{F},$ <p>где <math>H_{п}</math> - норматив затрат на 1 м<sup>2</sup> производственной площади в год; <math>S</math> - габаритная площадь оборудования, м<sup>2</sup>; <math>\gamma</math> - коэффициент, учитывающий дополнительную площадь; <math>F</math> - годовой фонд работы оборудования, ч</p>

Составляющие капитальных вложений носят разновременный характер потребности в них, что требует их приведения ко времени реализации технологического процесса в производственных условиях, а коэффициент приведения разновременных затрат к расчетному году

$$a_t = (1 + E_H)^{t_p - t},$$

где  $t_p$  - расчетный год (год реализации технологического процесса механической обработ-

ки);  $t$  - год, одновременные затраты которого приводятся к расчетному году.

Капитальные вложения для авансирования разовых затрат на техническую подготовку производства  $K_{т.п}$  включают затраты на выполнение научных исследований, разработку технологических процессов, комплекта управляющих программ, проектирование технологической оснастки и приспособлений.

### 1.1.3. Значения нормативов для различных методов получения заготовок

Материал	$B_0$	$b_1$	$b_2$	$B_1$
1	2	3	4	5
<b>Литье</b>				
Чугуны	3,185	0,5229	-0,1967	1,294
<b>Стали:</b>				
углеродистые и низколегированные	5,469	0,5105	-0,2266	1,294
легированные и высоколегированные (кроме сталей со специальными свойствами)	8,968	0,4644	-0,2266	1,294
высоколегированные со специальными свойствами	20,677	0,4644	-0,2266	1,294
Сплавы на основе алюминия	3,185	0,5229	-0,1967	1,294
Бронзы, латуни	2,867	0,5229	-0,1967	1,294
<b>Обработка давлением</b>				
<b>Стали:</b>				
углеродистые и низколегированные	5,394	0,5282	-0,2278	1,257
легированные и высоколегированные (кроме сталей со специальными свойствами)	6,767	0,5242	-0,2278	1,291

Продолжение табл. 1.1.3

1	2	3	4	5
высоколегированные со специальными свойствами	15,563	0,5242	-0,2278	1,291
Сплавы на основе алюминия	3,140	0,5400	-0,1979	1,257
<b>Обработка резанием сортового проката</b>				
углеродистые и низколегированные	4,855	0,5282	-0,2278	1,285
легированные и высоколегированные (кроме сталей со специальными свойствами)	6,090	0,5242	-0,2278	1,285
высоколегированные со специальными свойствами	14,007	0,5242	-0,2278	1,285
Сплавы на основе алюминия	2,826	0,5400	-0,1979	1,285

Эти затраты рассчитываются по трудоемкости выполнения работ, которая определяется по специальным нормативам, учитывающим объем работ, сложность и новизну разборок.

Капиталовложения в оборудование  $K_0$  определяются как сумма капиталовложений в технологическое, энергетическое, подъемно-транспортное оборудование и в средства контроля и управления. Капиталовложения в технологическое оборудование

$$K_{0,т.} = \alpha \sum_{i=1}^n \Pi_{об,i} W_{об,i} \eta_{об,i},$$

где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий затраты по доставке и монтажу оборудования;  $\Pi_{об,i}$  - оптовая цена единицы  $i$ -й оборудования, руб/шт;  $W_{об,i}$  - принятое количество оборудования для выполнения  $i$ -й операции (целое число), шт;  $\eta_{об,i}$  - коэффициент занятости технологического оборудования по времени выполнением  $i$ -и операции технологического процесса (при применении специального оборудования, предназначенного для выполнения конкретной операции  $\eta_{об,i} = 1$ ).

Капиталовложения в энергетическое и подъемно-транспортное оборудование, а также в средства контроля и управления рассчитывают аналогично капиталовложениям в технологическое оборудование.

Капиталовложения в технологическую

оснастку и приспособления

$$K_{осн} = \sum_{i=1}^n K_{осн,i} W_{осн,i} \eta_{осн,i},$$

где  $K_{осн,i}$  - стоимость одного комплекта оснастки для выполнения  $i$ -й операции (учитывается при  $K_{осн,i} > 50$ ) руб/шт.;  $W_{осн,i}$  - количество комплектов оснастки, необходимое для бесперебойного выполнения  $i$ -й операции, шт;  $\eta_{осн,i}$  - коэффициент занятости технологической оснастки при выполнении  $i$ -й операции (для специальной оснастки  $\eta_{осн,i} = 1$ ).

Капитальные вложения в производственную площадь  $K_{осн}$ , необходимую для реализации технологического процесса механической обработки

$$K_{пр} = \sum_{i=1}^n S_i \gamma_i W_i \eta_i \Pi_{зд},$$

где  $S_i$  - габаритная площадь  $i$ -й единицы оборудования, м<sup>2</sup>;  $\gamma_i$  - коэффициент, учитывающий дополнительную площадь (на переходы, проезды, служебные и бытовые помещения);  $W_i$  - количество оборудования  $i$ -го наименования;  $\eta_i$  - коэффициент занятости площади в течение года выполнением  $i$ -й операции;  $\Pi_{зд}$  - средняя стоимость 1 м<sup>2</sup> площади производственных цехов, включая отопительное,

санитарно-техническое хозяйство и др. руб/м<sup>2</sup>).

Капитальные вложения в оборотные средства  $K_{o.c.}$  необходимо учитывать в случаях применения технологического оборудования с высокой концентрацией инструмента, с большим числом накопителей деталей и инструмента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Качество машин:** Справочник в 2 т. Т. 1 / А.Г. Сулов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. / Под общей ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 1996, 256 с.

2. **Кован В.М.** Основы технологии машиностроения. М: Машгиз, 1959, 496 с.

3. **Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А.** Точность обработки, заготовок и припуски в машиностроении: Справочник технолога. М.: Машиностроение, 1975, 288 с.

4. **Расчеты** экономической эффективности новой техники. Справочник /Под ред. К.М. Великанова. Л. Машиностроение, 1981, 266 с.

5. **Справочник** технолога-машиностроителя в 2-х т. /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985, 656 с. (Т1), 496 с. (Т 2).

6. **Технология** машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др. / Под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 564 с.

7. **Технологичность** конструкции изделия: Справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др. Под общ. ред. Ю.Д. Амирова 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.

## Глава 1.2

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

#### 1.2.1. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Под *качеством продукции* (ГОСТ 31.111.41) понимают совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с ее назначением.

Такое потребительское определение качества полностью относится к любому изделию - предмету производства, в том числе и к деталям, входящим в состав изделия.

К основным свойствам качества деталей могут быть отнесены: прочность (статическая, циклическая, сопротивление усталости); долговечность (ресурс); технологичность; взаимозаменяемость; износостойкость рабочих поверхностей; коррозионная и кавитационная стойкость; специальные свойства (отражательная способность, жаростойкость, электропроводность и др.); эстетичность; экологическая чистота; прочность неподвижных соединений; герметичность соединений и другие.

Все названные основные свойства качества деталей целенаправленно отражают их эксплуатационное предназначение, а такие свойства, как технологичность, взаимозаменяемость и экологическая чистота, наряду с их эксплуатационным предназначением, непосредственно используются на этапе производства, формируя показатели технико-экономической эффективности этого этапа.

Качество изделий является физической категорией, обусловленной множеством конструктивно-технологических и организационно-технических факторов, проявляемых на всех взаимосвязанных этапах жизненного цикла изделий. Основа взаимосвязи этапов жизненного цикла изделий состоит в том, что все свойства качества закладываются при проектировании, обеспечиваются в процессе изготовления и поддерживаются при эксплуатации. Такое существо взаимосвязи имеет глубокое технико-экономическое обоснование.

Первой главной задачей по обеспечению качества на этапе проектирования является выбор конструкционных материалов для деталей. При решении этой задачи, помимо обеспечения практически всех упомянутых свойств качества, выдвигаются ограничения, накладываемые последующими этапами. Основными требованиями к материалу применительно к этапу производства деталей являются обеспечение высокой обрабатываемости предполагаемыми способами получения заготовок и последующей размерной и финишной

обработки, эффективных методов упрочняющей технологии, в том числе термической обработки с целью придания требуемых свойств поверхностным слоям деталей. Аналогичные требования предъявляются и к этапу эксплуатации, а также последующего ремонта.

Вместе с тем, подавляющее число эксплуатационных свойств деталей определяется геометрическими параметрами их поверхностей и физико-химическими параметрами поверхностных слоев, которые зависят от технологии изготовления деталей и могут иметь различные значения при одних и тех же конструкционных материалах.

Особая роль при этом принадлежит поверхностям и поверхностным слоям деталей, образующим сопряжения с изменяющимися в процессе эксплуатации геометрическими и другими параметрами под воздействием рабочих нагрузок и разнообразных внешних факторов.

По существу задача идентификации эксплуатационных свойств деталей машин в конструкторско-технологической документации охватывает две проблемы: точности геометрических параметров элементов деталей и их рабочих поверхностей и физико-химических свойств поверхностных слоев деталей. Точность геометрических параметров элементов деталей является комплексным понятием, включающим точность размеров элементов деталей, их геометрических форм и взаимного расположения элементов деталей.

Под точностью геометрических параметров понимают степень соответствия действительных значений геометрических параметров их заданным значениям. Различают нормированную и действительную точность.

Нормированная точность стандартизована, характеризуется допусками и предельными отклонениями, сведенными для различных геометрических параметров деталей в качества, классы и степени точности.

Действительная погрешность для размеров элементов деталей определяется как разность между действительным и расчетным размерами. За расчетные размеры "отверстий" принимают их наименьшие предельные размеры, а для "валов" расчетными размерами являются наибольшие предельные размеры.

В государственных стандартах (ГОСТ 25346, ГОСТ 25347, ГОСТ 25348, ГОСТ 5670) для выражения точности размеров элементов деталей предусмотрены качества и классы точности. При изготовлении деталей машин преимущественное применение имеют классы точности, соответствующие 5 - 12 квалитетам для элементов деталей, образующих сопряжения с другими деталями изделия, и 13 - 17 квалитеты для свободных размеров, не обра-

зующих сопряжений, или входящих в сопряжения, к которым не предъявляют высоких требований. Классы точности размеров (точный, средний, грубый и очень грубый) используют преимущественно для свободных размеров, допуски которых, как правило, не проставляют на рабочих чертежах деталей, а указывают в технических требованиях к чертежу.

Вопрос о выборе оптимальной точности размеров элементов деталей является весьма сложной технико-экономической задачей. Назначенная точность размера элемента детали должна прежде всего обеспечить все эксплуатационные и экономические показатели работы изделия с учетом стоимости обработки деталей и сборки изделия. Для сопрягаемых размеров элементов деталей выбор точности размера в значительной степени определяется типом посадки. Например, для обеспечения точного центрирования сопрягаемых деталей должны быть использованы переходные посадки, которые наиболее эффективны при точности валов 4-7 квалитетов и точности отверстий 5-8 квалитетов.

При изготовлении неподвижных соединений (с натягом) рекомендуется точность 5-8 квалитетов. Простейший способ установления точности сопрягаемых элементов деталей, образующих сопряжения, состоит в определении предельных значений зазоров (натягов), обеспечивающих работоспособность сопряжения.

Тогда, исходя из соотношений

$$TS(TN) = S_{\max} - S_{\min}(N_{\max} - N_{\min}) = TD + Td;$$

принимая  $TD = Td = TS(TN)/2$ , определяют допуски сопрягаемых размеров, округляемые

до стандартных значений. Более точные результаты могут быть получены при расчете посадок по известным методикам. Для размеров многих элементов деталей требуемые точности могут быть рассчитаны на основе соответствующих решений размерных цепей.

Точность размеров элементов деталей при всех прочих одинаковых условиях влияет на важнейшее свойство деталей, подверженных в процессе эксплуатации изнашиванию, на их долговечность (рис. 1.2.1). В данном примере минимальный ресурс детали-штулки, изнашивающейся по внутренней поверхности, будет изменяться от  $R'_{\min}$ , соответствующего допуску Т'Д до  $R''_{\min}$  для допуска Т"Д. Долговечность деталей, изнашивающихся в процессе эксплуатации, существенно зависит от интенсивности износа, представленной на схеме углом наклона линии износа к оси абсцисс, что зависит от материала детали и применяемых методов упрочняющей технологии. Последние призваны придавать поверхностным слоям деталей такое физико-химическое состояние, при котором достигались бы требуемые эксплуатационные свойства, в том числе высокая износостойкость трущихся поверхностей.

Точность геометрических форм нормирована по ГОСТ 24642 в двух видах допусков для плоских поверхностей (допуск прямолинейности и плоскостности) и в трех видах для цилиндрических поверхностей (допуски цилиндричности, круглости и профиля продольного сечения). По каждому из видов допусков установлено по 16 степеней точности.

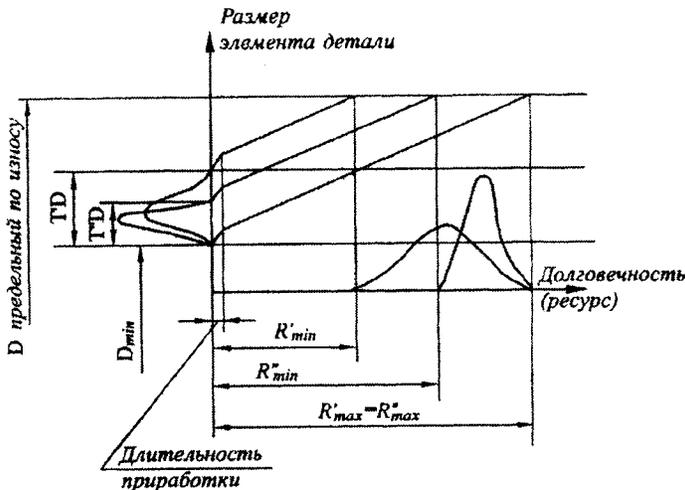


Рис. 1.2.1. Влияние точности на долговечность

Точность взаимного расположения поверхностей в ГОСТ 24643 представлена следующими допусками: параллельности, перпендикулярности, наклона, соосности, симметричности, позиционного пересечения осей, биений радиального, торцового и в заданном направлении, биения полного радиального и торцового, формы заданного профиля и заданной поверхности, по каждому из которых установлено 16 степеней точности.

Погрешности, входящие во все виды допусков формы и расположения поверхностей, возникают в процессе обработки деталей из-за неточности и износа станков и приспособлений, погрешностей установки деталей при обработке, неравномерности припусков, деформации системы и др.

Рассматриваемые погрешности формы и расположения поверхностей оказывают большое влияние на эксплуатационные свойства качества. В механизмах изделий, где используются направляющие, копиры, кулачки, различные виды передач движения из-за погрешностей формы и расположения поверхностей деталей, будет снижаться точность механизмов. Эти же погрешности в сопряжениях деталей вызовут снижение прочности, герметичности и точности центрирования; погрешности формы и расположения поверхностей деталей также снижают точность и повышают трудоемкость сборки. Выбор допусков геометрической формы и расположения поверхностей зависит от конструктивных и технологических требований. Такие допуски назначаются только в тех случаях, когда они должны быть меньше допуска размера. В отдельных случаях, когда для маложестких деталей допуски формы могут превышать допуск размера, это должно быть оговорено особо. Допуски формы и расположения поверхностей связаны с допусками размеров. В соответствии с ГОСТ 24643 в зависимости от соотношения между допуском размера и допуском формы или расположения установлены уровни относительной геометрической точности: *A* - нормальная (допуски формы или расположения составляют ~60 % допуска размера); *B* - повышенная (допуски формы или расположения составляют ~40 % допуска размера); *C* - высокая относительная геометрическая точность (допуски формы или расположения составляют 25 % допуска размера).

Существенное влияние на свойства качества деталей оказывают также геометрические параметры поверхностей, представляющие собой неровности, образованные в процессе обработки этих поверхностей при изготовлении деталей. К их числу относятся параметры шероховатости и волнистости. Шероховатость поверхности представляет сово-

купность неровностей с относительно малыми шагами образующих рельеф поверхностей. Представляя отклонения реальных поверхностей элементов деталей от идеальных в виде гаммы гармоник колебаний с высотой неровностей *H* и шагом *S*, условно принято относить их: при  $S/H < 50$  - к шероховатости поверхности, при  $S/H$  от 50 до 1000 - к волнистости поверхности и при  $S/H > 1000$  - к отклонению геометрической формы поверхности. Шероховатость относится к области микрогеометрии поверхностей; ее параметры рассматриваются на малых участках базовой длины, составляющей для различных шероховатостей поверхности от 0,01 до 25 мм. Шероховатость поверхностей образуется при различных методах размерной обработки деталей резанием как след инструмента (абразива) с наложением сопровождающих процесс резания упругой и пластической деформации металла в зоне резания, а также в связи с вибрацией в процессе обработки технологической системы. Основными параметрами шероховатости поверхностей по ГОСТ 2789 являются: среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , высота шероховатостей профиля по 10 точкам  $R_z$ , наибольшая высота шероховатостей профиля  $R_{max}$ , средний шаг шероховатостей по средней линии профиля  $S_m$ , средний шаг шероховатостей по выступам профиля  $S$ , относительная опорная длина профиля ( $t_p$ ) и типы направления шероховатостей. Выбор параметров для нормирования зависит от назначения и эксплуатационных свойств поверхности. Основным для всех поверхностей является нормирование высотных параметров. Для наиболее ответственных поверхностей высотные параметры дополняются шаговыми и относительной опорной длиной профиля. Шаговые параметры  $S_m$  и  $S$  существенно влияют на виброустойчивость и прочность при циклических нагрузках. Относительная опорная длина профиля  $t_p$  комплексно характеризует форму профиля неровностей и дает возможность расчетным путем определять действительные площади контактов трущихся поверхностей. Параметр шероховатости  $t_p$  связан с такими свойствами качества деталей как износостойкость, герметичность и контактная жесткость.

При назначении параметров шероховатости должны быть учтены реальные условия взаимодействия поверхностей деталей изделия в процессе эксплуатации, а также технологические методы обеспечения этих параметров. Для трущихся поверхностей оптимальная нормируемая шероховатость должна быть близкой к экспериментально устанавливаемой в процессе приработки. Чрезмерное повышение требований к параметрам шероховатости.

особенно высотным, может привести к нежелательным результатам. Так, при излишне гладких сопрягаемых поверхностях, особенно при однородных материалах сопряженных деталей, может возникнуть явление "схватывания". Определенные ограничения в максимальных пределах параметров связаны с допусками размера и геометрической формы элемента детали. Это важно в связи с тем, что излишне увеличенные параметры шероховатости могут привести к дополнительным отклонениям размера и формы в результате смятия и сглаживания микрошероховатостей в процессе сборки, приработки и эксплуатации. Ниже приведены рекомендуемые наибольшие допускаемые значения параметров Ra в зависимости от уровня относительной геометрической точности поверхности:

Нормальная (A):  $Ra \leq 0,05 Td$  мкм;

Повышенная (B):  $Ra \leq 0,025 Td$  мкм;

Высокая (C):  $Ra \leq 0,01 Td$  мкм;

где Td - допуск размера, мкм.

Волнистость поверхности представляет собой периодически повторяющиеся неровности поверхности с шагом намного превосходящим шаг неровностей, наблюдаемый для шероховатости. Волнистость относят к макрогеометрии поверхности. Волнистость в процессе механической обработки поверхности образуется главным образом в связи с вибрацией из-за недостаточной жесткости технологической системы. Государственного стандарта на волнистость не установлено. Параметры волнистости, установленные рекомендацией РС 3951: 1) высота волнистости  $W_z$  - среднее арифметическое из пяти значений  $W_i$ , определенных на длине участка  $L_w$ , равной не менее пяти шагам волнистости  $S_w$ ; 2) средний шаг волнистости  $S_w$ , измеренный на длине участка  $L_w$ .

Наличие указанных макро- и микронеровностей неизбежно приводит к тому, что действительные площади контактов сопряженных поверхностей намного меньше номинальных значений, обусловленных размерами этих поверхностей. В частности, действительная площадь контактов в начальный период взаимодействия поверхностей при обработке их методами точения и фрезерования не превышает 25...30 %, а иногда и меньше от расчетной. Это вызывает большие контактные давления и деформации, оказывающие значительное влияние на контактную жесткость, герметичность, надежность посадок и др.

Существенное влияние на несущую способность поверхностей деталей оказывают погрешности геометрических форм сопряженных поверхностей, по причине которых

фактически контактные площади могут быть существенно уменьшены.

Контактная жесткость и износостойкость сопряженных поверхностей деталей, при прочих равных условиях, могут изменяться в широких пределах также за счет влияния параметров шероховатости, включая типы направлений шероховатости.

Точность названных геометрических параметров оказывает существенное влияние и на параметры вибраций при эксплуатации машин с быстро вращающимися деталями, что в конечном итоге снижает их безотказность, долговечность и ухудшает санитарно-гигиенические условия (шум) работы обслуживающего персонала. Особую сложность при этом представляет нормирование, технологическое обеспечение и контроль допусков формы и расположения поверхностей для фасонных соединений, в том числе для резьбовых соединений.

Так, опыт создания быстроходных двигателей показывает, что возбуждение вибрации при их работе в значительной мере связано с допусками формы, особенно отклонений от круглости, а также от соосности опорных поверхностей валов и подшипниковых втулок.

Одной из важных проблем современной техники является технологическое обеспечение герметичности соединений поверхностей деталей изделия, образующих емкости для масла, топлива и других жидких компонентов. При эксплуатации проблема связана с безопасностью и экологической чистотой изделий.

В конструктивно-технологическом плане, помимо точности размеров сопрягаемых поверхностей деталей, проблема заключается в обеспечении оптимальных точностей форм и расположения, а также параметров шероховатости поверхностей детали.

Технологическое обеспечение оптимальных точностей формы и расположения поверхностей в большей мере, чем других геометрических параметров, зависит от способов обработки и технологических планов операций, определяющих влияние технологической наследственности, напряженного состояния поверхностного слоя, создаваемого в процессе обработки, а также от релаксации остаточных напряжений в процессе эксплуатации. Существенной проблемой являются методы и средства контроля параметров формы и расположения поверхностей.

Физико-химическое состояние поверхностных слоев является также комплексным понятием, включающим в общем случае параметры кристаллической структуры (размеры и форму зерен, текстуру, плотность дислокаций), деформационного упрочнения (степень

деформации, степень и глубина наклепа), остаточные напряжения (макронапряжения - 1-го рода, микронапряжения - 2-го рода и статистические искажения решетки - 3-го рода), экзоэлектронную эмиссию (работу и глубину выхода электронов).

Все сказанное позволяет сделать основополагающий вывод о том, что конструкторская документация, в которой закладываются все свойства качества изделий и их составных частей на этапе проектирования, должна обеспечивать максимальную возможно полную идентификацию упомянутых ранее всех свойств качества с требованиями к точности всех геометрических параметров деталей и физико-химических свойств их поверхностных слоев с учетом выбранных конструкционных материалов.

По современным взглядам эта важнейшая задача должна завершаться совместными усилиями конструкторских и технологических служб на этапе технологической подготовки производства.

Названная идентификация по существу должна составлять основную часть работы по отработке технологичности конструкции изделий. Нельзя признать конструкцию изделия (деталей) технологичной, если не обеспечены потребительские свойства качества изделий. Вместе с тем до конца разрешить эту задачу не всегда удается по причине ее чрезвычайной сложности, обусловленной непрерывным прогрессом в области технического уровня изделий.

Альтернативой достоверной идентификации конкретных эксплуатационных свойств посредством разнообразных конструктивно-технологических требований могут быть непосредственно параметры этих эксплуатационных свойств.

В качестве примеров следует указать на задания уровня отражательной способности поверхностей, теплопроводности поверхностного слоя, электропроводности, магнитных свойств, параметров долговечности и безотказной работы и др.

Требуемый уровень отражательной способности поверхности детали не может быть в большинстве случаев идентифицирован предусмотренными в ГОСТ 2789 параметрами шероховатости, поэтому для идентификации по параметрам шероховатости таких поверхностей необходимы другие параметры и соответственно средства их измерения. Такие разработки проводятся, но находятся в проектах. Вместе с тем технология обработки поверхностей с высокой отражательной способностью существует и, таким образом, вынужденным требованием, закладываемым в конструкторской и технологической документации, явля-

ется пока параметр непосредственного свойства, а именно требуемый уровень отражательной способности поверхности.

Таким образом, качество детали на этапе производства будет полностью обеспечено, если в конструкторской и технологической документации получат полное отражение все свойства качества детали, представленные как в виде требований к точности всех геометрических параметров и параметров физико-химического состояния поверхностных слоев, так и заданных непосредственно в виде параметров эксплуатационных свойств.

### 1.2.2. СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОДУКЦИИ

Основным условием эффективной системы качества является полное соответствие выпускаемой продукции требованиям потребителя к этой продукции.

Система качества должна охватывать все этапы жизненного цикла продукции он называется "петля качества" и разделен на более мелкие этапы) и разрабатываться применительно к каждому конкретному виду продукции.

Действие системы качества неразрывно связано и всецело определяется безотказной работой служб материально-технического обеспечения производства.

По характеру воздействия на этапы петли качества в системе качества три направления: обеспечение качества, управление качеством, улучшение качества.

Обеспечение качества продукции представляет собой совокупность планируемых и систематических проводимых мероприятий. Планируемые мероприятия в виде целевых научно-технических программ обеспечения качества продукции должны разрабатываться на конкретную продукцию и содержать задания по техническому уровню и качеству создаваемой продукции, требования к ресурсному обеспечению всех этапов петли качества (например, требования к оборудованию, сырью, материалам, комплекующим составным частям изделия, метрологическим средствам, производственному персоналу и т.д.), а также мероприятия на всех этапах петли качества, обеспечивающие реализацию этих требований. К систематически проводимым (постоянно или с определенной периодичностью) мероприятиям относятся работы по аттестации технологических систем, их плано-предупредительного обслуживания; то же в отношении приспособлений, рабочих и контрольно-измерительных инструментов, планового обучения персонала и т.д. Аттестация технологии рассматривается как важнейший фактор ускорения технического прогресс-

са; она преследует цели установления соответствия фактического уровня технологии лучшим отечественным и зарубежным достижениям, выявляет резервы производства и направлена на обеспечение технического прогресса, повышение эффективности производства, его механизации и автоматизации, качества выпускаемой продукции, рациональное использование производственных фондов и научно-технического потенциала.

Одним из путей повышения производительности труда и качества продукции является внедрение прогрессивной технологии, под которой понимается развитие гибкой автоматизации на основе широкого применения средств вычислительной техники (мини- и микро-ЭВМ), роботов, систем технического зрения, искусственного интеллекта в основном в виде экспертных системы на этапах разработки, производства и контроля продукции. Особое внимание при разработке и реализации всех мероприятий систем обеспечения качества должно быть уделено предупреждению различного вида отклонений организационных и конструктивно-технологических факторов, снижающих качество изготавливаемой продукции. Если же по тем или иным причинам отклонение произошло, то необходимо обеспечить обнаружение дефектной продукции и принятыми мерами гарантировать, что такая продукция не попадет к потребителю, а обнаруженные дефекты не повторятся в будущем.

Управление качеством включает постоянный контроль и анализ стабильности технологических процессов, выявление различного рода несоответствий в качестве продукции и конкретных причин, вызывающих эти несоответствия, а также целенаправленное воздействие на технологические процессы и другие причины, устраняющие обнаруженные несоответствия.

Эффективными методами управления качеством являются статистические методы регулирования разнообразными технологическими процессами, носящие предупредительный характер.

Улучшение качества представляет собой постоянную деятельность, совмещаемую с направлениями обеспечения и управления качеством, предусматривающую повышение технического уровня продукции, качества ее изготовления, совершенствование производства и самой системы качества.

На всех этапах производства, поставки и монтажа продукции в системе качества большое внимание должно быть уделено использованию методов идентификации, обеспечивающих прослеживаемость процесса формирования качества.

Если прослеживаемость четко определена требованием, то идентификация регистрируется. Регистрация данных о качестве служит подтверждением достижения требуемого качества и эффективности действия системы.

### 1.2.3. ВИДЫ ПРОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Обработка детали осуществляется на технологической системе, которая находится под воздействием многочисленных факторов.

Под воздействием рабочего процесса - съема инструментом слоя материала с заготовки - действуют силы и моменты, выделяется тепло, что приводит к качественному изменению заготовки, в том числе изменению ее размеров и формы.

Действующие факторы стремятся нарушить процесс обработки, изменить закон относительного движения заготовки и инструмента, что приводит к появлению погрешностей обработки.

Технологическая система препятствует воздействию этих факторов через свое качество (жесткость, износостойкость, теплотойкость, виброустойчивость и др.).

Большинство первичных факторов воздействуют косвенно или непосредственно через теплоту и усилия. Тепловое и силовое воздействие порождает упругие и тепловые перемещения, вибрации, изнашивание, остаточные деформации элементов технологических систем, что нарушает заданные параметры режима рабочего процесса и в итоге приводит к отклонению фактической траектории относительного движения рабочих поверхностей (рис. 1.2.2) технической системы.

Упругие перемещения элементов технологической системы делятся на упругие деформации и упругие перемещения. Первые - собственно упругие деформации деталей, изменения которых подчиняется закону Гука, включаются в упругие перемещения в качестве одного из составляющих их элементов. Упругие перемещения являются результатом перемещений и поворотов деталей вследствие наличия зазоров между ними, контактных и собственных деформаций. Упругие перемещения являются функцией действующих сил, их моментов и жесткости машин (способности машины сопротивляться возникновению упругих перемещений).

Большое влияние на характер и величину упругих перемещений элементов машины оказывает ее жесткость.

Тепловые перемещения элементов технологической системы происходят в результате нагрева технологической системы. Тепловые деформации ее элементов порождают их



Рис. 1.2.2. Схема причинно-следственных связей формирования погрешности детали

перемещения и повороты, характер которых подобен характеру упругих перемещений.

Тепловые перемещения являются функцией выделяемой теплоты и теплостойкости технологической системы, т.е. способности ее сопротивляться тепловым перемещениям.

Во время работы элементы технологической системы нагреваются неодинаково вследствие различного расположения источников тепла, их интенсивности и длительности выделения тепла. В итоге тепловое поле технологической системы отличается по температуре в разных ее точках. Неравномерность нагрева порождает различные тепловые деформации элементов системы.

Вибрации элементов технологической системы нарушают заданное их относительное положение и тем самым нарушают заданный закон относительного движения заготовки и инструмента. В технологической системе действуют свободные, вынужденные колебания и автоколебания.

Возникновение в механической системе колебаний следует рассматривать с учетом взаимодействия ее элементов. Возникшие колебания одной детали в машине обязательно будут передаваться на другие, претерпевая определенную трансформацию.

Изнашивание элементов технологической системы сопровождается постепенным изменением их размеров и формы, что нарушает размерные связи в технологической системе, порождает отклонения относительного положения и движения рабочих органов технологической системы. Это касается прежде всего режущего инструмента. Интенсивно изнашиваются также направляющие станины станка. Особенно это ярко проявляется в условиях крупносерийного и массового производства, когда на станке обрабатывается одна и та же деталь в большом количестве. В этом случае перемещение суппорта или шпиндельной бабки происходит на одном и том же

участке направляющих, которые в этом месте интенсивно изнашиваются.

В результате износа поверхностей деталей технологической системы последняя теряет свою точность, вызывая тем самым погрешность обработки.

**Деформация деталей вследствие перераспределения остаточных напряжений.** В тех случаях, когда остаточные напряжения взаимно уравновешены, их наличие не проявляется. Нарушение равновесия приводит к перераспределению остаточных напряжений и соответственно к деформациям детали.

Характер и уровень возникающих напряжений зависит от материала детали, ее конфигурации, методов механической обработки, термической обработки, методов сборки и др.

Наибольшие остаточные напряжения образуются в деталях сложных конструктивных форм с резкими переходами от местных скоплений металла к тонким стенкам, ребрам. Примерами таких деталей могут служить станины, рамы, корпусные детали и другие.

Все разновидности математических моделей, описывающих механизм образования погрешностей обработки, можно свести к двум видам: детерминированные и вероятностно-статистические.

Наиболее высокую точность детерминированных моделей удается получить при их построении на основе метода координатных систем с деформируемыми связями.

Сущность координатного метода заключается в том, что на деталях, вошедших в размерную цепь, строят прямоугольные системы координат с указанием расположения опорных точек и включением действующих факторов. В основу построения математической модели положена схема причинно-следственных связей (рис. 1.2.3).



Рис. 1.2.3. Схема причинно-следственных связей механизма образования погрешностей обработки

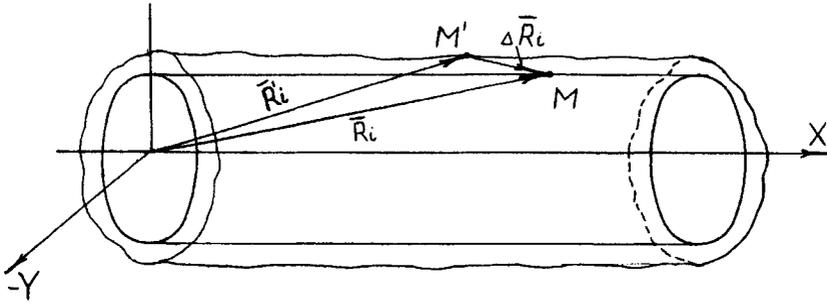


Рис. 1.2.4. Схема образования погрешностей обработки в точке  $M$ :  
 $M$  - расчетное положение точки  $M$  на поверхности детали, заданной чертежом;  
 $M'$  - положение точки  $M$  на реальной поверхности детали

Построение таких моделей осуществляется следующим образом.

Постановка задачи. В качестве погрешности обработки детали принимается отклонение  $\Delta \bar{R}_i$  фактического радиус-вектора  $\bar{R}_i^\Phi$  в  $i$ -ой точке обработанной поверхности (рис. 1.2.4) от заданного  $\bar{R}_i$ , отсчитанное в  $j$ -й момент времени обработки в системе координат, построенной на технологических базах детали, т.е.

$$\Delta \bar{R}_i = \bar{R}_i^\Phi - \bar{R}_i.$$

Построение эквивалентной схемы технологической системы. При обработке на станке заготовка включается в размерные и кинематические цепи технологической системы. Замыкающим звеном размерной цепи является  $\bar{R}^\Phi$ . Чтобы учесть влияние изменений составляющих звеньев размерной цепи на погрешность обработки  $\Delta \bar{R}$ , надо в соответствии с методом координатных систем с деформирующимися связями построить системы прямоугольных координат на основных базах деталей, размеры которых вошли в размерную цепь. Затем следует наложить связи на каждую деталь в виде опорных точек в соответствии с количеством лишенных степеней свободы. В итоге получаем эквивалентную схему в виде совокупности прямоугольных систем координат (рис. 1.2.5).

Ниже дан вывод уравнения относительного движения режущего инструмента и заготовки. Чтобы определить погрешность обработки  $\Delta \bar{R}_i$  в  $i$ -й точке поверхности обработанной детали, следует решить уравнение

относительного движения режущих кромок инструмента и технологических баз.

Запишем уравнение на примере токарной обработки. Пусть резец совершает поступательное движение, а заготовка вращается. Тогда в неподвижной координатной системе  $\Sigma_3$  заготовки резец будет совершать винтовое движение. Задача сводится к тому, чтобы определить  $\bar{R}$  в любой момент обработки.

Уравнение движения вершины инструмента точки  $M$  в системе  $\Sigma_3$  будет иметь вид

$$\begin{cases} X_3 = f_1(x_i, y_i, z_i, t); \\ Y_3 = f_2(x_i, y_i, z_i, t); \\ Z_3 = f_3(x_i, y_i, z_i, t), \end{cases}$$

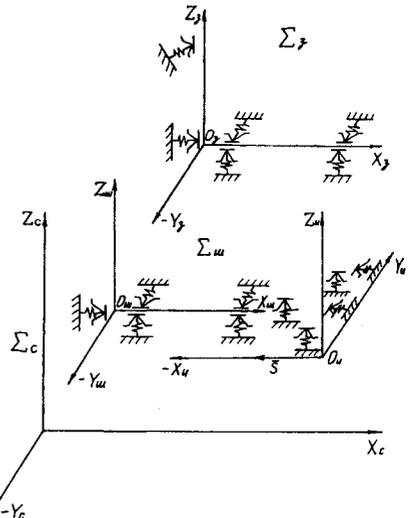


Рис. 1.2.5. Эквивалентная схема технологической системы

где  $X_3, Y_3, Z_3$  - координаты точки  $M$  в координатной системе  $\sum_3$  заготовки;  $X_n, Y_n, Z_n$  - координаты точки  $M$  в координатной системе  $\sum_n$  резца;  $t$  - параметр движения (время, угол поворота и др.).

Чтобы уравнение движения отражало перемещение и повороты каждой координатной системы эквивалентной схемы в неподвижной системе  $\sum_c$ , необходимо в его правую часть ввести три расстояния и три угла поворота, определяющие положение каждой координатной системы через

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}; \quad M = M(x, \varphi) \cdot M(y, \psi) \cdot M(z, \theta).$$

Пользуясь формулами перехода из одной координатной системы в другую, находят последовательно положение точки  $M$  в координатных системах эквивалентной схемы. Тогда уравнение движения точки  $M$  в координатной системе заготовки будет представлять собой  $\vec{R}$  как функцию радиус-векторов ( $\vec{r}$ ) и матриц поворотов ( $M$ ) каждой координатной системы, вошедшей в эквивалентную схему.

Включение в уравнение движения факторов, порождающих погрешности обработки. Действующие факторы вызывают малые перемещения, повороты и деформации деталей технологической системы, вследствие чего изменяются размеры составляющих звеньев размерной цепи, замыкающим звеном которой является  $\vec{R}$ .

Каждую неподвижную деталь можно представить в соответствии со схемой базирования, лежащей на шести опорных точках, лишаящих деталь шести степеней свободы.

Чтобы описать влияние того или иного фактора на погрешность обработки, нужно записать перемещения опорных точек как результат его воздействия. В свою очередь перемещения опорных точек вызовут соответствующие перемещения и повороты детали.

Подставив в уравнение движения вместо перемещений опорных точек их функции и введя ограничения на переменные в правой части уравнения, получим математическую модель механизма образования геометрических погрешностей.

С помощью вероятностно-статистических моделей решаются различного рода задачи проектирования, изготовления и контроля изделий, в частности, при расчетах и исследованиях точности процессов и оборудования, суммарных погрешностей изготовле-

ния изделий, размерных цепей, а также обработке и выборе статистических методов контроля качества изделий.

#### 1.2.4. ВЕРоятНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

Вероятностно-статистический метод позволяет достоверно оценить точность различных методов обработки в условиях серийного и массового производств. Данный метод универсален. Его можно применять для определения точности обработки, сборки, контрольных и других операций. Однако он не раскрывает сущность физических явлений и факторов, определяющих точность обработки.

**Законы распределения погрешностей размеров.** При обработке партии заготовок на настроенном станке в результате действия большого числа различных факторов происходит рассеяние размеров в пределах заданного поля допуска. При различных условиях обработки заготовок рассеивание их действительных размеров подчиняется различным законам распределения. В технологии машиностроения наиболее часто встречаются следующие законы распределения (табл. 1.2.1):

1) закон нормального распределения (закон Гаусса); ему подчиняются погрешности размеров заготовок, обработанных на настроенных станках, на которые оказывает влияние большое число случайных факторов, каждый из которых не является доминирующим и играет относительно малую роль в общей совокупности; нормальное распределение является предельным законом, к которому при определенных условиях приближаются многие другие законы;

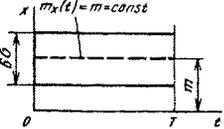
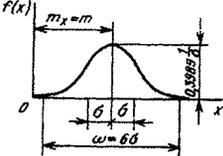
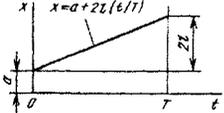
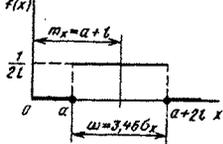
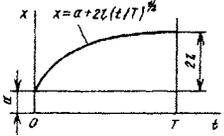
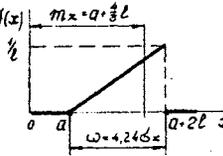
2) закон равной вероятности наблюдается в том числе, если на погрешность размеров оказывает влияние один доминирующий фактор, равномерно изменяющийся во времени (например, равномерный износ режущего инструмента);

3) закон равномерно возрастающей вероятности характеризует распределение погрешностей размеров, на которые влияет один доминирующий фактор, например, износ режущего инструмента, замедленно изменяющийся во времени;

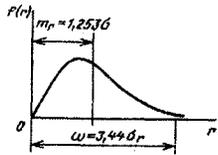
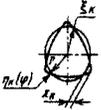
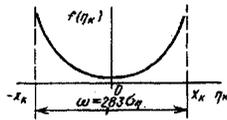
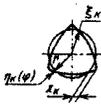
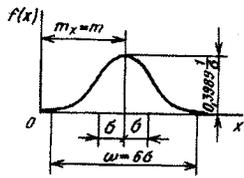
4) закон Симпсона (равнобедренного треугольника) применяется для описания погрешности размеров заготовок, на которые оказывает влияние один доминирующий фактор с переменным характером изменения во времени, сначала замедленным, а затем ускоренным (износ режущего инструмента);

5) композиционный закон Гаусса и равной вероятности наблюдается в тех случаях, когда наряду со множеством случайных факторов, дающих в совокупности нормальный закон, на погрешность размеров оказывает влияние систематический доминирующий фактор, равномерно изменяющийся во времени;

## 1.2.1. Законы распределения погрешностей размеров

Закон распределения	Характер изменения доминирующего фактора	Кривая плотности вероятности	Уравнение плотности вероятности	Среднее значение $m_x$ , и среднее квадратическое отклонение $\sigma_x$	Поле рассеяния $\omega$ и значения коэффициентов $k$ и $\alpha$
1. Нормальный (закон Гаусса)			$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right]$ <p><math>m</math> и <math>\sigma</math> - параметры</p>	$m_x = m$ $\sigma_x = \sigma$	$\omega = 6\sigma;$ $k = 1;$ $\alpha = 0$
2. Равной вероятности			$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2l} & \text{при } a < x < a+2l; \\ 0 & \text{при } x < a; x > a+2l, \end{cases}$ <p><math>a</math> и <math>l</math> - параметры</p>	$m_x = a + l$ $\sigma_x = \frac{l}{\sqrt{3}}$	$\omega = 2\sqrt{3}\sigma_x;$ $k = 1,73;$ $\alpha = 0$
3. Равномерно возрастающей вероятности			$f(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{2l^2} & \text{при } a < x < a+2l; \\ 0 & \text{при } x < a; x > a+2l, \end{cases}$ <p><math>a</math> и <math>l</math> - параметры</p>	$m_x = a + \frac{4}{3}l;$ $\sigma_x = \frac{\sqrt{2} \cdot l}{\sqrt{3}}$	$\omega = 3\sqrt{2}\sigma_x;$ $k = 1,41;$ $\alpha = 0,33$

<p>4. Симпсона</p>			$f(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{2l} & \text{при } a < x < a+l; \\ \frac{a+2l-x}{l^2} & \text{при } a+l < x < a+2l, \\ 0 & \text{при } x < a; x > a+2l, \end{cases}$ <p><math>a</math> и <math>l</math> - параметры</p>	$m_x = a + l;$ $\sigma_x = \frac{l}{\sqrt{6}}$	$\omega = 2\sqrt{6}\sigma_x;$ $k = 1,22;$ $\alpha = 0$
<p>5. Композиционный закон Гаусса и равной вероятности</p>			$f(x) = \frac{1}{2\sigma\lambda_m} \left[ \Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x-m-2\sigma\lambda_m}{\sigma}\right) \right]$ <p><math>m, \sigma, \lambda_m</math> - параметры; <math>\lambda_m = l_m/\sigma</math></p>	$m_x = m + \lambda_m\sigma$ $\sigma_x = \sigma\sqrt{1 + \frac{1}{3}\lambda_m^2}$	$\lambda_m \dots 3 \quad 6$ $\frac{\omega}{\sigma_x} \dots 5,02 \quad 4,30 \quad 3,94$ $k \dots 1,20 \quad 1,40 \quad 1,52$ $\alpha = 0$
<p>6. Композиционный закон Гаусса и равномерно возрастающей вероятности</p>			$f(x) = \frac{1}{2\sigma\lambda_m^2} \left\{ f\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) - f\left(\frac{x-m-2\sigma\lambda_m}{\sigma}\right) + \frac{x-m}{\sigma} \left[ \Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x-m-2\sigma\lambda_m}{\sigma}\right) \right] \right\}$ <p><math>m, \sigma, \lambda_m</math> - параметры;</p> $\lambda_m = l_m/\sigma$	$m_x = m + \frac{4}{3}\lambda_m\sigma$ $\sigma_x = \sigma\sqrt{1 + \frac{2}{9}\lambda_m^2}$	$\lambda_m \dots 3 \quad 6 \quad 10$ $\frac{\omega}{\sigma_x} \dots 5,45 \quad 4,85 \quad 4,52$ $k \dots 1,10 \quad 1,24 \quad 1,33$ $\alpha \dots 0,10 \quad 0,17 \quad 0,22$

<p>7. Закон Релея</p>	 <p><math>r</math> - величина эксцентриситета или биения</p> $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ <p>где <math>x</math> и <math>y</math> - случайные величины, распределенные по Гауссу с параметрами:  <math>m_x = m_y = 0; \sigma_x = \sigma_y = \sigma</math></p>		$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, r \geq 0;$ <p><math>\sigma</math> - параметр</p>	<p><math>m_r = 1,253\sigma</math>  <math>\sigma_r = 0,655\sigma</math></p>	<p><math>\omega = 3,44\sigma_r</math>  <math>k = 0,097</math>  <math>\alpha = -0,329</math></p>
<p>8. Закон арксинуса</p>	 <p><math>\eta_k(\varphi)</math> - случайная функция, характеризующая овальность и огранку</p> $\eta_k(\varphi) = x_k \cos \kappa(\kappa\varphi + \varphi_k)$ <p>(<math>\kappa = 2, 3, \dots, p</math>)</p> <p>где <math>x_k</math> и <math>\varphi_k</math> - амплитуда и фаза отклонения от круглости</p>		$f(\eta_k) = \frac{1}{\pi \sqrt{x_k^2 - \eta_k^2}}, -x_k < \eta_k < x_k;$ <p>0, <math>\eta_k &lt; x_k; \eta_k &gt; x_k;</math></p> <p><math>x_k</math> - параметр</p>	<p><math>m_{\eta_k} = 0</math>  <math>\sigma_{\eta_k} = \frac{x_k}{\sqrt{2}}</math></p>	<p><math>\omega = 2,83\sigma_{\eta_k}</math>  <math>k = 2,12</math>  <math>\alpha = 0</math></p>
<p>9. Композиционный закон Гаусса и арксинуса</p>	 <p><math>\epsilon_k(\varphi)</math> - случайная функция, характеризующая суммарную погрешность размеров и формы в поперечном сечении</p> $\epsilon_k(\varphi) = r + \eta_k(\varphi) = r + x_k \cos(\kappa\varphi + \varphi_k)$ <p>где <math>r</math> и <math>\eta_k(\varphi)</math> - случайные величины, распределенные по законам Гаусса и арксинуса</p>		$f(\epsilon_k) = \frac{1}{\pi \sigma_r \sqrt{2\pi}} \times \int_0^\pi \exp \left\{ -\frac{[\lambda_k \sigma_r \cos \alpha - (\epsilon_k - m_r)]^2}{2\sigma_r^2} \right\} d\alpha$ <p><math>\lambda_k = \frac{x_k}{\sigma_r}, \sigma_r, m_r</math> - параметры</p>	<p><math>m_{\epsilon_k} = m_r</math>  <math>\sigma_{\epsilon_k} = \sqrt{\sigma_r^2 + \frac{x_k^2}{2}}</math></p>	<p><math>\lambda_m \dots 2 \quad 6 \quad 10</math>  <math>\frac{\omega}{\sigma_{\epsilon_k}} \dots 5,10 \quad 3,80 \quad 3,40</math>  <math>k \dots 1,18 \quad 1,58 \quad 1,76</math></p>

б) композиционный закон Гаусса и равномерно возрастающей вероятности наблюдается в тех случаях, когда наряду со множеством случайных факторов, дающих в совокупности нормальный закон, на погрешность размеров оказывает влияние систематический доминирующий фактор, замедленно изменяющийся во времени (износ режущего инструмента);

7) закон Релея; ему подчиняются случайные погрешности, принимающие только неотрицательные значения: радиальное биение двух номинально соосных цилиндрических поверхностей; отклонение от параллельности двух плоскостей; отклонение от перпендикулярности двух плоскостей или оси к плоскости; овальность, огранка, конусообразность и др.;

8) закон арксинуса является характерным для таких случайных погрешностей как овальность, огранка с трех-, четырех- и многовершинным профилем, на которые оказывают влияние две независимые группы факторов; первая группа вызывает рассеяние фазового угла  $\psi_k$ , вторая - приводит к неслучайной величине амплитуды  $x_k$  отклонения от круглости;

9) композиционный закон Гаусса и арксинуса характеризует распределение суммарной погрешности размеров с учетом дифференцированных отклонений формы в поперечном сечении деталей типа тел вращения.

**Оценка точности процесса.** Поле рассеяния размеров для нормального закона распределения при обработке партии заготовок ограничено величиной  $\omega = 6\sigma / K$ , где  $K$  - коэффициент относительного рассеяния распределения погрешностей размеров. Для оценки точности процесса необходимо сравнить фактическое поле рассеяния  $\omega$  с полем допуска  $T$  на размер детали. Точность процесса считается достаточной или избыточной, если удовлетворяется неравенство  $\omega \leq T$ . Для сравнительной оценки точности операций вводится коэффициент точности  $K_T = 6\sigma / (KT) = \omega / T$ . При условии правильной настройки станка обработка заготовок может осуществляться без брака, если  $K_T \leq 1,0$ . При  $K_T > 1,0$  весьма вероятно появление бракованных заготовок.

**Оценка точности настройки станка.** Появление брака возможно и при избыточной точности процесса ( $K_T \leq 1$ ), если настройка станка была выполнена с погрешностью, величина которой превышала допустимое значение. Для оценки точности настройки станка пользуются коэффициентом точности настройки

$$K_H = \frac{|E|}{T} = \frac{|\bar{x} - \Delta_0|}{T},$$

где  $E$  - смещение центра группирования относительно середины поля допуска  $\Delta_0 = (x_{\max} + x_{\min})/2$ .

Настройка считается точной, если  $K_H \leq K_{H,д}$ , где  $K_{H,д}$  - допустимое значение коэффициента точности настройки

$$K_{H,д} = \frac{T - \omega}{T} = 1 - K_T.$$

Таким образом, условия работы без брака определяются неравенствами:  $K_T \leq 1$ ;  $K_H \leq K_{H,д}$ . Если одно из этих условий не выполняется, неизбежно появляется брак. Вероятный процент брака заготовок при распределении погрешностей по нормальному закону

$$q = \left[ 0,5 - \Phi \left( \frac{0,5T - E}{\sigma} \right) \right] \cdot 100\%,$$

где  $\Phi(t)$  - функция Лапласа.

**Оценка стабильности технологического процесса.** Под стабильностью процесса понимают постоянство во времени его точностных характеристик: среднего значения  $\bar{x}$  и эмпирического среднего квадратического отклонения  $S$  размеров партии обработанных заготовок.

Непостоянство параметра  $\bar{x}$  свидетельствует о смещении центра настройки во времени, обусловленное влиянием систематических факторов; непостоянство параметра  $S$  свидетельствует об изменении рассеяния размеров заготовок вследствие действия множества случайных факторов, изменяющихся с течением времени.

Для оценки стабильности процессов обработки со станка берутся в разное время выборки заготовок, вычисляются их характеристики  $\bar{x}_1, S_1; \bar{x}_2, S_2; \dots$  и сравниваются между собой. Если расхождение между ними случайно, несущественно, то можно сделать вывод, что центр рассеяния размеров  $\bar{x}$  не смещается и величина среднего квадратического отклонения  $S$  не изменяется во времени, т.е. процесс является стабильным. Сравнение выборочных средних проводится с помощью критерия Стьюдента, а сравнение выборочных средних квадратических отклонений  $S$  - с помощью критерия Фишера.

#### 1.2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Суммарная погрешность является результатом возникновения при обработке систематических и случайных погрешностей, вызванных многочисленными факторами, рассматриваемыми в п. 1.2.3.

Различают систематические постоянные



Пользуясь этой зависимостью, определяют суммарную погрешность обработки партии заготовок на настроенных станках для линейных размеров

$$\Delta_{\Sigma} = \sum \Delta_{\text{ст}} + \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{(K_1 \Delta_{\Sigma y})^2 + (K_2 \Delta_y)^2 + (K_3 \Delta_n)^2 + (K_4 \Delta_{\text{и}})^2 + (K_5 \Sigma \Delta_{\text{т}})^2},$$

где  $\Delta_{\Sigma y}$  - погрешность установки заготовок в приспособлении, включающая погрешность базирования, погрешность закрепления, точность изготовления и износ приспособления;  $\Delta_y$  - погрешность из-за упругих деформаций технологической системы под действием неустойчивости силы резания;  $\Delta_n$  - погрешность настройки станка на заданный размер;  $\Delta_{\text{и}}$  - погрешность от размерного износа режущего инструмента;  $\Sigma \Delta_{\text{ст}}$  - погрешность, возникающая вследствие геометрических неточностей станка;  $\Sigma \Delta_{\text{т}}$  - погрешности из-за температурных деформаций элементов технологической системы.

После определения суммарной погрешности проверяется возможность обработки без брака  $\Delta_{\Sigma} \leq T_d$ , где  $T_d$  - допуск на операционный размер. В случае несоблюдения этого условия необходимо предложить конкретные мероприятия по сокращению  $\Delta_{\Sigma}$ .

Доля первичных погрешностей в их общем балансе (суммарной погрешности) непостоянна и зависит от выполняемой операции (предварительной или окончательной), метода обработки, типа и состояния станка, его жесткости и других факторов. Так, например, при предварительной обработке погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы составляют 30 %, размерным износом режущего инструмента - 10 ... 20 %, неточностью настройки станка - 20 ... 30 %, геометрическими неточностями станка - 10 ... 30 %, температурными деформациями технологической системы - 10 ... 15 %, неточностью установки заготовок - 20 ... 30 %, остаточными напряжениями при обработке тонкостенных и маложестких заготовок - 40 %.

Заданная точность обработки может быть обеспечена различными технологическими методами. Каждому методу обработки соответствует определенный диапазон уровней точности размеров, степеней точности формы и расположения поверхностей. Для предварительных переходов обработки это в первую очередь связано с точностью исходной заготовки, для чистовых - с точностью выполнения предшествующих переходов обработки и с условиями осуществления данного

перехода. Точность на каждом последующем переходе обработки поверхностей обычно повышается на черновых переходах на один - три квалитета или одну - три степени точности, на чистовых - на один - два квалитета или одну - две степени точности формы обрабатываемой поверхности.

Точность обработки наружных и внутренних поверхностей вращения, плоских поверхностей при различных методах обработки приведены в табл. 1.2.2 и 1.2.3. Таблицы содержат ориентировочные данные по точности обработки, полученные систематизацией непосредственных наблюдений в производственных условиях. Приведенные в таблицах данные относятся к деталям из стали. Для деталей из чугуна или цветных сплавов размеры обрабатываемых поверхностей можно принимать на один квалитет, а отклонения формы и расположения поверхностей - на одну степень выше. Квалитеты и степень точности формы действительны для поверхностей тел вращения с  $l/d < 2$ . При  $l/d < 2 + 10$ ; допуски можно принимать соответственно на один - два квалитета и одну - две степени точности формы грубее. Степени точности формы и расположения поверхностей указаны для уровней *C-B-A* (*C* - высокий, *B* - повышенный и *A* - нормальный) относительной геометрической точности.

#### 1.2.6. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ

Все способы повышения точности обработки можно сгруппировать по трем направлениям: повышение качества технологической системы, подавление действующих факторов, управление ходом технологического процесса.

Повышение качества технологической системы осуществляют повышением ее жесткости, геометрической точности, износостойкости, теплостойкости, виброустойчивости.

Повышение жесткости технологической системы можно достичь сокращением числа стыков и звеньев в размерных и кинематических цепях, увеличением жесткости, созданием предварительного натяга, введением дополнительных опор при обработке нежесткой заготовки.

Повышение геометрической точности технологической системы осуществляют, устраняя или сведя к минимуму неопределенность базирования заготовки посредством создания баз, отвечающих правилам базирования, соблюдением правил приложения силового замыкания. Технологическими методами решение этой задачи возможно главным образом в результате повышения точности установки сменных элементов технологической системы.

Повышение виброустойчивости системы достигается увеличением жесткости конструкций сменных элементов. Увеличение жесткости повышает частоту колебаний, что, как правило, связано с уменьшением амплитуды

колебаний.

Эффективным средством повышения виброустойчивости системы является также обеспечение определенности базирования сменных элементов.

### 1.2.2. Точность обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей

Метод обработки	Квалитет допуска размера при обработке	Степень точности формы и расположения поверхностей по ГОСТ 24643-60
<b>Наружные поверхности вращения</b>		
<b>Обтачивание:</b>		
черновое	14	11-12-13
то же	13	10-11-12
-"-	12	9-10-11
получистовое	13	10-11-12
то же	12	9-10-11
-"-	11	8-9-10
чистовое	10	7-8-9
то же	9	6-7-8
-"-	8	5-6-7
тонкое	7	4-5-6
(алмазное)	6	3-4-5
<b>Шлифование:</b>		
предварительное	10	7-8-9
то же	9	6-7-8
-"-	8	5-6-7
чистовое	8	5-6-7
то же	7	4-5-6
-"-	6	3-4-6
тонкое	5	2-3-4
<b>Притирка, суперфиниширование</b>	5	2-3-4
	4	1-2-3
<b>Обкатывание</b>	10	7-8-9
	9	6-7-8
	8	5-6-7
<b>Алмазное выглаживание</b>	7	4-5-6
	6	3-4-5
	5	2-3-4
<b>Внутренние поверхности вращения</b>		
<b>Сверление и рассверливание</b>	14	11-12-13
	13	10-11-12
	12	9-10-11
	11	8-9-10
<b>Зенкерование:</b>		
черновое	14	11-12-13
то же	13	10-11-12
-"-	12	9-10-11
чистовое	11	8-9-10
то же	10	7-8-9
<b>Развертывание:</b>		
черновое	11	8-9-10
то же	10	7-8-9
чистовое	9	6-7-8
то же	8	5-6-7
-"-	7	4-5-6
тонкое	6	3-4-5
то же	5	2-3-4

Продолжение табл. 1.2.2.

Метод обработки	Квалитет допуска размера при обработке	Степень точности формы и расположения поверхностей по ГОСТ 24643-60
<b>Протягивание:</b>		
черновое	11	8-9-10
то же	10	7-8-9
чистовое	9	6-7-8
то же	8	5-6-7
-''-	7	4-5-6
-''-	6	3-4-5
<b>Растачивание:</b>		
черновое	14	11-12-13
то же	13	10-11-12
-''-	12	9-10-11
получистовое	13	10-11-12
то же	12	9-10-11
-''-	11	8-9-10
чистовое	10	7-8-9
то же	9	6-7-8
-''-	8	5-6-7
тонкое (алмазное)	7	4-5-6
то же	6	3-4-5
<b>Шлифование:</b>		
предварительное	10	7-8-9
то же	9	6-7-8
-''-	8	5-6-7
чистовое	7	4-5-6
то же	6	3-4-5
тонкое	5	2-3-4
<b>Пригирка,</b>	5	2-3-4
<b>хонингование</b>	4	1-2-3
	10	7-8-9
<b>Раскатывание</b>	9	6-7-8
	8	5-6-7
	8	5-6-7
<b>Калибрование</b>	7	4-5-6
	6	3-4-5
<b>Алмазное выглаживание</b>	6	3-4-5
	5	2-3-4

## 1.2.3. Точность обработки плоских поверхностей

Метод обработки	Квалитет допуска размера при обработке	Степень точности формы и расположения поверхностей по ГОСТ 24643-60
<b>Торцовое фрезерование:</b>		
черновое	14	11-12-13
то же	13	10-11-12
-"-	12	9-10-11
чистовое	12	9-10-11
то же	11	8-9-10
-"-	10	7-8-9
тонкое	9	6-7-8
	8	5-6-7
	7	4-5-6
<b>Цилиндрическое фрезерование:</b>		
черновое	14	11-12-13
то же	13	10-11-12
-"-	12	9-10-11
чистовое	12	9-10-11
то же	11	8-9-10
-"-	10	7-8-9
тонкое	9	6-7-8
то же	8	5-6-7
<b>Строгание и долбление:</b>		
черновое	14	10-11-12
то же	13	10-11-12
-"-	12	9-10-11
чистовое	13	10-11-12
то же	12	9-10-11
-"-	11	8-9-10
тонкое	10	7-8-9
то же	9	6-7-8
-"-	8	5-6-7
<b>Торцовое точение:</b>		
черновое	15	11-12-13
то же	14	11-12-13
чистовое	13	10-11-12
то же	12	9-10-11
-"-	11	8-9-10
тонкое	10	7-8-9
то же	9	6-7-8
-"-	8	5-6-7
<b>Протягивание:</b>		
черновое	9	6-7-8
то же	8	5-6-7
чистовое	7	4-5-6
то же	6	3-4-5
<b>Шлифование:</b>		
предварительное	11	8-9-10
то же	10	7-8-9
-"-	9	6-7-8
чистовое	8	5-6-7
то же	7	4-5-6
-"-	6	3-4-5
тонкое	6	3-4-5
то же	5	2-3-4
<b>Притирка:</b>		
чистовая	7	4-5-6
то же	6	3-4-5
тонкая	5	2-3-4

Повышение износостойкости системы осуществляют увеличением износостойкости сменных элементов технологической системы, использованием высококачественного материала в первую очередь для режущего инструмента, а также накладных направляющих, предварительным притуплением режущего инструмента, повышением виброустойчивости системы и качества изготовления режущего инструмента.

Повышение теплостойкости технологической системы создают сокращением вылета режущего инструмента, увеличением его поперечного сечения, увеличением толщины твердосплавной пластины, закреплением обрабатываемых деталей с возможностью компенсации их тепловых деформаций, например, с помощью пружинных гидравлических элементов и др.

Подавление действующих факторов связано с воздействием на причины, вызывающие эти факторы, и непосредственным их снижением.

Сокращение упругих перемещений осуществляют уменьшением действующих сил и моментов за счет снижения режимов резания, неуравновешенности вращающихся частей технологической системы, применением много-инструментной обработки, обеспечивающей встречное действие сил резания и др.

Снижение тепловых перемещений осуществляется посредством применения смазочно-охлаждающей жидкости, предварительного нагрева технологической системы, стабилизации температуры в помещении, выравнивания температуры в технологической системе, повышения скорости резания, обеспечения ритмичности работы технологической системы и др.

Уменьшение вибрации осуществляется снижением возбуждающих факторов путем балансировки быстровращающихся частей технологической системы, применением виброопор, подбором режимов резания, позволяющих избегать резонанса. Другой способ - подавление вибрации применением виброгасителей.

Снижение износа элементов технологической системы достигается снижением режимов резания, уменьшением вибрации, стабилизацией действующих сил, применением смазочно-охлаждающей жидкости.

Сущность процесса управления технологическим процессом заключается в получении информации об управляемой величине, переработке полученной информации и внесении соответствующих коррективов в ход технологического процесса. Управление процессом можно осуществлять по выходным данным, по показателям, характеризующим

ход технологического процесса, и по входным данным. Качество управления обусловлено точностью получаемой информации, точностью определения необходимой поправки и скоростью внесения этой поправки.

Управление по выходным данным широко применяют на практике. Компенсация погрешности обработки этим способом (этот способ называют активным контролем) осуществляется, как правило, периодически в момент, когда действия систематических факторов приближат погрешность обработки к границе поля допуска. Чтобы определить этот момент, применяют контроль и строят точечные диаграммы.

Преимуществом управления по выходным данным является простота определения поправки, которую необходимо внести для компенсации погрешности обработки, а недостатком - запаздывание в получении информации, так как измеряют деталь после обработки.

Показателями хода технологического процесса являются действующие силы, крутящий момент, температура, упругие перемещения, вибрация и др. С целью управления процессом технологическую систему оснащают различными чувствительными элементами для измерения одного или нескольких вышеуказанных показателей, преобразующими и сравнивающими устройствами, исполнительными механизмами, с помощью которых вносят соответствующие поправки в технологический процесс.

В совокупности все эти устройства образуют систему автоматического управления.

Измеренные величины сравнивают с заданными и в случае их различия вносят соответствующие поправки в технологический процесс.

При этом поправки вносятся в те параметры, которые находятся в функциональной связи с измеряемой величиной, например, при измерении силы могут изменять подачу, геометрию инструмента и др.

Управление по параметрам, характеризующим ход технологического процесса, позволяет компенсировать погрешность в момент ее возникновения.

Управление по входным данным основывается, главным образом, на управлении по программе, что позволяет компенсировать влияние на погрешность обработки систематических факторов, в первую очередь - геометрическую неточность станка. Устройства для этой цели получили название коррекционных устройств.

Преимуществом управления по входным данным является то, что информация поступает с опережением, т.е. до обработки детали,

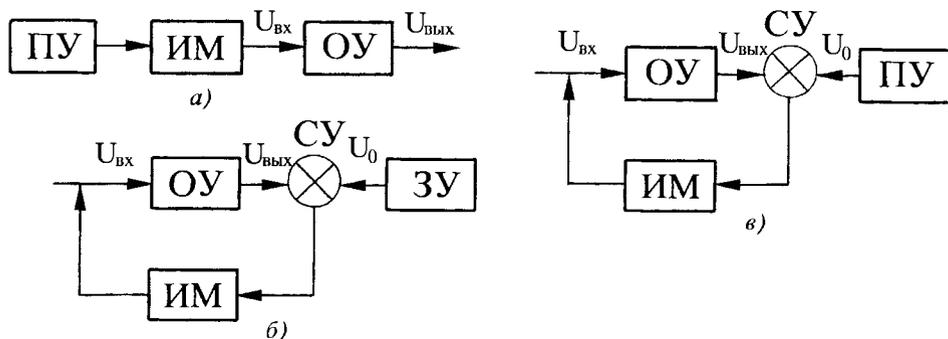


Рис. 1.2.7. Схемы управления процессом достижения заданной точности обработки: а - по программе; б - с обратной связью; в - комбинированным методом

недостатком - необходимость в очень точном математическом описании механизма влияния входных данных на погрешности обработки с тем, чтобы правильно рассчитать поправку.

Управление по каждому из способов осуществляется по той или иной схеме, приведенной на рис.1.2.7.

Для достижения заданной точности обработки необходимо осуществить соответствующую настройку технологической системы. Различают статическую и динамическую настройки технологической системы.

Задача статической настройки технологической системы - достижение заданного относительно положения и траектории движения рабочих поверхностей технологической системы без рабочих нагрузок.

Задача динамической настройки технологической системы - достижение заданного относительно положения и траектории движения рабочих поверхностей технологической системы при рабочих нагрузках.

Задачами настройки являются, во-первых, достижение заданной точности изготавливаемых деталей, во-вторых, получение возможно большего числа деталей без поднастройки.

Для решения этих задач необходимо, чтобы "мгновенное" поле рассеяния погрешности обработки не превышало допуск на обработку и занимало определенное положение в пределах поля допуска. Размер, к достижению которого надо стремиться при настройке технологической системы, получил название рабочего настроечного размера

$$A_p = A_c + A_d,$$

где  $A_c$  - размер статической настройки;  $A_d$  - размер динамической настройки.

Настройку станка на заданный размер осуществляют тремя методами: 1) по результатам обработки пробных заготовок; 2) по эта-

лону; 3) по методу взаимозаменяемых настроек. Первый метод заключается в том, что после обработки пробной заготовки измеряют получаемый размер и по результатам измерения корректируют положение режущего инструмента до тех пор, пока получаемый размер не будет находиться в пределах поля допуска на настройку. Этот метод обеспечивает высокую точность обработки (7-10-й класс), но трудоемок и применяется при обработке небольших заготовок на универсальных станках. Второй метод основан на достижении настроечного размера путем контакта режущей части инструмента с эталоном, размеры которого заранее рассчитаны с учетом выполнения конкретной операции в нерабочем состоянии станка. Этот метод является менее точным, чем первый, но обеспечивает значительное сокращение времени настройки и эффективен для многоинструментных станков при черновой и получистовой обработке заготовок. Третий метод состоит в том, что для закрепления режущего инструмента создаются державки и многорезцовые блоки, которые позволяют регулировать положение режущего инструмента и настраивать его на заданный размер вне станка. Этот метод позволяет любой новый инструмент или блок новых инструментов устанавливать вместо изношенных без последующей проверки и корректировки их положения. Взаимозаменяемая настройка обеспечивает точность размеров заготовок до 7 класса при значительном сокращении времени настройки станков и применяется на многоинструментных станках-автоматах, полуавтоматах и станках автоматических линий.

Поддержание первоначальной точности настройки технологической системы (поднастройка) осуществляется путем управления процессом обработки.

1.2.7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Шероховатость и волнистость являются характеристиками качества поверхности, оказывающими большое влияние на многие эксплуатационные свойства деталей машин.

Шероховатость и волнистость профиля поверхности имеют сложные спектральные составы, причем шаги и отвечающие им высоты неровностей варьируют по длине профиля, и конечно, в еще большей мере на разных профилях поверхности детали.

Требования к параметрам шероховатости устанавливают на основании их связи с функциональными показателями изделия, определяющими его надежность (табл. 1.2.4). Причем значения этих параметров конструктор может рассчитать по теоретическим или эмпирическим уравнениям связи показателей эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений с параметрами шероховатости. Кроме того, оптимальные параметры шероховатости, как и другие параметры качества поверхности деталей, можно определить измерением, например, на приработанных поверхностях деталей в узлах трения.

Технологическое обеспечение шероховатости поверхности базируется в основном на экспериментальном изучении зависимостей между методом окончательной обработки и параметрам шероховатости (табл. 1.2.5).

Достижимая при определенном методе обработки шероховатость прежде всего характеризуется параметрами  $R_a$ ,  $R_z$  или  $R_{max}$ . Однако, поверхности с одинаковой высотой неровностей, но полученные различными технологическими методами, могут отличаться величинами их опорных (несущих) площадей, характеризующихся величинами опорной длины профиля  $t_p$  или относительной опорной длины профиля  $t_p'$ .

В общем случае шероховатость поверхности различна в различных направлениях, и поэтому для оценки несущих площадей важна топография поверхности. В первом приближении следует рассматривать шероховатость как в поперечном, так и в продольном направлениях. Поперечная шероховатость, т.е. перпендикулярно к движению резания (по направлению поперечной подачи при строгании, точении, шлифовании и т.п.) во многих случаях оказывается соизмеримой с высотой шероховатости в продольном (вдоль обработанных рисок) направлении.

С уменьшением высоты поперечных микронеровностей соотношение между высотами продольной и поперечной шероховатостей уменьшается и они становятся примерно одинаковыми. Наибольшее различие между

ними наблюдается при черновой обработке, когда продольная высота составляет малую долю от поперечной. Указанное соотношение зависит не только от вида обработки, но и от материала. В одних случаях продольные неровности имеют большее значение при обработке стальных деталей (например, при плоском и круглом шлифовании периферией круга), в других случаях - меньше значения при обработке чугунных деталей (строгание, цилиндрическое фрезерование, доводка цилиндрических поверхностей).

Назначение параметра шероховатости - одного из важнейших параметров поверхности - часто базируется лишь на зависимостях между методами окончательной обработки и высотой микронеровностей. Однако, как показали экспериментальные исследования и теоретические решения контактных задач с учетом состояния реальных поверхностей, этих данных явно недостаточно. Значительную роль здесь играют величина и закон высотного изменения опорной (несущей) площади каждой из сопрягаемых поверхностей. Шероховатые поверхности с одинаковой высотой неровностей, но с различными опорными площадями, будут иметь различную несущую способность.

Уменьшение высоты неровностей, получаемое одним и тем же определенным технологическим методом (шлифованием, полированием, хонингованием и т.д.), приводит к возрастанию опорной площади (рис. 1.2.8).

Достижение меньшей высоты шероховатости при изменении метода обработки (рис. 1.2.8, а) совершенно не означает обязательного получе-

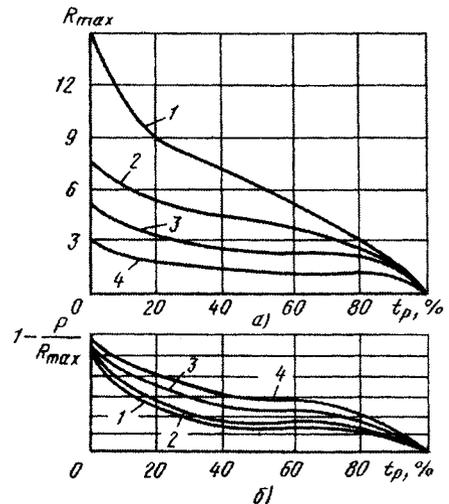


Рис. 1.2.8. Кривые относительных опорных длин профилей  $t_p'$  при шлифовании: 1 - предварительном; 2 - полустрогом; 3 - чистовом; 4 - тонком

## 1.2.4. Рекомендуемые значения параметров шероховатости поверхности деталей машин

Поверхности деталей	Ra, мкм	Rz, %	l, мм
Опорные шейки валов:			
под подшипники скольжения	0,32	30	0,8
под вкладыши из бронзы	0,40	15	0,8
под бабитовые вкладыши	0,25	20	0,25
под вкладыши из чугуна	0,32	40	0,8
под вкладыши из графитопласта АМС-1	0,32	40	0,8
под подшипники качения	0,80	-	0,8
Рабочие поверхности шариковых и роликовых подшипников	0,08	15	0,25
Поверхности, обеспечивающие явление избирательного переноса	0,25	15	0,25
Поверхности посадочных шеек валов под зубчатые колеса	1,60	-	0,8
Поверхности валов, работающие на предел выносливости *1	-	60	0,8
Напыленные поверхности трения скольжения	0,08	10	0,25
Поверхности:			
под напыление *2			8,0
под электрохимические покрытия	0,20-0,80	-	
Поверхности посадочных отверстий зубчатых колес	0,50-2,0	-	0,8
Боковые поверхности:			
зубьев колес	0,63-1,25	-	0,8
нити червяка	0,32	-	0,25
Поверхности основных отверстий корпусов:			
из чугуна	1,00-2,0	-	0,8
из стали	0,63-1,60	-	0,8
Сопрягаемые поверхности корпусов и крышек *3	-	-	2,5
Поверхности направляющих трения-скольжения станков:			
универсальных	0,63		0,8
прецизионных	0,10	15	0,25
тяжелых	1,60		0,08
Поверхности направляющих качения	0,16	-	0,25
Рабочая поверхность:			
цилиндров	0,40	40	0,8
поршневых колец	0,25	-	0,25
коленчатых валов:			
коренные шейки	0,32	30	0,8
шатунные шейки	0,25	20	0,25
поверхность юбки	0,80	-	0,8

Продолжение табл. 1.2.4

Поверхности деталей	Ra, мкм	t <sub>20</sub> , %	l, мм
Поверхность отверстия в поршне под палец	0,50	—	0,8
Наружная поверхность поршневого пальца	0,25	15	0,25
Шейки и кулачки распределительных валов	0,32	30	0,8
Поверхность плунжерных пар	0,08	15	0,25
Поверхности отверстий рычагов вилок, сопрягаемых с валами или осями	0,63		0,8
Корродирующие поверхности *4	0,063	10	0,25
Поверхности под склеивание *5			

\*1 - R<sub>max</sub> = 1 мкм; \*2 - R<sub>z</sub> = 125 мкм; S<sub>m</sub> = 0,5 мм;\*3 - R<sub>z</sub> = 10 мкм; \*4 - S<sub>m</sub> = 0,032 мкм; \*5 - R<sub>z</sub> = 15 мкм

## 1.2.5. Параметры шероховатости поверхности при различных методах обработки

Метод обработки	Параметры шероховатости				
	Ra, мкм	Rz, мкм	S <sub>m</sub> , мм	S, мм	t <sub>20</sub> , %
<b>Наружные поверхности</b>					
<b>Обтачивание:</b>					
черновое	—	63-160	0,32-1,25	0,32-1,25	10-15
получистовое	—	10,0-80	0,16-0,40	0,16-0,4	10-15
чистовое	0,80-2,5	—	0,08-0,16	0,05-0,16	10-15
тонкое	0,10-0,80	—	0,02-0,10	0,01-0,10	10-15
<b>Шлифование:</b>					
предварительное	1,00-2,5	—	0,063-0,20	0,032-0,160	10
чистовое	0,20-1,25	—	0,025-0,100	0,01-0,08	10
тонкое	0,05-0,25	—	0,008-0,025	0,003-0,016	40
плосковершинное	0,32-2,5	—	0,063-1,25	0,08-0,16	20-60
<b>Суперфиниширование:</b>					
обычное	0,032-0,28	—	0,006-0,020	0,003-0,016	10
плосковершинное	0,25-2,0	—	0,05-1,25	0,006-0,16	20-60
<b>Наружные поверхности вращения</b>					
<b>Полирование:</b>					
обычное	0,008-0,08	—	0,008-0,025	0,002-0,008	10
плосковершинное	0,1-0,8	—	0,032-0,2	0,016-0,20	20-70

Продолжение табл. 1.2.5

Метод обработки	Параметры шероховатости				
	Ra, мкм	Rz, мкм	S <sub>m</sub> , мм	S <sub>v</sub> , мм	i <sub>20</sub> , %
<b>Притирка:</b>					
обычная	0,01-0,11	—	0,006-0,04	0,002-0,032	10-15
плосковершинная	0,10-0,83	—	0,032-0,2	0,032-0,20	20-70
обкатывание и выглаживание	0,03-2,0	—	0,025-1,25	0,025-1,25	10-70
виброобкатывание	0,063-1,6	—	0,01-10,50	0,008-0,16	10-70
электрохимическая обработка	0,02-1,6	—	0,025-1,25	0,025-1,25	10-70
магнитоабразивная	0,02-1,6	—	0,008-1,25	0,03-0,16	10-30
<b>Внутренние поверхности вращения</b>					
<b>Сверление и рассверление</b>	—	16,0-63	0,16-0,80	0,08-0,63	10-15
<b>Зенкерование:</b>					
черновое	—	12,5-40	0,16-0,80	0,063-0,40	10-15
чистовое	1,25-3,2	—	0,08-0,25	0,050-0,160	10-15
<b>Развертывание:</b>					
черновое	1,25-2,5	—	0,08-0,20	0,040-0,160	10-15
чистовое	0,63-1,25	—	0,032-0,100	0,0125-0,063	10-15
тонкое	0,32-0,63	—	0,0125-0,040	0,008-0,020	10-15
<b>Протягивание:</b>					
черновое	1,25-3,2	—	0,08-0,25	0,040-0,20	10-15
чистовое	0,32-1,25	—	0,02-0,10	0,008-0,08	10-15
<b>Растачивание:</b>					
черновое	—	40-80	0,25-1,00	0,25-1,00	10-15
получистовое	—	8,0-40	0,125-0,32	0,125-0,32	10-15
чистовое	0,80-2,0	—	0,08-0,16	0,05-0,16	10-15
тонкое	0,20-0,80	—	0,02-0,10	0,01-0,10	10-15
<b>Шлифование:</b>					
предварительное	1,6-3,2	—	0,063-0,25	0,032-0,160	10
чистовое	0,32-1,6	—	0,025-0,10	0,010-0,8	10
тонкое	0,08-0,32	—	0,008-0,025	0,003-0,016	10
плосковершинное	0,32-2,5	—	0,063-1,00	0,008-0,16	20-60
<b>Хонингование:</b>					
предварительное	1,25-3,2	—	0,063-0,25	0,025-0,160	10
чистовое	0,25-1,25	—	0,020-0,100	0,008-0,080	10
тонкое	0,04-0,25	—	0,006-0,20	0,003-0,160	10
плосковершинное	0,25-2,0	—	0,040-1,0	0,008-0,20	20-60

Продолжение табл. 1.2.5

Метод обработки	Параметры шероховатости				
	Ra, мкм	Rz, мкм	S <sub>m</sub> , мм	S <sub>i</sub> , мм	l <sub>20</sub> , %
<b>Притирка:</b>					
обычная	0,020-0,160	—	0,005-0,040	0,002-0,020	10-15
плосковершинная	0,10-0,80	—	0,032-0,20	0,003-0,20	20-70
раскатывание и выглаживание	0,050-2,0	—	0,025-1,00	0,025-1,00	10-70
виброраскатывание	0,063-1,60	—	0,010-12,5	0,008-0,160	10-70
калибрование	0,10-1,60	—	0,025-1,00	0,025-1,00	10-70
<b>Плоские поверхности</b>					
<b>Торцовое фрезерование:</b>					
черновое	—	20,0-80	0,160-0,40	0,160-0,40	10-15
чистовое	1,00-4,00	—	0,080-0,20	0,063-0,20	10-15
тонкое	0,32-1,25	—	0,025-0,100	0,016-0,080	10-15
<b>Цилиндрическое фрезерование:</b>					
черновое	—	16,0-50	1,25-5,0	1,25-5,0	10
чистовое	0,80-3,2	—	0,50-2,0	0,50-2,0	10
тонкое	0,20-1,00	—	0,160-0,63	0,10-0,63	10-15
<b>Строгание:</b>					
черновое	—	32-200	0,20-1,60	0,20-1,60	10-15
чистовое	1,00-6,3	—	0,080-0,25	0,063-0,25	10-15
тонкое	0,32-1,60	—	0,025-0,125	0,0125-0,100	10-15
<b>Торцовое точение:</b>					
черновое	—	32-160	0,20-1,25	0,20-1,25	10-15
чистовое	8,0-32	0,080-0,25	0,063-0,25	—	10-15
тонкое	0,32-1,60	—	0,025-0,125	0,0125-0,100	10-15
<b>Протягивание:</b>					
черновое	1,00-3,2	—	0,160-2,0	0,160-2,0	10-15
чистовое	0,32-1,25	—	0,050-0,50	0,032-0,50	10-15
<b>Шлифование:</b>					
предварительное	1,60-4,0	—	0,100-0,32	0,063-0,25	10
чистовое	0,32-1,60	—	0,025-0,125	0,0125-0,08	10
тонкое	0,080-0,32	—	0,010-0,032	0,005-0,025	10
плосковершинное	0,32-2,5	—	0,025-5,0	0,008-0,20	20-60
<b>Шабрение от себя:</b>					
z = 20 ... 10	—	10,0-40	0,2-1,00	0,125-1,00	10-15
z = 30 ... 20	0,63-2,5	—	0,063-0,25	0,032-0,20	10-15

Продолжение табл. 1.2.5

Метод обработки	Параметры шероховатости				
	Ra, мкм	Rz, мкм	S <sub>m</sub> , мм	S <sub>a</sub> , мм	i <sub>20</sub> , %
<b>Шабрение на себя:</b>					
A = 40 ... 60 %	0,032-1,00	—	0,040-0,125	0,020-0,100	10-15
A = 60 ... 80 %	0,100-0,40	—	0,0160-0,050	0,008-0,032	10-15
<b>Накатывание роликами и шариковыми головками</b>	0,100-2,0	—	0,025-5,0	0,020-5,0	10-70
<b>Вибронакатывание</b>	0,160-2,5	—	0,025-12,5	0,020-5,0	10-70
<b>Виброполирование:</b>					
обычное	0,032-0,030	—	0,010-0,025	0,004-0,025	10
плосковершинное	0,100-1,25	—	0,025-1,60	0,008-0,040	20-70
<b>Притирка:</b>					
обычная	0,020-0,100	—	0,008-0,040	0,004-0,032	10-15
плосковершинная	0,020-0,40	—	0,020-0,25	0,008-0,25	20-70

**Боковые поверхности шлицев**

<b>Шлицефрезерование:</b>					
предварительное	—	20,0-80	1,00-5,0	1,00-5,0	10-15
чистовое	1,25-4,0	—	0,100-2,0	0,050-2,0	10-15
шлицестрогание	1,00-2,5	—	0,080-2,5	0,050-2,5	10-15
шлицепротягивание	0,80-1,60	—	0,80-2,00	0,050-2,00	10-15
<b>Шлифование:</b>					
предварительное	1,60-3,2	—	0,10-0,32	0,063-0,25	10
окончательное	0,40-1,25	—	0,032-0,100	0,0160-0,063	10
накатывание шлицев	0,80-1,00	—	0,080-5,0	0,063-5,0	10-15
обкатывание шлицев	0,32-1,00	—	0,063-2,00	0,032-1,25	10-70

**Боковые поверхности зубьев**

<b>Зубонарезание фрезами:</b>					
модульными	—	40-80	1,25-5,0	1,00-5,0	10-15
червячными	—	16,0-40	0,32-1,60	0,20-1,60	10-15
долбками	—	8,0-20,0	0,20-1,25	0,125-1,25	10-15
протягивание	0,80-1,60	—	0,080-2,0	0,050-2,0	10-15
накатывание	0,80-2,0	—	0,080-5,0	0,063-5,0	10-15
шенингование	0,63-1,25	—	0,125-0,50	0,080-0,50	10-15
шлифование	0,50-1,25	—	0,040-0,100	0,025-0,063	10
обкатывание	0,32-1,00	—	0,063-2,00	0,032-1,75	10-70
притирка	0,10-0,50	—	0,032-0,50	0,020-0,160	10-70

Продолжение табл. 1.2.5

Метод обработки	Параметры шероховатости				
	Ra, мкм	Rz, мкм	S <sub>m</sub> , мм	S, мм	t <sub>20</sub> , %
<b>Боковые поверхности профиля резьбы</b>					
<b>Нарезание:</b>					
резцами и гребенками	—	8,0-20,0	0,080-0,25	0,032-0,160	20-15
метчиками, плашками и самораскрывающимися нарезными головками	—	6,3-16,0	0,063-0,20	0,025-0,125	10-15
<b>Фрезерование:</b>					
предварительное	—	8,0-20,0	0,125-0,32	0,063-0,20	10
окончательное	0,50-2,0	—	0,032-0,125	0,016-0,80	10
<b>Накатывание и раскатывание резьбы</b>	0,50-1,25	—	0,040-0,100	0,032-0,080	10-20

**Примечание.** Учитывая довольно тесную корреляционную связь между собой высотных параметров шероховатости Ra, Rz и Rmax, в таблице приводится только один из них, через который, если это необходимо, используя простые эмпирические зависимости, определяются два других параметра, не приведенные в таблице:

для плосковершинной и отделочно-упрочняющей обработки

$$R_{\max} = 5,0R_a; \quad R_z = 4,0R_a;$$

для точения, строгания и фрезерования:

$$R_{\max} = 6,0R_a; \quad R_z = 5,0R_a;$$

Для остальных методов обработки:

$$R_{\max} = 7,0R_a; \quad R_z = 5,5R_a;$$

где z - число пятен контакта на площади 25×25 мм; A - относительная площадь контакта.

ния большей опорной площади, чем для поверхности с большей высотой шероховатости, но обработанной иным методом. Абсолютные значения опорной площади поверхностей при различных методах обработки могут значительно различаться. При равной высоте неровностей опорная площадь может различаться в 2-3 раза в зависимости от метода обработки (рис. 1.2.8, б).

Опорная площадь может оказаться одинаковой для нескольких поверхностей, обработанных по различным технологическим методам (рис. 1.2.9). Отличие таких поверхностей устанавливают по геометрическим характеристикам отдельных неровностей профиля (микронеровностей) - углам профиля, радиусам кривизны профиля выступа (закругления

вершин), шагу неровностей профиля (по вершинам и по средней линии), их соотношениям и т.д.

При одном методе обработки уменьшение высоты неровностей не сопровождается изменением значений  $t_p$ .

Для оценки опорной площади поверхностей с нерегулярной шероховатостью, которой свойственны как случайные очертания неровностей, так и их расположение по высоте (поверхности после шлифования, хонингования, упрочнения дробью, электроискровой обработки и др.) можно воспользоваться теорией случайных функций. Профилограммы нерегулярной шероховатости приближенно могут быть описаны нормальным стационарным процессом.

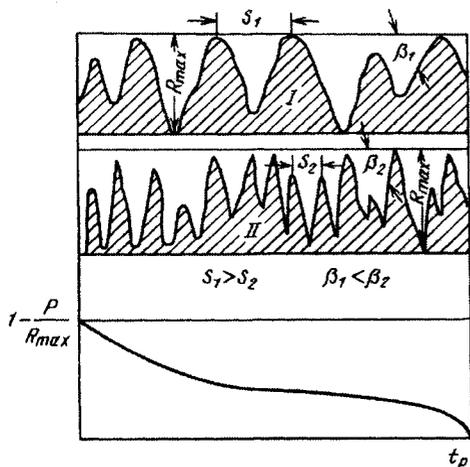


Рис. 1.2.9. Профилограммы поверхностей с одинаковой опорной поверхностью

При этих условиях

$$t_p = 1 - \Phi\left(3 - \frac{0,8p}{Ra}\right),$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt$  - функция Лапласа.

Задаваясь различными уровнями  $p$  ( $0 < p < 0,5R_{max}$ ), определяют значения  $t_p$ .

Наибольший практический интерес представляет начальная часть относительной опорной кривой профиля

$$t_p = b\epsilon^v,$$

где  $\epsilon = p/R_{max}$ ;  $b$  и  $v$  - параметры аппроксимации начальной части опорной кривой профиля (при  $0 < t_p \leq 0,5$ ).

Каждому технологическому методу обработки соответствуют свои значения  $b$  и  $v$  (табл. 1.2.6), приведенные значения параметров  $b$  и  $v$  позволяют выполнить ориентировочные расчеты по определению опорной (несушей) площади шероховатых поверхностей.

В большинстве случаев форма неровностей в вертикальных сечениях представляет параболу  $n$ -го порядка, а в горизонтальном сечении - фигуры, близкие к эллипсам. Каждому методу обработки соответствует определенный диапазон изменения углов профиля и радиусов в зависимости от высоты шероховатости получаемых поверхностей.

В преобладающем большинстве случаев радиус закругления вершин неровностей в продольном направлении  $r_{пр}$  превышает ради-

ус закругления в поперечном направлении  $r_n$ , а углы профиля, наоборот:  $\beta_n$  для поперечного направления больше, чем  $\beta_{пр}$  для продольного. Со снижением высоты неровностей наблюдается общая тенденция и уменьшение углов профиля при увеличении радиусов закругления выступов.

Меньшей высоте неровностей поверхности, полученной при одном методе, не всегда соответствуют большие радиусы закругления выступов и меньшие углы, чем для поверхностей с большей высотой неровностей при ином методе обработки.

Радиусы закругления выступов, углы профиля, высота неровностей и размеры основания отдельных неровностей, их шаги связаны между собой. С уменьшением высоты неровностей при каждом методе обработки возрастает соотношение между шагом неровностей профиля  $S$  и высотой  $R_{max}$ .

Для большинства методов механической обработки при средней высоте неровностей поверхности шаг поперечной шероховатости  $S_n$  не превышает  $40R_{max}$  (шлифование, точение, строгание, фрезерование, растачивание стальных и чугунных деталей).

Для неровностей с меньшей высотой значения их шага могут достигать почти  $300R_{max}$ . Шаг продольной шероховатости  $S_{пр}$  обычно превышает шаг поперечной. Отношение этих величин в большинстве случаев не превышает 15, хотя в отдельных случаях доходит до 40. Абсолютные значения шага продольных неровностей достигают  $800R_{max}$ .

Следовательно, чем больше радиусы закругления выступов, тем меньше углы профиля и больше размеры оснований отдельных неровностей и их шаг (при определенной высоте шероховатостей).

Таким образом, за критерий оценки геометрии шероховатостей, полученных при различных методах обработки, можно принять отношение радиуса закругления выступов к высоте неровностей.

При необходимости получения более точных значений величин, характеризующих опорную площадь и другие геометрические параметры качества поверхности деталей, обязательно следует учитывать конкретные условия выполнения соответствующей технологической операции (материал обрабатываемой детали, шероховатость при определенных режимах обработки, материал инструмента и т.д.). Это связано с возможными колебаниями параметров качества в зависимости от указанных условий. При этом во многих случаях целесообразно учитывать технологическую наследственность. Наиболее приемлемой формой представления всех указанных зависимостей "параметры качества поверхности -

### 1.2.6. Геометрические параметры шероховатости поверхности деталей (при обработке резанием)

Метод обработки	Ra, мкм	v	b	r <sub>п</sub> , мкм	r <sub>пр</sub> , мкм	r <sub>г</sub> , мкм	β <sub>п</sub>	β <sub>пр</sub>	$\frac{S_{п}}{R_{max}}$	$\frac{S_{пр}}{R_{max}}$	$\frac{r}{R_{max}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Стальные детали</b>											
Стругание	10	1,95	2,2	17	150	50	20°	2°30'	5,7	32	1,3
	5	1,9	2,5	30	250	90	15°	2°	8	50	4,5
	2,5	1,6	2,7	90	600	230	10°	1°30'	16	90	24
	1,25	1,5	2,66	160	950	400	6°	1°	23	120	60
Цилиндрическое фрезерование	10	1,8	1,3	10	45	20	25°	8°	4,5	14	0,5
	5	1,6	1,7	15	60	30	20°	7°	6	16	1,5
	2,5	1,5	1,8	25	80	45	15°	6°	9,5	20	4,5
	1,25	1,45	2	50	120	80	9°	4°	1,5	35	12
Торцовое фрезерование	5	1,65	1,8	45	4000	425	20°	50'	7	137	20
	2,5	1,6	2,3	90	9000	900	11°	30'	16	230	90
	1,25	1,6	2,5	120	15000	1350	5°	15'	25	445	200
Шабрение	0,63	2,2	4	10	25	16	9°	6°	-	-	6

Продолжение табл. 1.2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Плоское шлифование	5	2,4	2,5	5	250	35	35°	2°	3	57	2
	2,5	2,25	2,75	7	1300	100	25°	1°	4,5	135	10
	1,25	2,2	2,85	10	3200	180	15°	30'	8,5	230	30
	0,63	2,1	3	17	8000	370	10°	18'	14	270	120
	0,32	2	3,5	20	15000	550	7°	10'	19	780	350
Доводка плоскостей	0,16	3	1,5	15	7000	300	5°	10'	25	770	400
	0,08	2,5	2,2	25	10000	500	3°	7'	47	1050	1250
	0,04	2,3	2,5	75	14000	1000	1°	5'	125	1500	4000
	0,02	2,2	3	250	35000	3000	20'	2'	275	3550	30000
Точение	5	1,5	1	20	60	35	20°	10°	6	12	1,75
	2,5	1,45	1,5	30	80	50	15°	8°	8	14,5	5
	1,25	1,35	2	60	90	75	10°	7°	14	18	12
	0,63	1,3	2,1	120	120	120	5°	5°	25	24	37
Круглое шлифование	1,25	2,6	2,3	4	16	8	25°	10°	5	8	1,3
	0,63	2,4	2,6	6,5	22	12	16°	8°	8	15	4
	0,32	2,3	2,8	12	30	20	10°	7°	15	19	12
	0,16	2,2	3,5	18	40	30	5°	4°	22	34	35
Растачивание	5	1,65	1,5	20	50	32	18°	11°	7,5	10,5	1,6
	2,5	1,6	1,6	35	65	50	13°	9°	10	13	5
	1,25	1,45	2	60	85	70	8°	7°	16	18	11
	0,63	1,4	2,5	110	120	115	5°	5°	30	25	36

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Внутреннее шлифование	2,5	2	1,9	3,5	8	5	32°	13°	3,5	9	0,5
	1,25	1,95	2	6	11	8	17°	11°	7	10	1,3
	0,63	1,85	2,5	10	16	13	10°	18°	13	15	4
	0,32	1,75	3	15	23	18,5	5°	5°	23	22	12
Развертывание	2,5	1,7	2	10	20	15	20°	5°	6,5	12	1,5
	1,25	1,6	2,3	30	50	40	10°	3°	12	39	6
	0,63	1,5	2,5	250	350	300	2°	2°	53	57	90
	0,32	1,4	2,8	500	500	500	1°30'	1°30'	90	90	300
Протягивание	1,25	1,75	1,2	12	9000	330	10°	12°	12	600	50
	0,63	1,7	1,8	25	12000	550	6°	10°	20	690	170
	0,32	1,65	2,2	70	15000	1000	3°	8°	48	750	650
Хонингование	0,63	2,2	1,5	4	60	15	13°	4°	9	31	5
	0,32	2,2	2,2	5,5	70	20	10°	3°	12	43	12
	0,16	2	3	14	90	35	5°	2°	26	62	45
	0,08	1,9	4	20	160	70	3°	1°30'	45	105	175
Полирование	0,63	2,2	3	350	150	230	2°	2°	60	72	70
	0,32	1,7	3,25	700	300	450	1°	1°	120	105	300
	0,16	1,3	3,5	1000	450	670	30'	30'	215	180	850
Доводка цилиндри- ческих поверхностей	0,16	2,3	1,9	25	35	30	6°	3°	25	50	35
	0,08	2,2	2	40	40	40	3°	2°30'	50	57	100
	0,04	2	2,1	70	43	55	1°	2°	110	85	275
	0,02	1,5	2,5	125	45	75	30'	1°30'	200	125	750

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Чугунные детали</b>											
Стругание	10	2,1	2	8,5	40	18,5	35°	18°	3	9	0,45
	5	2	2,3	10	70	25	20°	10°	5,8	13	1,3
	2,5	1,8	4	20	500	100	10°	3°30'	11,7	58	10
	1,25	1,7	4,2	30	900	150	5°	1°30'	25	82	25
Плоское шлифование	2,5	2	2	15	250	60	27°	3°	4,7	40	6
	1,25	2,97	2,5	20	550	100	12°	1°	10,5	112	15
	0,63	1,95	3,8	35	1200	200	6°	30'	21	226	65
	0,32	1,8	4,5	40	1700	250	4°	20'	35	340	160
Цилиндрическое фрезерование	10	1,95	1,6	7	40	17	37°	11°	2,9	10,5	0,4
	5	1,9	2	8	50	20	32°	3,8°	3,8	13	1
	2,5	1,8	2,3	8,5	70	25	25°	1°	4,8	18	2,5
	1,25	1,65	2,5	13	180	50	15°	3°	8,5	45	8
Торцовое фрезерование	10	-	-	13	45	25	35°	9°	3,3	13,5	0,6
	5	1,5	1,1	20	75	40	20°	6°	8	19,5	2
	2,5	1,4	1,4	30	110	60	10°	3°	12	39	6
	1,25	1,35	1,5	45	170	90	5°	2°	22	69	15
Точение	10	1,9	1,1	15	40	25	30°	11°	3,8	10,5	0,6
	5	1,8	1,3	20	70	37,5	20°	8°	7	14,5	1,3
	2,5	1,7	2	30	120	60	10°	5°	12	18	2,5
	1,25	1,7	2,5	60	270	130	5°	3°	30	42	6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Круглое шлифование	2,5	1,9	1,5	13	200	50	18°	4°	6,6	31	5
	1,25	1,75	2,5	18	400	85	12°	2°	10	60	13,5
	0,63	1,7	2,75	23	1000	150	8°	1°	16	178	50
	0,32	1,6	3	25	1400	190	6°	30'	22	235	120
Растачивание	5	2	2	10	13	12	30°	20°	4	6	0,6
	2,5	1,9	2,7	12	14	13	25°	13°	5	9	1,3
	1,25	1,8	2,9	15	16	15	20°	10°	7	11	2,5
	0,63	1,75	2,5	20	20	20	10°	4°30'	12	19	6
Внутреннее шлифование	2,5	2,2	2,5	7	19	12	33°	18°	3,7	6,7	1,2
	1,25	2,1	2,8	12	22	16	18°	13°	7	10	2,5
	0,63	1,9	3,5	20	34	25	3°30'	7°	18	18	8
	0,32	1,85	3,75	35	57	45	3°	3°	40	45	30
Доводка цилиндри- ческих поверхностей	0,16	1,3	2	25	8	15	4°	7°	33	18,5	17,5
	0,08	1,2	2,3	35	13	20	3°	4°	50	32	55
	0,04	1,1	2,4	50	30	40	1°30'	2°	85	80	200
	0,02	1,05	3	70	45	55	50'	1°	230	145	550

Примечание. Параметры  $b$  и  $\nu$  относительной опорной длины профиля  $t_p$  входят в зависимость  $t_p = b \left( \frac{p}{R_{\max}} \right)^\nu$ .

## 1.2.7. Параметры поперечной волнистости

Метод обработки	$W_{\max}$ , мкм	$S_w$ , мкм	$\frac{S_w}{W_{\max}}$	$r_w$ , мм
<b>Стальные детали</b>				
Шлифование:				
внутреннее	0,6-4,5	500-1400	100-1350	10-80
круглое	0,75-3	250-500	165-400	10-25
плоское	1,25-13	750-1400	100-700	15-50
Растачивание	2-3,5	1000-1500	300-750	15-55
Строгание	2-6	400-1700	200-350	10-30
Хонингование	0,1-0,8	150-700	200-7000	2,5-40
Развертывание	0,5-4	300-500	100-1000	5-50
Полирование	0,3-1,5	150-350	200-500	10-25
Доводка:				
плоскостей	0,1-0,35	60-100	300-600	5-10
цилиндрических поверхностей	0,05-0,15	35-120	400-700	2,5-10
<b>Чугунные детали</b>				
Шлифование:				
внутреннее	1-3	450-1400	120-450	5-400
круглое	0,5-7,5	550-1000	80-1850	10-100
плоское	0,8-4	500-900	200-800	20-80
Растачивание	0,5-10	400-1000	40-850	5-50
Торцовое фрезерование	2,5	800	300	85
Точение	1	1000	1000	50

## 1.2.8. Параметры продольной волнистости

Метод обработки	$W_{\max}$ , мкм	$S_w$ , мкм	$\frac{S_w}{W_{\max}}$	$r_w$ , мм
<b>Стальные детали</b>				
Плоское шлифование	1,2-12	2,4-3,5	280-2900	30-350
Строгание	1-12	1-5	320-1000	20-100
Цилиндрическое фрезерование	7,5-40	1,7-3,4	60-270	5-45
Протягивание	0,4-3	0,7-0,9	300-1750	20-80
Доводка плоскостей	0,25-0,5	1-1,5	2000-6000	150-850
<b>Чугунные детали</b>				
Плоское шлифование	1,3-9	1,8-2,3	200-1770	40-200
Цилиндрическое фрезерование	7,5-30	1,6-2,5	83-267	10-60
Строгание	12	1,65	140	20

условия обработки" является описание их в виде формул, обобщающих графической и табличный варианты.

Волнистость поверхностей, представляющая собой совокупность периодически повторяющихся возвышений и впадин с взаимным расстоянием, значительно большим, чем у неровностей, образующих шероховатость, может образовываться на детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В связи с этим различают продольную и поперечную волнистость. Неровности с большим шагом, образующие рельеф вдоль неровностей шероховатости, обычно возникают в результате вибрации технологической системы. Это продольная волнистость, которая приобретает, например, для плоской обработанной детали характер волн, высота которых  $W_{\max}$  соответствует удвоенной амплитуде колебаний при обработке, а длина (шаг) волны  $S_w$  - частоте колебаний. Неровности с большим шагом в направлении, перпендикулярном следам неровностей шероховатости, образующие поперечную волнистость, имеют иное происхождение - например, при обработке цилиндрических деталей поперечная волнистость вызывается неравномерностью подачи, неправильной заправкой шлифовального круга, неравномерностью его износа и т.п. (табл. 1.2.7 и 1.2.8).

Из двух основных параметров ( $W_{\max}$  и  $S_w$ ), характеризующих волнистость, более важна высота волн. Это объясняется тем, что при различном шаге  $S_w$  и одинаковой высоте  $W_{\max}$  кривая опорной поверхности, а следовательно, и процент несущей площади, на различной высоте профиля примерно одинаковы. Опорная площадь у волн с меньшей высотой  $W_{\max}$  больше, чем у волн с большой высотой. Форма опорной кривой мало зависит от длины волны  $S_w$ .

Для более полного и правильного учета влияния формы и числа волн на несущую способность деталей необходимо оценивать волнистость теми же параметрами, что и шероховатость. Это требование следует из рассмотрения контактных задач, определяющих перемещения в стыках, износостойкость сопрягаемых деталей, герметичность соединений и т.д.

#### 1.2.8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

Физико-механические свойства поверхности, оказывающие значительное влияние на надежность деталей, неразрывно связаны с технологией их изготовления.

Поверхностный слой детали после механической обработки пластически деформирован. Поэтому физическое состояние этого слоя в основном характеризуется деформаци-

онными изменениями в нем, следствием которых является его деформационное упрочнение (наклеп). Деформационное упрочнение оценивается степенью  $U_n$  и глубиной  $h_n$  наклепа, а интенсивность наклепа по глубине поверхностного слоя - градиентом наклепа  $U_{гр}$ , являющимся важным параметром наклепа после окончательной и отделочной обработки поверхностей:

$$U_n = \frac{HM_{\text{поверхности(max)}}}{HM_{\text{сердцевины(исх)}}} \cdot 100\%;$$

$$U_{гр} = \frac{HM_{\text{max}} - HM_{\text{исх}}}{h_n},$$

где  $HM_{\text{max}}$  и  $HM_{\text{исх}}$  - максимальная (поверхности) и исходная (сердцевины) микротвердость детали.

В результате воздействия различных технологических процессов при изготовлении детали в ней возникают остаточные напряжения, которые существуют и уравниваются внутри детали после устранения причин, вызвавших их появление (механических, тепловых и физико-химических).

Каждый технологический процесс, участвующий в механизме образования остаточных напряжений детали, имеет свои особенности, но в основе его лежит необратимое неоднородное распределение деформации по объему.

Распределение макронапряжений в поверхностном слое, охватывающих макрообъемы, соизмеримо с размерами деталей после их обработки и в первую очередь связано с действием двух факторов - механического (пластического деформирования) и теплового (нагрева поверхностного слоя). Направление силового поля, его величина, соотношение напряжений от механического и теплового воздействия в значительной степени определяют величину макронапряжений и их знак (сжимающие или растягивающие).

Физико-механические свойства поверхностного слоя зависят как от вида обработки (табл. 1.2.9), так и ее условий (табл. 1.2.10).

Большую роль в обеспечении физических свойств поверхности играют методы пластического деформирования (накатывание роликами и шариками, вибрационное накатывание, обработка дробью, дробеабразивная обработка, чеканка, виброгалтовка, гидрополирование и др.). Эффективность упрочнения зависит от чувствительности металла к наклепыванию - твердость поверхностного слоя при обработке деталей из стали 25 увеличивается на 45 %, чугуна - на 30 ... 60 %, силумина - на 50 %, латуни - на 60 % и т.д. Глубина наклепа для мягких материалов составляет 0,8 ... 3 мм, для материалов средней твердости - 0,3 ... 8 мм.

### 1.2.9. Влияние видов обработки на деформационное упрочнение поверхностных слоев

Вид обработки	Степень наклепа $\frac{HM_{\text{поверхности}}}{HM_{\text{сердцевины}}} 100 \%$	Глубина наклепа, мкм
Точение:		
обычное и скоростное	120-150	30-50
тонкое	140-180	20-60
Фрезерование:		
торцовое	140-160	40-100
цилиндрическое	120-140	40-80
Сверление и зенкерование	160-170	180-200
Развертывание	120-150	150-200
Протягивание	150-200	20-75
Зубофрезерование и зубодолбление	160-200	120-150
Шевингование зубьев	110-140	До 100
Шлифование круглое:		
незакаленная углеродистая сталь,	140-160	30-60
низкоуглеродистая сталь	160-200	30-60
закаленная сталь	125-130	20-40
Шлифование плоское	150	16-35

### 1.2.10. Влияние технологических факторов обработки резанием на физико-механические свойства поверхности

Технологические факторы	Физико-механические свойства поверхностного слоя детали
Скорость резания	По мере увеличения (до определенных пределов) скорости резания глубина наклепа возрастает. При высоких скоростях (200...600 м/мин) возникает явление разупрочнения, которое уменьшает глубину наклепа. При обработке легированных и высокопрочных сталей, имеющих низкие пластические свойства, остаточные напряжения; сжатия образуются при скоростях резания 400...600 м/мин. При обработке конструкционных сталей 20 и 45 остаточные напряжения сжатия возникают при скоростях резания 500...800 м/мин и отрицательных передних углах
Подача резания	При увеличении подачи возрастают глубина наклепа и остаточные напряжения
Глубина резания	Не оказывает существенного влияния на глубину наклепа
Передний угол	Применение инструментов с отрицательными передними углами от 15 до 45° способствует образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия
Задний угол	При увеличении заднего угла в пределах 3...15° глубина наклепа уменьшается
Главный угол в плане	Уменьшение главного угла в плане от 90 до 45° вызывает уменьшение глубины наклепа

Продолжение табл. 1.2.10

Изменение шероховатости режущей кромки при затуплении инструмента	Применение тщательно доведенного инструмента способствует уменьшению глубины наклепа
Радиус округления (затупления) режущей кромки инструмента	Увеличение радиуса округления режущей кромки способствует увеличению глубины наклепа и остаточных напряжений
Механические свойства материала детали	С повышением твердости обрабатываемого материала уменьшается объем, подвергаемый пластической деформации. Чем мягче сталь, тем глубже распространяется пластическая деформация. Остаточные напряжения возрастают при увеличении сопротивления деформации при повышении твердости

Совершенствование методов пластического деформирования позволяет повысить их эффективность. Так, использование электро-механической обработки, основанной на пластическом деформировании и термической обработке деталей, позволяет создать "технологический барьер" для "прохождения" влияния отдельных факторов на конечные свойства деталей. Электро-механическая обработка характеризуется значительным повышением твердости поверхностных слоев (например, в 1,5-2 раза после предварительного точения стали 30ХГСА).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электро-механической обработкой. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
2. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1984. 267 с.
3. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоуставляющихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 218 с.
4. Демкин И.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
5. Дунин-Барковский И.В., Карташева А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некрутости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
6. Карпов Л.И., Литвинов В.Г., Яворский В.А. Инженерные методы оценки и контроля качества в серийном производстве, М.: Стандарты, 1984. 213 с.
7. Крагельский И.В., Добычин Н.М., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1974. 526 с.
8. Маталин А.А. Технология механической обработки. - Л.: Машиностроение, 1977. 464 с.
9. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-3. Надежность машин / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Э. Соснин и др. Под общ. ред. В.В. Клюева. 1998. 522 с.

10. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.

11. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наук. думка, 1984. 272 с.

12. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев: Наук. думка, 1989. 192 с.

13. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение: 1979. 176 с.

14. Сизенов Л.К., Масленников А.М. Анализ и расчет точности обработки в судовом машино- и приборостроении. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.

15. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.

16. Дупуски и посадки. Справочник. В 2-х ч. / В.Д. Мягков, М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. Л.: Машиностроение. 1982. Ч. 1. 543 с.

17. Статистические методы обработки эмпирических данных. М.: Изд-во стандартов, 1978. 232 с.

18. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

19. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 206 с.

20. Суслов А.Г., Браун Э.Д., Виткевич Н.А. и др. Качество машин. Справочник в 2-х т. Т. 1. / Под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 1995. 256 с.

21. Суслов А.Г., Гуляев Ю.В., Дальский А.М. и др. Качество машин. Справочник в 2-х т. Т. 2. / Под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 1995. 432 с.

### Глава 1.3

## РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 1.3.1. МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Разработка технологических процессов (ТП) механической обработки является сложной, комплексной, вариантной задачей, требующей учета большого числа разнообразных факторов. В комплекс кроме разработки собственно ТП входит разработка приспособлений, режущего, измерительного и вспомогательного инструмента, нестандартного оборудования и т.д. В основу разработки ТП закладывается технико-экономический принцип, предполагающий изготовление изделий в полном соответствии с их эксплуатационными свойствами, задаваемыми в конструкторской документации и технических условиях, при наименьшей себестоимости.

Основы методологии разработки ТП отражены в стандартах единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП). Общие правила разработки ТП изложены в Р50-54-93-88.

Разрабатываемые ТП должны быть прогрессивными, обеспечивать повышение производительности труда и качества изготавливаемых изделий, сокращение трудовых и материальных затрат на их реализацию, обеспечивать выполнение всех требований безопасности труда, а также быть экологически чистыми, без вредных недопустимых воздействий на окружающую среду. ТП разрабатывают на основе имеющихся типовых или групповых ТП.

По назначению разрабатываемые ТП разделяют на рабочие (с ориентировкой на конкретные производства с их оборудованием в соответствии с особенностями вспомогательных цехов и традициями), и проектные (перспективные), ориентированные на все прогрессивное, перспективное.

В зависимости от количества наименований изделий, для которых разрабатывается ТП: одно изделие, группы однотипных и разнотипных изделий, ТП разделяют на три вида: единичные, типовые и групповые.

Типовые и групповые ТП образуют унифицированный вид ТП.

В зависимости от степени детализации содержания ТП в документах единой системы технологической документации (ЕСТД) различают ТП маршрутные, операционные и маршрутно-операционные. Общими для названных видов ТП являются основные этапы их разработки.

Для разработки единичных ТП установ-

- лены следующие основные этапы Р50-54-93-88.
1. Анализ исходных данных для разработки ТП.
2. Выбор действующего типового, группового ТП или поиск аналога единичного процесса.
3. Выбор исходной заготовки и методов ее изготовления.
4. Выбор технологических баз.
5. Составление технологического маршрута изготовления детали.
6. Разработка технологических операций.
7. Нормирование ТП.
8. Определение требований экологической безопасности.
9. Расчет экономической эффективности ТП.
10. Оформление ТП и технологической документации.

Исходную информацию для разработки ТП разделяют на базовую, руководящую и справочную.

Базовая информация включает данные, содержащиеся в конструкторской документации на изделие и программу выпуска этого изделия. В задачи данного этапа входит изучение рабочего чертежа детали, ее конструкции и служебного назначения в изделии, технических требований к рабочим поверхностям, физико-механических свойств материала детали, анализ технологичности конструкции детали, разработка конструкторско-технологического кода детали и определение типа производства.

Особое внимание при разработке ТП должно быть уделено изучению всей информации, заложенной в рабочих чертежах, тщательному контролю и уточнению этой информации с позиций удовлетворения всех обусловленных предназначением деталей эксплуатационных свойств, прежде всего рабочих поверхностей.

При изучении рабочего чертежа детали и технических условий на ее изготовление важным является также установление нагрузок, воспринимаемых деталью и ее поверхностями, температурные условия работы, выявление поверхностей трения деталей, а также подвергаемых коррозионным и эрозионным воздействиям, и другие данные о служебном назначении детали.

Обеспечение технологичности конструкции изделий является одной из основных функций подготовки производства, предусматривающей взаимосвязанное решение конструкторских и технологических задач, направленных на повышение производительности труда, достижение оптимальных трудовых и материальных затрат и сокращение времени на производство, в том числе и монтаж вне предприятия-изготовителя, техническое обслуживание и ремонт изделия.

Анализ технологичности проводится в соответствии с требованиями стандартов ЕСТПП (ГОСТ 14.205 и ГОСТ 14.206).

Показатели, характеризующие трудоемкость, материалоемкость, унификацию конструкций элементов детали, требования к точности разнообразных параметров, сопоставляют с аналогичными показателями деталей, принятыми в качестве базовых.

Детали по технологическому классификатору группируют по признакам, определяющим общность ТП их изготовления. Группирование деталей — обязательное условие типизации ТП, обеспечивающих внедрение наиболее прогрессивных форм организации производства, позволяющее создать поточное производство и специализировать рабочие места таким образом, чтобы они всегда были готовы принять для обработки любые детали и сборочные единицы данной производственно-технологической группы.

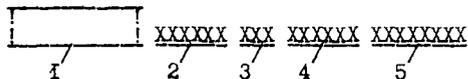


Рис. 1.3.1. Структура полного конструкторско-технологического кода детали

Структура полного конструкторско-технологического кода детали (рис. 1.3.1) включает пять структурных элементов: 1 - код организации разработчика; 2 - код классификационных группировок конструктивных признаков; 3 - порядковый регистрационный номер (условный); 4 - код классификационных группировок основных технологических признаков; 5 - код классификационных группировок технологических признаков, определяющих вид детали.

На рис. 1.3.2 представлена структура кода классификационных группировок конструктивных признаков, а на рис. 1.3.3 - то же, но технологических признаков; при этом переменная часть технологического кода (структурный элемент 5) дана применительно к виду детали, обрабатываемой резанием.

Технологический классификатор с его достаточно широкой системой технологических признаков создает необходимые условия для решения многих технологических задач, основными из которых являются:

- адресование деталей к ранее разработанному типовым или групповым ТП;
- группирование деталей по конструкторско-технологическому подобию для разработки типовых ТП и группового метода обработки;
- организация подетальной специализации производственных структур;

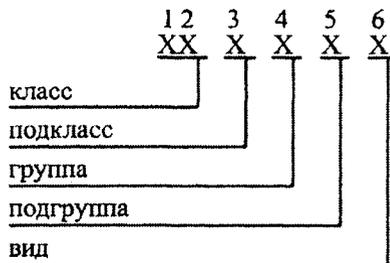


Рис. 1.3.2. Структура кода классификационных группировок конструктивных признаков

- повышение серийности за счет организации группового производства;
- повышение уровня унификации и стандартизации ТП;
- реализация рекомендаций, изложенных в технологическом классификаторе по выбору металлорежущего и термического оборудования;
- механизация и автоматизация обработки различной технологической информации;
- использование декодирования и анализа конструкторско-технологических признаков деталей для решения ряда задач, связанных с разработкой ТП.



Рис. 1.3.3. Структура кода классификационных группировок технологических признаков

Существует достаточно большое число методик определений типа производства по известным номенклатуре изготавливаемых изделий и годовой программе их выпуска. Ниже приведены две из таких методик, получивших большую известность.

По первой методике серийность производства определяется количеством изделий в партии (серии):

Производство	Крупные изделия	Средние изделия	Мелкие изделия
Мелкосерийное	2-5	5-25	10-50
Среднесерийное	5-25	25-150	50-300
Крупносерийное	Св. 25	Св. 150	Св. 300

Более точно тип производства может быть определен по соотношению производственного такта  $T$  к штучному среднему времени  $T_{шт.сп.}$  выполнения наиболее характерных операций в ТП изготовления деталей изделия:

$$K = \frac{T}{T_{шт.сп.}}$$

где  $T = \frac{T_{ф}60}{H}$ ,  $T_{ф}$  - действительный годовой фонд времени в часах работы оборудования, связанного с выполнением упомянутых выше характерных операций;  $H$  - годовая программа выпуска изделий.

Ниже приведены ориентировочные значения коэффициента  $K$  для различных типов производств:  $K = 1$  - массовое производство;  $10 > K > 1$  - крупносерийное производство;  $20 > K > 10$  - среднесерийное производство;  $40 > K > 20$  - мелкосерийное производство;  $K > 40$  - единичное производство.

Для деталей большинства изделий машиностроения применяются практически все известные виды заготовок. Основными из них являются сортовой материал и профильный прокат, штампованные заготовки, а также разнообразные виды отливок. Выбор заготовки определяется физико-химическими свойствами материала деталей, их конструктивными формами и размерами, характером нагрузок, воспринимаемых деталями в процессе функционирования изделия, а также типом производства.

Сортовой материал применяется во всех типах производства для заготовок деталей, конфигурация которых близко подходит к профилю сортового материала, когда нет значительной разницы в поперечных сечениях детали. Сортовой материал применяют также в случаях, когда по причине малой программы другие виды заготовок экономически невыгодны.

Аналогичные условия и для применения профильного проката в серийном и массовом производствах.

Наиболее широкое распространение по-

лучили поковки, полученные горячей штамповкой. Это объясняется их высокими прочностными характеристиками по сравнению с другими видами заготовок, полученных из одинакового металла или сплава.

Широкому применению поковок способствует также высокая производительность, точность заготовок, высокий коэффициент использования материала и малая стоимость заготовки в условиях серийного и массового производств.

Применение горячей штамповки все больше обеспечивает получение деталей, идущих на сборку после финишной обработки лишь отдельных поверхностей. Точность размеров таких заготовок соответствует 11-му качеству. Горячей штамповкой могут быть получены заготовки из всех пластичных материалов в широком диапазоне массы.

Горячая штамповка может выполняться на молотах, прессах и горизонтально-ковочных машинах. Переход от штамповки на молотах к прессам с автоматизацией нагрева и подачи заготовок повысил производительность труда в 2 ... 3 раза и уменьшил расход материала на 10...15 %. Штамповка на горизонтально-ковочных машинах применяется для получения заготовок, а иногда и готовых деталей типа колец, втулок, ступенчатых валов, клапанов, фланцев, деталей со сквозными и глухими отверстиями и т.д.

Такие заготовки отличаются высокой точностью, имеют повышенный коэффициент использования материала, а процесс штамповки является высокопроизводительным. В ряде случаев в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также при производстве крупногабаритных заготовок применяют свободную ковку и ковку в подкладных штампах.

Литые заготовки получили преимущественное применение для корпусных деталей закрытого или открытого типа, кронштейнов, фитингов, траверс, корпусов и крышек подшипников и редукторов, рычагов, шатунов, тройников и др. Основными видами литья являются литье в песчаные, металлические и оболочковые формы, литье под давлением, по выплавляемым моделям и центробежное.

Литье в песчаные формы, изготовленные по металлическим моделям при машинной формовке, позволяет получать отливки большой массы при минимальной толщине стенок до 3 ... 8 мм.

Литье в оболочковые формы применяют главным образом для ответственных фасонных отливок. Точность отливок 12 ... 14-го качества, параметр шероховатости  $Rz = 40 \dots 10$  мкм.

Такие же точность и параметры шероховатости поверхности достигаются и при литье

в кокиль, которое экономически целесообразно применять в серийном и массовом производствах.

Литье под давлением преимущественное применение получило для сплавов цветных металлов: оно отличается высокой производительностью, широко используется в крупносерийном и массовом производствах. Точность отливок 11-12 качества, параметр шероховатости Rz не более 20 мкм.

Литье по выплавляемым моделям - наиболее универсальный способ получения отливок повышенной точности.

Центробежное литье применяется для заготовок, имеющих форму тел вращения; обеспечивает точность 13 ... 15-го качества; параметр шероховатости Rz до 40 мкм.

Одним из эффективных путей снижения расхода материала и уменьшения объема механической обработки конструктивно сложных деталей является перенесение части задач их формообразования на заготовительную стадию, что достигается применением штамповарных и сварнолитых заготовок. Такие сварные заготовки наиболее целесообразно применять для деталей с выступающими частями, существенно увеличивающими расходы формовочных материалов и рабочее время в литейных цехах, а также вызывающими повышенный литейный брак. На основании выбранного вида заготовки, расчета припусков на обработку и размеров заготовки разрабатывается ее рабочей чертеж. В дополнение к рабочему чертежу составляются технические условия на приемку заготовки, отражающие требования механообрабатывающих цехов.

Выбранные методы обработки отдельных поверхностей должны соответствовать их конструктивному виду и обеспечивать требования по точности размеров, геометрической формы и расположения поверхностей, требования по их шероховатости и волнистости, а также требования по параметрам физико-химических свойств поверхностных слоев.

Выбранные методы должны соответствовать типу производства, обеспечивая высокую производительность, минимальную себестоимость и минимальные затраты трудовых, энергетических и материальных ресурсов.

Экономическая точность размеров элементов деталей и параметры шероховатости обработанных поверхностей для основных методов обработки плоских и цилиндрических наружных и внутренних поверхностей приведена в табл. 1.3.1. Табл. 1.3.1 позволяет выбрать методы окончательной обработки поверхностей. Эта же задача выбора метода окончательной обработки поверхностей может быть решена одновременно с установлением последовательности (маршрута) обработки каждого элемента детали с использованием

рекомендаций табл. 1.3.2-1.3.4, где даны варианты маршрутов обработки в зависимости от требований к точности размеров и параметров шероховатости, материала детали и наличия в ТП термической обработки.

Одним из важнейших вопросов при разработке технологических процессов является базирование заготовки. Правильно выполненная установка заготовок в процессе обработки должна обеспечивать:

- 1) определенность расположения детали относительно режущего инструмента или какого-либо устройства станка или приспособления;
- 2) надежную связь между ними.

Число, форма и расположение базирующих поверхностей должны быть выбраны так, чтобы в общем случае обеспечить статически определяемую и достаточно точную установку обрабатываемой детали. Для полной определенности в расположении детали на станке, как известно, необходимо связать соответственно расположенными опорами все шесть степеней свободы обрабатываемой детали.

Однако полная определенность в установке заготовки требуется не всегда. Например, при шлифовании, фрезеровании, строгании или протягивании одной из параллельных плоскостей заготовки установка может быть произведена лишь по одной базирующей поверхности. Там, где возможно, необходимо применять указанные установки, поскольку при этом упрощается конструкция приспособления, снижается его материалоемкость и повышается производительность.

Результатом проработки вопроса о технологических базах и способах установки деталей на станках должна быть разработка эскизов операций с условным обозначением таких баз и зажимных элементов приспособлений.

При проектировании маршрутного ТП из возможных вариантов последовательности выполнения операций необходимо выбрать рациональную последовательность - маршрут обработки или план операций, а при проектировании операционного ТП из возможных вариантов последовательности выполнения переходов для каждой операции - выбрать рациональную (или оптимальную) последовательность.

При маршрутном ТП в число задач завершающего этапа войдут: определение возможного состава оборудования и инструмента и выбор оптимального (рационального) состава; расчет межоперационных припусков, допусков и размеров; определение состава и квалификации исполнителей; нормирование операций; расчет технико-экономических показателей маршрутного ТП; формирование маршрутных карт.







1.3.2. Примерные маршруты обработки наружных цилиндрических поверхностей

Последовательность операции при обработке с полем допуска						Параметры шероховатости, мкм
IT14-IT12	IT11-IT10	IT9-IT7	IT6	IT5	IT4-IT3	
1.2.3.О 4.О.ТО 1.Ш 4.ТО.Ш						Rz = 80...20
	1.2.3.Оп.Оч 1.2.О.Ш 4.Оп.Оч.ТО 4.Оп.ТО.Ш					Rz = 20 - Ra = 2,5
		1.2.3.Оп.Оч.От 1.2.О.Ш 1.Шп.Шч 4.О.ТО.Ш 4.Шп.ТО.Ш				Ra = 1,25 ... 0,63
		3.Оп.Оч.ПО 3.О.ПОп.ПОч. 3.О.Оч.От	1.2.3.Оп.Оч.От.ПО 1.О.Шп.Шт.ПО 1.О.Ш.С 4.О.Шп.ТО.Шт 4.О.Шп.ТО.Шт.С 4.О.ТО.Шч.С	4.Оп.Оч.ТО.Шч.С. 4.О.Шп.ТО.Шч.Шт.С 4.О.Шп.ТО.Шч.Д. 3.О.Оч.От		Ra = 0,32 ... 0,16

Последовательность операции при обработке с полем допуска						Параметры
IT14-IT12	IT11-IT10	IT9-IT7	IT6	IT5	IT4-IT3	шероховатости, мкм
		3. Оп.Оч.ПОп.ПОч. 3. Оп.Оч.От.ПОч.ПОт 4. Оп.ТОт.Шп.Шт.ПО		1. Оп.Оч.Шп.Шт.Сп.Сч 3. Оп.Оч.ТО.Шч.Сч 4. Оп.Оч.ТО.Шч.Шт.Д 4. Оп.Оч.ТО.Шч.Дп.Дч 4. Ш.ТО.Ш.Сп.Сч		Ra = 0,08 ... 0,04
					4. Оп.Оч.ТО.Шч.Шт. Дп.Дч.Дт 4. Ш.ТО.Шп.Шт. Дп.Дч.Дт	Rz = 0,1 ... 0,025

Обозначения: О - обтачивание; Ш - шлифование; С - суперфиниширование; ПО - полирование;  
 Д - доводка; ТО - термическая обработка; п - предварительная обработка;  
 ч - чистовая обработка; т - тонкая обработка: 1 - незакаленные стали; 2 - чугуны;  
 3 - цветные металлы и сплавы; 4 - закаленные стали

1.3.3. Примерные маршруты обработки внутренних цилиндрических поверхностей

Последовательность операции при обработке с полем допуска						Параметры шероховатости, мкм
IT14-IT12	IT11-IT10	IT9-IT7	IT6	IT5	IT4-IT3	
1.2.3.C 1.2.3.3 1.2.3. PT 4.C.TO 4.3. TO 4.PT. TO						Rz = 80...20
	1.2.3.C.3.P 1.2.3.C.3 PT 1.2.3.C.PT.P 4. C.3.TO.Ш 4. C. PT.TO 4. 3п.3ч.TO.Ш					Rz = 20 ... 2,5
		1.2.3.ПУ.P 1.2.3.C.3.Рп.Рч 1.2.3.C.Рп.РТч 1.2.3.C.3.АР 1.2.3.C.П 4.C.РТ.TO.Ш 4.РТп.Рч.TO.Ш 4.C.3.TO.Ш 4 ПУ.TO.X				Rz = 1,25 ... 0,63

Последовательность операции при обработке с полем допуска						Параметры шероховатости, мкм
IT14-IT12	IT11-IT10	IT9-IT7	IT6	IT5	IT4-IT3	
			1.2.3.РУ.Рт.Рч 1.2.3.С.З.Рп.Рч 1.2.3.С.З.АРп.АРч 1.2.3.РТ.АРп.Арч 1.2.3.С.З.П 4.РТ.ТО.Ш.Х 4.С.З.ТО.Ш.Х 4.С.П.ТО.Х 4.РУ.Р.ТО.Х	4.РТ.ТО.Ш.Х.Д 4.С.З.ТО.Ш.Х.Д 4.С.П.ТО.Хп.Хч 4.РУ.ТО.Х.Д 4.С.РТ.АР.ТО.Х.Д		Ra=0,32...0,16
				2.РУ.Х.Дп.Дч 2.С.З.Р.Х.Дп.Дч 4.РУ.Р.ТО.Х.Дп.Дч 4.С.З.Р.ТО.Дп.Дч 4.С.П.ТО.Х.Д 4.РТ.АР.ТО.Дп.Дч 4.С.РТ.АР.ТО.Х.Д	4.РУ.Р.ТО.Х.Дп.Дч 4.С.З.Р.ТО.Дп.Дч 4.С.П.ТО.Х.Дп.Дч 4.РТ.АР.ТО.Дп.Дч 4.С.РТ.АР.ТО.Х.Дп.Дч	Ra=0,08...0,04
					4.РУ.Р.ТО.Х.Дп.Дч.Дт 4.С.З.Р.ТО.Дп.Дч.Дт 4.С.П.ТО.Х.Дп.Дч.Дт 4.РТ.АР.ТО.Дп.Дч.Дт 4.С.РТ.АР.ТО.Х.Дч.Дт	Rz=0,1...0,025

Обозначения: С - сверление (рассверливание); З - зенкерование (координатное); РУ - ружейное сверление; Р - развертывание; РТ - растачивание; АР - алмазное растачивание; П - протягивание, Ш - шлифование; Х - хонингование; Д - доводка; ТО - термическая обработка; п - предварительное, ч - чистовое, т - тонкое; 1 - незакаленные стали, 2 - чугуны; 3 - цветные металлы и сплавы; 4 - закаленные стали.

### 1.3.4. Примерные маршруты обработки плоских поверхностей

Последовательность операции при обработке с полем допуска						Параметры шероховатости, мкм
IT14-IT12	IT11-IT10	IT9-IT7	IT6	IT5	IT4-IT3	
1.2.3.С 1.2.3.Ф 1.2.3.О 4.С.ТО 4.Ф. ТО 4. О. ТО						Rz= 80...20
	1.2.4.ТО.Шп 1.2.3. Фп. Фч 1.2.Ф. Шп 4.Ф. ТО.Шп 4.С.ТО.Шп 4.О.ТО.Шп					Rz=20 ... Ra=2,5
		1.2.3.С.П 1.2.3.Ф.П 1.2.Ф.Шч 4.Ф.ТО.Шч 4.О.ТО.Шч. 4.С.ТО.Шч.	1.2.Фп.Фч.Шч 3.Фп.Фч.ПО 4.Фп.Фч.ТО.Шч 4.Оп.Оч.ТО.Шч			Ra=1,25...0,63
		3.Фп.Фч.ПОч 3.Оп.Оч.ПОч	1.2.3.С.Фт.ШБ 1.2.3.Фп.Фт.ШБ 1.2.Фп.Фч.Шч.ПО 4.Фп.Фч.ТО.Шч.Д 4.С.Фт.ТО.Шч.Д 4.Ф.ТО.Шп.Шч.Д 4.О.Шп.ТО.Шч.Д	4.С.ТО.Шч.Шт.Д 4.Ф.ТО.Шч.Шт.Д 4.Ф.Шп.ТО.Шч.Шт.Д 4.О.Шп.ТО.Шч.Шт.Д		Ra=0,32...0,16

Последовательность операции при обработке с полем допуска						Параметры
IT14-IT12	IT11-IT10	IT9-IT7	IT6	IT5	IT4-IT3	шероховатости, мкм
		3.Фп.Фч.ПОч.ПОт 3.Оп.Оч.ПОч.ПОт		1.2.Ф.Шп. Шч. Шт.ПО 4.С.ТО.Шп.Шч.Шт. 4.Ф.ТО.Шп.Шч.Шт 4.Ф.ТО.Шп.Шч.Шт.Д 4.О.ТО.Шп.Шч.Шт.Д	4.С.ТО.Шп.Шч.Шт. Дп.Дч. 4.Ф.ТО.Шп.Шч.Шт. Дп.Дч 4.О.ТО.Шп.Шч.Шт. Дп.Дч 4.Ф.ТО.Шп.Шч. Дп.Дч	Ra=0,08...0,04
					4.С.ТО.Шп.Шч.Шт. Дп.Дч.Дт 4.Ф.ТО.Шп.Шч.Шт. Дп.Дч.Дт 4.О.ТО.Шп.Шч. Дп.Дч.Дт	Rz=0,1...0,025

Обозначения. С - строгание; Ф - фрезерование; П - протягивание; О - обтачивание торцов; Ш - шлифование; ПО - полирование; Д - доводка; ТО - термическая обработка; п - предварительное, ч - чистовое; т - тонкое; 1 - незакаленные стали; 2 - чугуны; 3 - цветные металлы и сплавы, 4- закаленные стали.

При операционном ТП в число задач завершающего этапа войдут: определение возможных составов переходов для каждой операции и выбор оптимальной (рациональной) последовательности их выполнения; определение возможных составов инструмента и выбор оптимального (рационального); определение возможных схем наладок инструментов и выбор оптимальной (рациональной) схемы для каждой операции; расчет режимов резания; расчет точности обработки; нормирование переходов; расчет технико-экономических показателей операционного ТП; формирование операционных карт.

Основой для решения главной задачи определения оптимальных (или рациональных) маршрутов (планов операций) и планов переходов в каждой операции являются типовые маршрутные и операционные ТП, анализ конструктивно-технологических характеристик - кодов изделий, для которых разрабатывается ТП, а также анализ единичных ТП действующего производства для изделий, имеющих конструктивно-технологическую общность с изделиями, для которых разрабатывается ТП.

Кроме того, должны быть учтены тип производства, ограничения, если таковые будут, с использованием оборудования, опыт и традиции отрасли или доводы изготовителя.

Ниже даны рекомендации, отражающие основные подходы к выбору маршрута обработки деталей.

1. *Принцип дифференцированного разделения ТП механической обработки на стадии.* Принято различать три стадии обработки: *черновую* (предварительную), *чистовую* и *отделочную* (окончательную), которые выполняются в указанной последовательности для отдельных элементов и детали в целом. Реализация этого принципа позволяет во многих случаях более рационально использовать оборудование и обеспечить более высокое качество изготовления деталей. Часто этот принцип используют в пределах одной операции.

2. *Зависимость последовательности обработки от выбранной технологической базы.*

Согласно этому принципу первоначально обрабатывают чистото, а иногда и окончательно, технологические базы, а затем обработка детали проводится в последовательности, обратной точности размеров обрабатываемых элементов (поверхностей) детали. Последними обрабатываются обычно поверхности наиболее точные и имеющие наибольшее значение для детали. В конце маршрута часто выносят обработку легко повреждаемых поверхностей, таких как наружные резьбы и др. Операции второстепенного характера

(сверление мелких отверстий, снятие фасок, прорезание канавок, зачистка заусенцев и др.) также выполняют в последнюю очередь на стадии чистовой обработки. Так, для рассматриваемой в качестве примера детали шлицевого вала в первую очередь должна быть выполнена фрезерно-центровальная операция - фрезерование торцов и сверление центровых отверстий, являющихся технологической базой, а завершающая круглошлифовальная операция - тонкое шлифование по диаметру, являющегося наиболее точным размером детали.

3. *Принцип выделения решающих операций.* По этому принципу сначала должны быть обработаны поверхности, при обработке которых могут проявиться дефекты заготовки. В случае обнаружения этих дефектов заготовку либо бракуют без повторной (окончательная) механическая обработка, по крайней мере части наиболее дальнейших затрат труда, либо принимают меры для исправления брака.

4. *Наличие в ТП операции термической обработки.* Если в процессе механической обработки деталь подвергается термической обработке, то весь ТП разделяют на две части: до термической обработки и после нее. Такое разделение вызвано возможными деформациями детали в процессе термической обработки, а поэтому после термической обработки должна быть проведена высокоточных элементов детали. В ряде случаев может быть введена дополнительная операция - правка детали.

5. *Принцип согласования времени выполнения отдельных операций* - непосредственно связан с загрузкой оборудования. В крупносерийном и массовом производствах, выделяя в маршруте изготовления детали операции, необходимо обеспечить равенство или кратность времени их выполнения с тактом работы, обусловленным программным заданием, что, однако, может быть учтено только после нормирования операций.

6. *Наличие операций технического контроля.* Операции технического контроля обычно вводят после обработки, где вероятно повышенная доля брака, перед сложными и дорогостоящими операциями, после обработки наиболее ответственных рабочих поверхностей детали, а также в конце обработки.

Выбор типа и модели станка может быть осуществлен по технологическому классификатору деталей машиностроения и приборостроения на основе анализа конструкторско-технологического кода детали.

Способ индивидуального получения размеров может быть оправдан в условиях

единичного и мелкосерийного производства. При серийном и тем более массовом производствах должен быть принят способ автоматического получения размеров. Существенным при выборе модели станков является также вопрос о реализации принципа концентрации или дифференциации операций в обрабатываемом ТП. Принятое построение операции определяет наладку станка, которая может быть одно- и многоинструментальной, а также тип приспособления для установки обрабатываемых деталей, которые могут быть одноместными и многоместными. В условиях массового производства в ряде случаев целесообразно разработать технологическую операцию на специальном станке. В этом случае должно быть разработано задание на проектирование станка.

Пути повышения производительности операций ТП могут быть выявлены в результате анализа оперативного времени  $T_{оп}$ , представляющего собой сумму основного времени  $T_{осн}$  и вспомогательного времени  $T_{всп}$ , выполнения операции.

При этом учитывается, что время технического и организационного обслуживания рабочего места, а также время регламентированных перерывов принимают в процент от оперативного времени и таким образом от построения операций они непосредственно не зависят.

Основное (машинное) время, затрачиваемое на формообразование детали в процессе выполнения отдельной технологической операции с целью придания ее поверхностям и поверхностным слоям параметров, заданных в рабочих чертежах деталей и технических условиях на их изготовление, зависит от многих факторов технического и организационного характера.

К числу таких основных факторов, выбор рациональных решений по которым проводится при разработке ТП, относятся: конструкция, геометрия и инструментальные материалы режущих инструментов; режимы резания и прежде всего глубина резания, подача и скорость резания; состав и расход смазочно-охлаждающей жидкости; число переходов и рабочих ходов для обработки одних и тех же поверхностей в составе операции; число рабочих инструментов, одновременно выполняющих различные переходы; число рабочих инструментов, задействованных в одном и том же переходе.

Значительное сокращение основного времени достигается также при работе методом врезания и применением комбинированных инструментов, выполняющих несколько переходов за один рабочий ход.

Основные составляющие вспомога-

тельного времени:  $T_{уст}$  - время на установку, закрепление и снятие детали со станка;  $T_{упр}$  - время управления приводами станка;  $T_{с.и}$  - время на смену инструмента;  $T_{поз}$  - время на смену позиций;  $T_{инд}$  - время на индексацию новых позиций.

Суммарное вспомогательное время  $T_{всп}$  при работе на универсальных станках в серийном производстве составляет 25 ... 55 % от штучного времени. Таким образом, сокращение  $T_{всп}$  является весомым резервом в повышении производительности технологических операций.

Учитывая, что  $T_{уст}$  составляет 50 ... 60 % в норме  $T_{всп}$ , важно при организации операций не только сокращать  $T_{уст}$ , но и совмещать это время с основным технологическим временем  $T_{осн}$ .

Распространенным способом совмещения вспомогательного времени с основным является применение дублирующих приспособлений на загрузочных позициях.

В то время как заготовки, закрепленные в одном приспособлении, обрабатываются на рабочих позициях, в дублирующем приспособлении производят смену и установку новых заготовок. Во время следующего цикла дублирующее приспособление вводится в работу, а первое становится на загрузочную позицию. Наиболее эффективным является метод работы с непрерывным циклом, когда съем и загрузка заготовки проводятся на ходу.

### 1.3.2. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

При проектировании технологических процессов механической обработки заготовок чаще всего возникают задачи правильного и обоснованного определения операционных размеров и допусков на них. Они могут быть решены с помощью размерного анализа.

Обычно допуски и предельные отклонения на размеры деталей определяют, исходя из расчета сборочных размерных цепей. Это во многом предопределяет последовательность обработки отдельных поверхностей, которая не всегда может быть выдержана при обработке заготовок на настроенных станках, поскольку технологические базы могут не совпадать с конструкторскими. На основе выявления и расчета размерных цепей возникает необходимость устанавливать технологические размеры для выполнения отдельных операций и переходов. Однако может оказаться, что принятая последовательность обработки является неприемлемой, так как допуски на технологические размеры окажутся трудно выполнимыми. При этом важно, чтобы точность выполнения технологических размеров  $S$  не

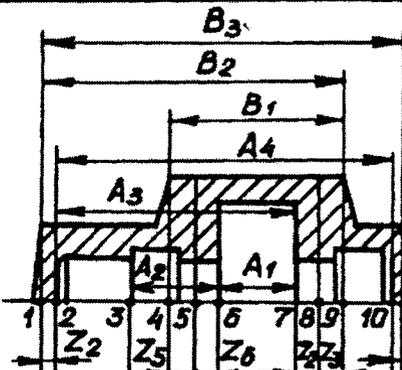
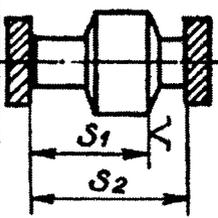
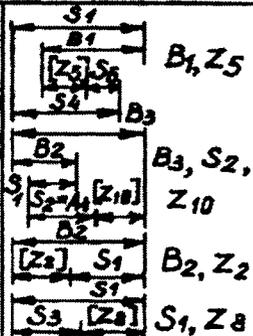
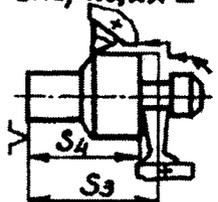
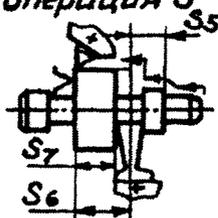
Операции	Размерная схема процесса обработки	Размерные цепи и результаты анализа
		
<p><b>Операция 1</b></p> 	<p><math>S_1</math></p> <p><math>S_2</math></p>	
<p><b>Операция 2</b></p> 	<p><math>S_3</math></p> <p><math>S_4</math></p>	<p><math>S_3</math></p> <p><math>S_4 = A_3 [Z_7]</math> <math>S_3, S_4, Z_7</math></p>
<p><b>Операция 3</b></p> 	<p><math>S_5</math></p> <p><math>S_6</math></p> <p><math>S_7</math></p>	<p><math>[A_2], S_7</math></p> <p><math>S_5, S_6</math> <math>S_5</math></p> <p><math>S_6</math></p> <p><math>[Z_6], S_7 = A_1</math> <math>S_6, S_7, Z_6</math></p>

Рис. 1.3.4. Размерная схема процесса механической обработки заготовки ступенчатого валика

превышала среднеэкономическую точность принятых методов обработки. В этом случае необходимо пересмотреть последовательность обработки поверхностей заготовок и в целом рассматриваемый вариант технологического процесса изготовления детали.

Размерный анализ технологического процесса механической обработки проводится в следующем порядке (рис. 1.3.4). Вычерчивается совмещенный эскиз детали и заготовки (в одной или нескольких проекциях), на котором указывают размеры детали  $A_i$  с допусками, заданными конструктором, и размеры заготовки  $B_j$ , подлежащие определению. В соответствии с предварительно разработанным технологическим процессом обработки заготовки на эскиз детали условно наносят припуски  $Z_n$ , где  $n$  - номер поверхности, к которой относится припуск. Все поверхности заготовки и детали нумеруют по порядку, слева направо, и через них проводят вертикальные линии. Между вертикальными линиями указывают технологические размеры  $S_k$ , получаемые в результате выполнения каждого технологического перехода (при этом точка ставится на линии, соответствующей поверхности, которая используется в качестве базовой при установке заготовки или настройки инструмента). Расчет размерных цепей начинают с последней операции, т.е. по размерной схеме снизу вверх. Для размерного анализа важно, чтобы в каждой новой цепи был неизвестен только один размер. При этом замыкающим размером (на рис. 1.3.4 он заключен в квадратные скобки) может быть либо припуск, либо конструкторский размер детали.

Выявление технологических размерных цепей рекомендуется проводить с помощью графов. Порядок построения графа технологических размерных цепей (рис. 1.3.5) следующий. Вначале строят производное дерево, затем исходное и после этого проводят совмещение деревьев. Для построения произ-

водного дерева в качестве корня (вершины) следует выбрать поверхность, от которой начинается обработка заготовки (в рассматриваемом примере в качестве вершины графа принята поверхность 9). Такую вершину обычно вычерчивают в виде двойного кружка и из него проводят ребра, соответствующие выполняемым от этой вершины размерам.

На ориентированных концах этих ребер указывают в виде кружков вершины (поверхности), в которые они упираются стрелками. Ребра производного дерева, изображающие размеры заготовки, можно не ориентировать (на рис. 1.3.5 они выполнены в виде двойных линий). Аналогичным образом строится исходное дерево, ребра которого изображают неориентированными в виде дуг (конструкторские размеры) и ломаных линий (припуски на обработку).

Любой замкнутый контур совмещенного графа образует размерную цепь, у которой ребро исходного дерева является замыкающим звеном, а ребра производного дерева составляющими звеньями. Размерные цепи следует составлять таким образом, чтобы припуски на обработку не являлись составляющими звеньями.

Свои особенности имеет размерный анализ технологических процессов механической обработки заготовок для корпусных деталей. При построении размерной схемы таких процессов следует учитывать, что размеры, определяющие, например, положение основных отверстий корпусной детали, обрабатываемых на нескольких операциях, имеют одинаковые номинальные значения, но выполняются с различной точностью. В этой связи на размерной схеме линия, определяющая положение оси основного отверстия, выполняется прерывистой (рис. 1.3.6). На рис. 1.3.6 изображена размерная схема обработки заготовки корпусной детали за три операции, а на рис. 1.3.7 - граф размерных связей.

Технологическая размерная цепь, таким образом, представляет собой совокупность размеров, образующих замкнутый контур и определяющих взаимное расположение поверхностей (или осей) заготовки. Замкнутость размерной цепи приводит к тому, что на размеры, входящие в размерную цепь, не могут назначаться независимые допуски и отклонения. Любая технологическая размерная цепь (см. рис. 1.3.4 и 1.3.6) имеет одно замыкающее звено и два или более составляющих звеньев (увеличивающих или уменьшающих) звеньев. В процессе обработки заготовки замыкающее звено получается последним.

Технологические размерные цепи обычно решают методом полной взаимозаменяемости.

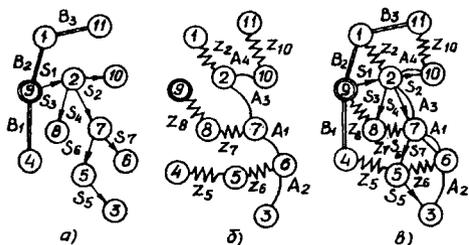


Рис. 1.3.5. Граф размерных связей процесса механической обработки заготовки ступенчатого валика: а - производное дерево; б - исходное дерево; в - совмещенный граф

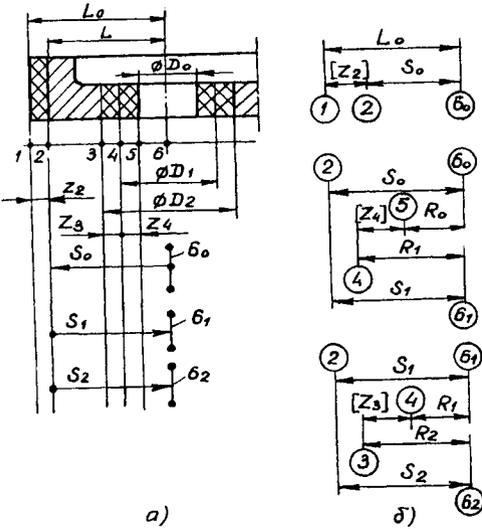


Рис. 1.3.6. Размерная схема (а) и технологические размерные цепи (б) процесса механической обработки заготовки корпусной детали

При решении прямой задачи, когда по параметрам замыкающего звена (номинальное значение, верхнее и нижнее отклонения и т.п.) требуется определить параметры составляющих звеньев, для упрощения определения допусков на составляющие размеры (за исключением одного из них) рекомендуется определять среднюю точность по качеству составляющих звеньев в числе единиц допуска  $a_c$  в зависимости от значения допуска замыкающего звена  $T_{A\Delta}$  (мкм):

$$a_c = \frac{T_{A\Delta}}{\sum_1^m \xi_{A_i} |i_{A_i}|}$$

где  $m$  - число составляющих (увеличивающих и уменьшающих) звеньев;  $\xi_{A_i}$  - передаточное отношение, роль которого выполняют тригонометрические функции, используемые при проектировании составляющих звеньев на направление замыкающего звена (для цепей с параллельными звеньями  $\xi_{A_i} = +1$  - для увеличивающих звеньев и  $\xi_{A_i} = -1$  - для уменьшающих звеньев),  $i_{A_i}$  - значение единицы допуска для диапазона размеров, которому принадлежит увеличивающий или уменьшающий размер цепи  $A_i$ .

При назначении допусков составляющих звеньев  $T_{A_i}$  размерной цепи должно выполняться условие

$$T_{A\Delta} = \sum_1^m \xi_{A_i} |T_{A_i}|$$

Координаты середин полей допусков составляющих звеньев  $Ec_{A_i}$  связаны с координатой середины поля допуска  $Ec_{A\Delta}$  уравнением

$$Ec_{A\Delta} = \sum_1^m \xi_{A_i} Ec_{A_i}$$

которое по написанию аналогично основному уравнению размерной цепи

$$A_{\Delta} = \sum_1^m \xi_{A_i} A_i$$

где  $A_{\Delta}$  - номинальный размер замыкающего звена.

При назначении допусков  $T_{A_i}$ , координат середин полей допусков  $Ec_{A_i}$ , а также верхних  $Es_{A_i}$  и нижних  $Ei_{A_i}$  отклонений полей допусков составляющих звеньев, связанных между собой соотношениями:

$$Es_{A_i} = Ec_{A_i} + \frac{T_{A_i}}{2}$$

и

$$Ei_{A_i} = Ec_{A_i} - \frac{T_{A_i}}{2}$$

следует учитывать способ контроля точности размеров при изготовлении детали. Если кон-

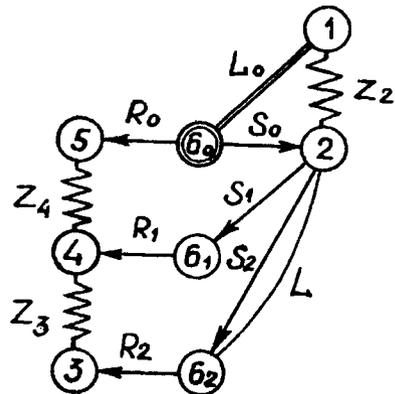


Рис. 1.3.7. Граф размерных связей процесса механической обработки заготовки корпусной детали

троль точности осуществляется калибрами, то допуски и отклонения составляющих размеров должны строго соответствовать стандартизованным значениям. Если контроль точности выполняемых размеров производится универсальными инструментами, данное правило можно не соблюдать.

Контроль правильности решения размерных цепей проводится с помощью уравнений:

$$Es_{A_{\Delta}} = \sum_1^m \xi_{A_i} Ec_{A_i} + \frac{\sum_1^m |\xi_{A_i}| T_{A_i}}{2}$$

и

$$Ei_{A_{\Delta}} = \sum_1^m \xi_{A_i} Ec_{A_i} - \frac{\sum_1^m |\xi_{A_i}| T_{A_i}}{2}$$

Некоторые особенности имеет методика расчета размерных цепей, у которых замыкающим звеном является припуск на обработку (рассмотрим ее на примере цепей с параллельными звеньями). Вначале табличным способом или расчетом определяют его минимальную величину  $Z_{\min}$ . Затем определяют значение наименьшего предельного размера увеличивающего звена  $S_{g \min}$  или наибольшего предельного размера уменьшающего звена  $S_{l \max}$ :

$$Z_{\min} = \sum_1^{n_g} S_{g \min} - \sum_1^{n_l} S_{l \max},$$

где  $n_g$  и  $n_l$  - соответственно число увеличивающих и уменьшающих звеньев.

После этого для данного звена устанавливают допуск, назначают предельные отклонения (верхнее  $Es_S$  и нижнее  $Ei_S$ ) и определяют его номинальный размер

$$S_g = S_{g \min} - Si_{S_g}$$

или

$$S_l = S_{l \max} - Es_{S_l}.$$

Далее определяют номинальный размер припуска  $Z$  и его наибольшее значение  $Z_{\max}$ :

$$Z = \sum_1^{n_g} S_g - \sum_1^{n_l} S_l$$

$$Z_{\max} = \sum_1^{n_g} S_{g \max} - \sum_1^{n_l} S_{l \min}.$$

Находят верхнее  $Es_Z$  и нижнее  $Ei_Z$  предельные отклонения припуска:

$$Es_Z = Z_{\max} - Z;$$

$$Ei_Z = Z_{\min} - Z.$$

Правильность расчетов проверяют по уравнениям

$$Es_Z = \sum_1^{n_g} Es_{S_g} - \sum_1^{n_l} Ei_{S_l},$$

$$Ei_Z = \sum_1^{n_g} Ei_{S_g} - \sum_1^{n_l} Es_{S_l}.$$

В результате проведения размерного анализа выясняется, может ли принятый вариант технологического процесса изготовления детали обеспечить ее точность в соответствии с чертежом.

### 1.3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**Методы и основные принципы автоматизированного проектирования.** Под автоматизацией проектирования понимают систематическое использование ЭВМ в процессе проектирования при обоснованном распределении функций между человеком и ЭВМ и выборе методов автоматизированного решения технологических задач.

По степени углубленности разработок различают несколько уровней проектирования: разработку принципиальной схемы технологического процесса; проектирование технологического маршрута обработки детали; проектирование технологических операций; разработку управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением.

При решении технологической задачи взаимодействия технолога-проектировщика с ЭВМ представляют процесс обмена информацией в определенном режиме. Различают два основных режима: пакетный (автоматический) и диалоговый (оперативный). При пакетном режиме технолог-пользователь и программист, как правило, не имеют прямой связи с ЭВМ. Тексты программ, результаты их проверки и решения технологической задачи передаются через оператора машине. Пакет прикладных программ представляет комплекс программ, работающих под управлением программы-монитора, и предназначен для

решения определенного класса близких друг другу технологических задач, например, проектирование технологического маршрута обработки деталей определенного класса (группы), сборки узлов и сборочных операций заданного типа.

При оперативном режиме технолог-проектировщик-пользователь непосредственно связан с ЭВМ через индивидуальный терминал или абонентский пункт (пишущую машинку, телетайп, дисплей). Он получает сообщение от ЭВМ достаточно быстро, через интервал времени, не нарушающий естественного хода его мысли. Диалоговый режим целесообразно применять тогда, когда этот метод является единственным или он эффективен.

Диалоговый режим эффективен при решении творческих задач, когда требуется эвристический подход (распознавание геометрических образов деталей, размерных и топологических связей между элементарными геометрическими образами с целью оптимального выбора схем базирования, проектирование маршрута обработки, сборки и др.). Эти и многие другие задачи могут быть решены эффективно лишь путем синтеза творческих процессов человека и "способностей" машинных программ. Вместе с тем при диалоговом режиме значительно увеличиваются затраты на создание программного обеспечения, возрастают затраты на проектирование. Можно создавать пакеты программ, позволяющих накапливать опыт проектирования и формировать алгоритмы классификации, генерирования понятий, поведения. Поэтому возникла и решается задача создания автоматизированных систем проектирования технологических процессов в режиме диалога с последующим переходом к пакетному (автоматическому) режиму более высокого уровня путем использования программ обучения.

При создании систем автоматизированного проектирования (САПР), в том числе проектирования технологических процессов, учитывают ряд положений. САПР создается как система, в которой проектирование ведется с помощью ЭВМ. САПР строится как открытая и развивающаяся система. САПР разрабатывают продолжительное время, поэтому экономически целесообразно вводить ее в эксплуатацию по частям по мере готовности. Созданный базовый вариант системы может расширяться. Кроме того, возможно появление новых, более совершенных математических моделей и программ, изменяются также и объекты проектирования.

САПР создается как иерархическая система, реализующая комплексный подход к

автоматизации на всех уровнях проектирования. Так, в САПР технологических процессов обычно включают подсистемы структурного, функционально-логического и элементного проектирования (разработки принципиальной схемы технологического процесса, проектирования маршрута, проектирования операции, разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ). Иерархическое построение САПР относится также к специальному программному обеспечению и к техническим средствам (центральный вычислительный комплекс и автоматизированные рабочие места).

САПР представляет собой совокупность информационно-согласованных подсистем. Обслуживание всех или большинства последовательно решаемых задач ведется информационно-согласованными программами. Плохая информационная согласованность приводит к тому, что САПР превращается в совокупность автономных программ.

САПР должна быть инвариантной системой, т.е. универсальной или типовой. Структурными частями САПР являются подсистемы. Подсистема - выделяемая часть системы, с помощью которой можно получить законченные результаты проектирования. Каждая подсистема содержит элементы обеспечения.

Предусматриваются следующие обеспечения автоматизированного (автоматического) проектирования:

*методическое обеспечение* - совокупность документов, устанавливающих состав и правила отбора и эксплуатации средств обеспечения проектирования, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования;

*информационное обеспечение* - совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования, представленных в заданной форме; информационное обеспечение включает базу данных, содержащую нормативно-справочные материалы и базу знаний, в которой находятся правила создания вариантов структуры технологического процесса;

*математическое обеспечение* - совокупность математических методов, математических моделей и алгоритмов, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме;

*лингвистическое обеспечение* - совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка и методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для проектирования, и представленных в заданной форме;

*программное обеспечение* - совокупность

машинных программ, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме. Программное обеспечение делят на две части: 1) *общее программное обеспечение*, которое разрабатывается для решения любой задачи и особенности САПР не отражает; в САПР общее (системное) программное обеспечение представляет собой операционную систему; 2) *специальное программное обеспечение*, которое включает все программы решения конкретных проектных задач;

*техническое обеспечение* - совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для проектирования.

*К техническому обеспечению САПР предъявляются ряд требований:*

достаточность вычислительных ресурсов (производительность и емкость памяти) для решения основных проектно-технологических задач;

приближенность к рабочим местам проектировщика, удобство общения технолога с ЭВМ;

обеспечение коллективного выполнения проектных работ (обеспечение этих требований учитывает особенности технического обеспечения (ТО) САПР. Основными компонентами ТО являются: рабочие станции, объединяющие ЭВМ, периферийные устройства. Рабочие станции объединяются в рабочую сеть; для выполнения трудоемких вычислительных процедур используются высокопроизводительные суперЭВМ);

*организационное обеспечение* - совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и её подразделений, связи между ними, их функции, а также форму представления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов, необходимых для выполнения проектирования.

При автоматизированном проектировании оптимальных технологических процессов механосборочного производства нужно учитывать:

1) системность автоматизированного проектирования на основе характера и взаимосвязи факторов, влияющих на построение технологического процесса, определяющих обеспечение заданного качества изготавливаемых изделий и экономическую эффективность разрабатываемой технологии;

2) оптимизацию проектируемого технологического процесса, предусматривающую комплексную взаимосвязь его структуры, параметров качества изготавливаемого изделия и режимов обработки;

3) рациональное сочетание типовых и индивидуальных технологических решений на

всех уровнях проектирования.

Повышение уровня типизации, унификации и стандартизации при разработке технологических процессов во многом определяет эффективность автоматизированного проектирования.

*Автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП)* включает проектирование технологических процессов как заготовительного производства, так и обработки резанием и сборки, проектирование технологической оснастки, специального инструмента и нестандартного оборудования.

Под рабочим процессом в информационной системе понимают преобразование входных данных в выходные. В данной подсистеме это означает преобразование информации о детали, представленной в виде чертежа, в технологическую документацию. Обычно этот процесс включает: разработку принципиальной схемы технологического процесса; проектирование технологического маршрута обработки детали; проектирование технологических операций с выбором оборудования, приспособлений и инструмента, а также с назначением режимов резания и норм времени; разработку управляющих программ для станков с ЧПУ; расчет технико-экономических показателей технологических процессов; разработку необходимой технологической документации.

Непосредственное участие проектировщика позволяет принимать решения об оптимальном распределении функций между ЭВМ и человеком.

Другим важным и необходимым элементом рабочего процесса является информационное обеспечение - характеристика обрабатываемых материалов, каталоги станочного оборудования, режущего и измерительного инструмента и т.д.

Работы по интеграции автоматизированных подсистем конструкторского и технологического обеспечения в единую систему были начаты в нашей стране в начале 80-х годов. Одной из первых подобных САПР стала система "КАС ТПП". Широко использовалась система "КАПРИ", в функции которой входит конструирование детали и сборочных единиц, компоновка, выбор заготовок, синтез маршрутно-операционной технологии, подготовка управляющих программ с ЧПУ. Эти работы направлены на создание комплексной автоматизации технологического проектирования и инструментальных средств формирования автоматизированных подсистем. Заслуживает внимание отечественные конструкторско-технологические САПР методом адресации "КОМПАС" и "СПРУТ".

Тенденцией современного этапа автоматизации проектирования является создание комплексных (интегрированных) систем, осуществляющих конструирование изделий, технологическое проектирование, подготовку управляющих программ для оборудования с программным управлением, изготовление деталей, сборку изделия, упаковку и транспортирование готовой продукции. Особенно важны такие системы для гибкого автоматизированного производства в машиностроении.

**Структурный синтез при проектировании технологических процессов.** В основе решения задач структурного синтеза различной сложности лежит перебор вариантов счетного множества. При переборе каждая проба включает: создание (поиск) очередного варианта, принятие решения о замене ранее выбранного варианта новым и продолжение или прекращение поиска новых вариантов.

Задачи структурного синтеза при автоматизированном технологическом проектировании зависят от уровня сложности. В наиболее простых задачах синтеза (первого уровня сложности) задаются структурой технологического процесса или его элементов (операции, перехода). В этом случае часто используют таблицы применимости (табличные модели).

Для полного перебора вариантов структуры из конечного множества необходимо задавать перечень всех элементов этого множества (второй уровень сложности структурного синтеза). Такой перечень создается в виде каталога типовых вариантов структуры, например, типовых технологических маршрутов. Тогда для данного класса (группы, под-

группы или вида) деталей устанавливается так называемый обобщенный маршрут обработки. Он включает перечень операций обработки, характерный для определенного класса, подкласса или группы деталей. Перечень является упорядоченным и представляет собой множество существующих индивидуальных маршрутов. Эти маршруты имеют типовую последовательность и содержание, причем для предприятия или отрасли они отражают передовой производственный опыт.

На рис. 1.3.8 приведена схема синтеза структуры ТП из обобщенной структуры ТП. Обобщенная структура  $M_y^*$ , состоящая из типовых маршрутов, представляется как пересечение множеств

$$M_y^* = \bigcup_{i=1}^n M_i \text{ и } M_i \subset M_y^* .$$

Необходимым условием включения индивидуального маршрута в обобщенный является наличие области пересечения операций, например, маршрутов  $M_i$  и  $M_j$  как не пустого множества  $M_i \cap M_j \neq \emptyset$ . Важной характеристикой (критерием оптимальности) формирования обобщенного маршрута является мощность пересечения множеств ( $M_{пер}$ ) операций индивидуальных маршрутов [число одинаковых операций, входящих в это пересечение без учета отношения порядка элементов (операций) множества]:

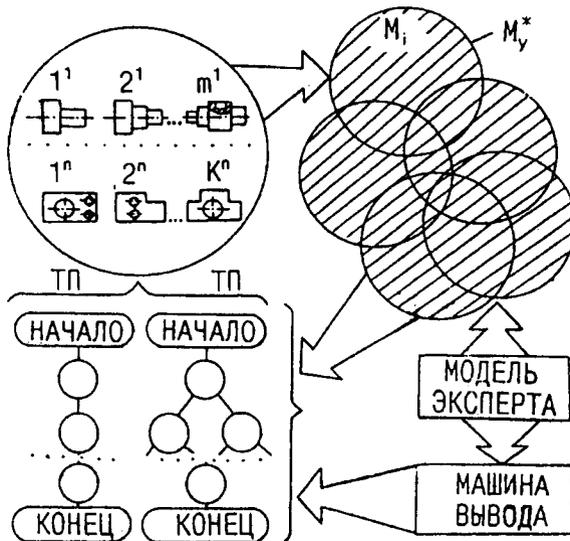


Рис. 1.3.8. Схема синтеза структуры ТП из обобщенной структуры ТП

$|M_{\text{пер}}| = \bigcap_{i=1}^n M_i (i = 1, 2, \dots, n) \rightarrow \max$ ; тогда мощ-

ность обобщенного маршрута должна стремиться к минимуму:

$$|M_y^*| = \bigcup_{i=1}^n M_i (i = 1, 2, \dots, n) \rightarrow \min,$$

где  $\bigcap, \bigcup$  - знаки пересечения и объединения множеств.

Каждой операции обобщенного маршрута соответствует логическая функция. Логическая функция зависит от условий, учитывающих геометрические особенности поверхностей, вид заготовки, требуемую точность обработки, качество поверхностного слоя детали, размер партии, габариты деталей.

В общем случае логическая функция выбора  $k$ -й операции

$$f_k = \bigvee_{j=1}^{n_2} \left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right)_j,$$

где  $A_i$  - условие по справочнику условий для класса (группы) деталей;  $i = 1, 2, \dots, n_1$  - число условий, связанных конъюнкцией;  $j = 1, 2, \dots, n_2$  - число условий, связанных дизъюнкцией.

Тогда логическая функция, определяющая обобщенный маршрут,

$$\varnothing = \bigvee_{k=1}^{n_3} \left( \bigvee_{j=1}^{n_2} \left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right)_j \right)_k,$$

где  $k = 1, 2, \dots, n_3$  - число кодов  $C_k$  операций в обобщенном маршруте; код операции характеризует вид операции (токарные, фрезерные и т.д.) и особенности операции (например, обработка в центрах, патроне, люнете и т.д.);  $\wedge$  - знак "И" - логическое произведение (конъюнкция);  $\vee$  - логическая сумма (дизъюнкция);  $\bigvee$  - знак "ЛИБО" - логическая сумма (дизъюнкция).

Построение индивидуальных технологических маршрутов осуществляется путем их выделения из обобщенного маршрута. Исходными данными такого построения являются условия  $L_j^D$ , характерные для конкретной детали.

Для некоторых операций, которые являются общими для всех обрабатываемых деталей класса (группы), логическая функция отсутствует, т.е.  $f_k = 0$ . Каждый набор условий

$\left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right)_j$  сравнивается с условиями конкрет-

ной детали. Для каждого кода операции  $C_k$  с функцией  $f_k \neq 0$ , входящего в индивидуальный маршрут  $M_i$  выполняется требование существования хотя бы одного такого набора усло-

вий  $L_j = \left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right)_j$ , соединенных логическим

произведением, который являлся бы подмножеством всех наборов  $f$  для данного кода, т.е.

$$\forall C_k \in M_i \left[ \exists L_j (L_j \subseteq f_k) \right].$$

Тогда условием вхождения  $k$ -й операции обобщенного маршрута в индивидуальный технологический маршрут будет  $L_{jk} = L_j^D$ ,

где  $L_j^D$  - набор условий, характерных для конкретной задачи. Алгоритм решения данной задачи представлен на рис. 1.3.9.

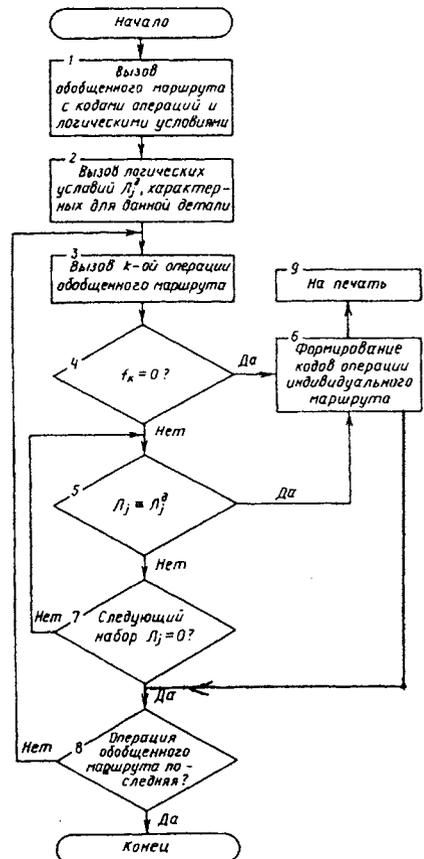


Рис. 1.3.9. Алгоритм проектирования индивидуального технологического маршрута

При третьем уровне сложности структурного синтеза решаются задачи выбора варианта структуры в множестве с большим, но конечным результатом известных вариантов. Для решения таких задач используют: алгоритмы направленного перебора (например, алгоритмы дискретного линейного программирования), алгоритмы последовательные, итерационные и др.; сведение задачи к полному перебору путем ограничения области поиска на стадии формирования исходных данных. Например, оптимизация плана обработки поверхности представляет задачу структурного синтеза, когда выбор варианта плана происходит во множестве с большим, но конечным количеством известных вариантов. Для поиска оптимального варианта используют алгоритмы дискретного программирования, находят условия, которым должен удовлетворять оптимальный многошаговый процесс принятия решений. Подобный анализ называют динамическим программированием. Оптимальная стратегия обладает тем свойством, что, каков бы ни был путь достижения некоторого состояния (технологического перехода), последующие решения должны принадлежать оптимальной стратегии для части плана обработки поверхности, начинающегося с этого состояния (технологического перехода). Для того, чтобы учесть сформулированный принцип оптимальности, можно использовать следующие обозначения:  $f_n(P_i)$  - технологическая себестоимость, отвечающая стратегии минимальных затрат для плана обработки от технологического перехода  $P_i$  до последнего перехода (если до него остается  $n$  шагов);  $j_n(P_i)$  - решение, позволяющее достичь  $J_n(P_i)$ .

Общей особенностью всех моделей динамического программирования является сведение задач принятия решения к получению рекуррентных соотношений, которые можно представить как

$$f(P_i) = \min [C_{P_i} + f_{n-1}(P_i)],$$

где  $C_{P_i}$  - технологическая себестоимость при выполнении технологического перехода  $P_i$ .

Возможные варианты плана обработки поверхности представляют собой сеть или граф. Рекуррентное соотношение позволяет из множества сформированных вариантов выбрать один или несколько лучших с указанием глубин резания, подачи и скорости резания по технологическим переходам, а также выбрать заготовку.

К третьему уровню сложности структурного синтеза технологического процесса и его элементов также относятся задачи целочисленного программирования; при этом про-

граммировании к требованиям линейности критерия и ограничений добавляется условие целочисленности переменных. Например, имеющуюся совокупность  $P$  переходов необходимо распределить по позициям станка (вертикального и горизонтального многошпиндельных токарных полуавтоматов, пруткового автомата и др.), для чего вводят переменные

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й переход выполняется} \\ & \text{на } j\text{-й позиции,} \\ 0 & \text{- в противном случае,} \end{cases}$$

где  $i = 1, 2, \dots, P; j = 1, 2, \dots, m$ .

Учитывают основные группы ограничений, связанных:

1) с необходимостью закрепления определенных переходов за позициями станка;

$$\sum x_{ij} = 1, \text{ где } A_i - \text{ множество индексов позиций, на которых может быть выполнен } i\text{-й переход;}$$

2) с требованием определенной очередности выполнения переходов:

$$x_{ij} \leq \sum_{v=1}^j x_{i'v} \text{ для всех } i' \in B_i, j \in A_i,$$

где  $B_i$  - множество индексов переходов, без выполнения которых нельзя выполнить переход с индексом  $i$ ;

3) с возможностью совмещения нескольких переходов на одной позиции 
$$\sum_i x_{ij} \leq k, \text{ при котором суммирование ведется}$$

ся по индексам рассматриваемых переходов. Целое число  $k$  означают количество совмещенных на одной позиции переходов.

Если при указанных ограничениях требуется найти минимум целевой функции

$$z = \sum_i \sum_j C_{ij} x_{ij},$$

(где  $C_{ij}$  - себестоимость  $i$ -го перехода на позиции  $j$ ), то задача целочисленного программирования с булевыми переменными может быть решена методом частичного перебора (аддитивный алгоритм).

Задачи структурного синтеза четвертого уровня сложности (выбор вариантов во множестве с заранее неизвестным числом элементов или вообще в бесконечном множестве) решаются при активном участии технолога-проектировщика и реализуются в режиме диалога с ЭВМ. Например, при проектировании инструментальной наладки для пруткового автомата в режиме диалога устанавливается определенный порядок взаимодействия

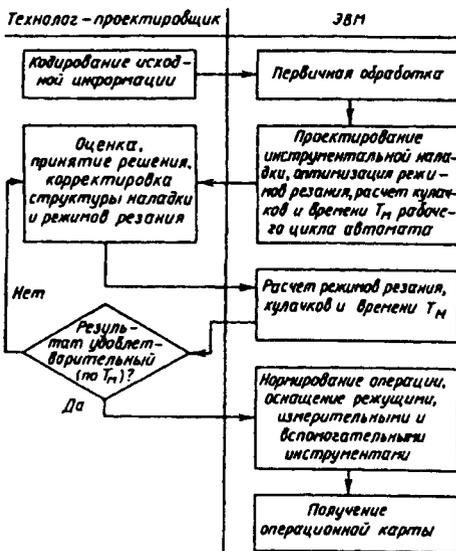


Рис. 1.3.10. Схема взаимодействия технолога-проектировщика и ЭВМ при проектировании автоматной операции

технолога и машины (рис. 1.3.10). Технолог, работающий в режиме диалога с ЭВМ, выбирает такой вариант структуры, который представляет собой оптимальный компромисс между производительностью работы автомата и вероятностью обеспечения заданного качества обрабатываемой детали. ЭВМ помогает технологу принять решение об изменении структуры, рассчитав по программе режимы резания и производительность автомата.

Общую трудоемкость проектирования наладки можно уменьшить с помощью перехода от диалогового режима к пакетному. Подобные задачи решают путем применения процедур обучения (процедуры формирования понятий). В качестве процедур обучения используют программы типа ПАРК (программа автоматического распознавания и классификации ВЦРАН). При этом происходит перераспределение рутинной и творческой работы; при использовании пакетного режима более высокого уровня технолог занимается подготовкой исходных данных и проверяет окончательный результат. Диалог применяется также при подготовке управляющих программ (УП), когда используются трудно формализуемые правила и процедуры принятия решений, а также эвристические критерии.

Одним из критериев оценки процесса подготовки является отсутствие ошибок в разрабатываемых УП. Для устранения ошибок в УП при подготовке их с помощью известных систем автоматического программирова-

ния (САП) требуется 8 ... 144 ч. Диалог позволяет это время сократить до 1,2 ... 1,8 ч. Однако диалог не всегда оправдывается экономически.

Поэтому ставится задача перехода от диалога на более высокий уровень автоматического режима с помощью процедур обучения. Например, режим обучения при выборе технологических баз при токарной обработке в патроне характеризуется такой последовательностью:

1) на экране дисплея САП УП выводит: шифр детали, формулу базы, номер базы, код поискового предписания (например, формула базы имеет вид  $B1 = I1, II1, II2$ , где  $I1$  - код вида базы;  $II1$  - процедура вычисления диаметра базы;  $II2$  - процедура вычисления расстояния от базы до правого торца детали;

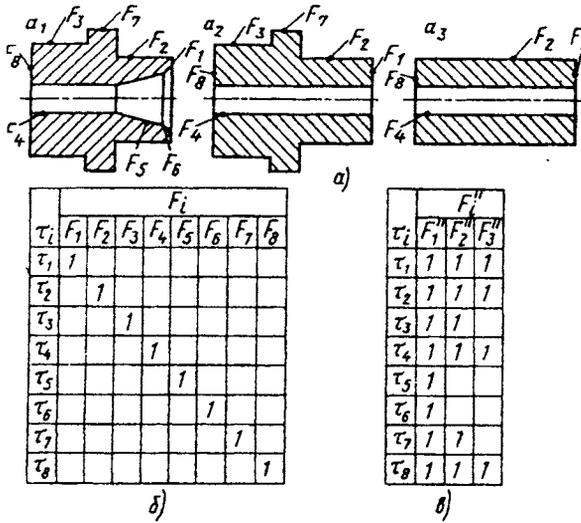
2) высвечиваются требования на выполнение действия "СФОРМИРУЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА БАЗЫ";

3) последовательно задавая вопросы, САП УП формирует искомый алгоритм.

Технолог составляет алгоритм выбора базы с помощью библиотеки элементарных высказываний. В закодированном виде он задает элементарные высказывания (виды установка и заготовки, наличие конструктивных особенностей детали и т.п.) и конкретные указания с клавиатуры дисплея. После отработки каждого указания программа выдает запрос на продолжение работы. Система из элементарных высказываний формирует предикат, который дополняется расчетом параметров базы. Получаемые подпрограммы выбора баз и расчет их параметров система автоматически помещает в библиотеку подпрограмм выбора баз с ключом, соответствующим коду поискового предписания. Данный подход при подготовке УП (для токарных станков с ЧПУ) снижает трудоемкость на 40-50% по сравнению с системой диалога при повышении качества программы.

Пятый, самый сложный, уровень структурного синтеза направлен на создание принципиально новых технологических процессов и решается так называемым поисковым конструированием.

Одним из путей поискового конструирования является использование метода эвристических приемов: 1) уяснение или формулирование технического задания (ТЗ); 2) выбор одного или нескольких аналогов (прототипов) технологического процесса; 3) анализ прототипов, выявление их недостатков и формулирование постановки задачи в виде ответов на вопросы: а) какие показатели качества в прототипе синтезирующего технологического процесса и насколько желательно их улучшить, б) какие новые парамет-



**Рис. 1.3.11. Табличные модели проектирования маршрута обработки детали на пружковом автомате:** а - группа деталей; б и в - матрицы;  $\tau_1$  - операторы (технологические переходы);  $\tau_1$  - подрезка торца;  $\tau_2, \tau_3, \tau_7$  - обтачивание поверхностей;  $\tau_4$  - сверление отверстия;  $\tau_5$  - зенкерование;  $\tau_6$  - растачивание фаски;  $\tau_8$  - отрезка

ры качества детали должен обеспечить создаваемый технологический процесс и какие параметры качества должны утратить рассматриваемый прототип ; 4) решение задачи.

**Математические модели при автоматизированном проектировании технологических процессов.** Под математической моделью технологического процесса и его элементов понимают систему математических соотношений, описывающих с требуемой точностью изучаемый объект и его поведение в производственных условиях. При построении математических моделей используют различные математические средства описания объекта - теорию множеств, теорию графов, теорию вероятностей, математическую логику, математическое программирование, дифференциальные или интегральные уравнения и др.

Описание математических соотношений на уровнях структурных, логических и количественных свойств принимает конкретные формы в условиях определенного объекта. Например, множество параметров, влияющих на выбор скорости резания при различных методах обработки, можно представить в виде

$$M_v = \{T_n, m, t, S, d, B, c_v, k_v, x_v, y_v, z_v, r_v\},$$

где  $T_n$  - стойкость инструмента, мин;  $m$  - показатель относительной стойкости инструмента;  $t$  - глубина резания, мм;  $S$  - подача, (минутная, на оборот, на зуб, на двойной ход);  $d$  - диаметр обрабатываемой поверхно-

сти или диаметр инструмента;  $B$  - ширина обрабатываемой поверхности, мм;  $c_v$  - коэффициент, характеризующий условия обработки;  $k_v$  - поправочный коэффициент на скорость резания;  $x_v, y_v, z_v, r_v$  - показатели степени.

Логические соотношения между приведенными выше параметрами и скоростью резания  $v$  имеют вид

$$v = T_n \wedge m \wedge c_v \wedge k_v \{ (t \wedge x_v) \vee (S \wedge y_v) \vee (d \wedge z_v) \vee (B \wedge r_v) \},$$

причем  $T_n, m, c_v$  и  $k_v$  всегда истинны, а истинные значения других переменных зависят от метода обработки резанием.

Формулы количественных соотношений между параметрами с учетом истинности их логических значений имеют вид:

при наружном точении

$$v = \frac{c_v k_v}{T_n^m t^{xv} S^{yv}};$$

при сверлении

$$v = \frac{c_v k_v d^{z_v}}{T_n^m S^{y_v}};$$

и т.д. Следовательно, приведенные выше формулы, представляют математические мо-

дели расчета скорости резания на различных уровнях абстрагирования.

К математическим моделям предъявляют требования высокой точности, экономичности и универсальности. Экономичность математических моделей определяется затратами машинного времени (работы ЭВМ). Степень универсальности математических моделей определяется возможностью их использования для анализа большего числа технологических процессов и их элементов: требования к точности, экономичности и степени универсальности математических моделей противоречивы. Поэтому необходимо иметь удачное компромиссное решение.

При технологическом проектировании на различных уровнях абстрагирования используют структурные, структурно-логические модели или теоретические модели.

Структурные или структурно-логические модели подразделяются на табличные, сетевые и перестановочные, которые определяются строками булевой матрицы:

$$[S_i \times F(S)] = \begin{matrix} F_G & F_n & F_\lambda & F_a \\ 1 & 1 & 1 & 1 & S_1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & S_2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & S_3 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & S_4 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & S_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & S_6 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & S_7 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & S_8 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & S_9 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & S_{10} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & S_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{12} \end{matrix}$$

где  $S_i$  - свойства моделей, влияющих на содержание проектирования;  $F(S)$  - набор свойств;  $F_G$  - набор свойств, если все графы объектов  $A_k$ , проектируемых по данной модели, суть простые пути или цепи  $F_G = 1$  и  $F_G = 0$  в противном случае;  $F_n$  - набор свойств, учитывающих число элементов во всех вариантах объектов  $A_k (F_n = 1$  - число элементов  $a_i$  одинаково;  $F_n = 0$  в противном случае);  $F_\lambda$  - набор свойств, учитывающих отношение между любыми элементами объекта  $a_i a_j \in A_k$  во всех вариантах объектов  $A_k (F_\lambda = 1)$  - отношение не меняется;  $F_\lambda = 0$  - в противном случае);  $F_a$  - набор свойств, учитывающих состав элементов  $a_i$  в  $A_k (F_a = 1$  - состав одинаков;  $F_a = 0$  - в противном случае).

В матрице модели класса  $S_1$  называют табличными. В табличной модели каждому

набору свойств  $F(A_k)$  соответствует единственный вариант проектируемого объекта  $A_k$ . Поэтому табличные модели используют для поиска стандартных, типовых или готовых проектных решений. Модели остальных классов применяют для получения типовых унифицированных и индивидуальных проектных решений при наличии их вариантов и необходимости оптимизации решения. Модели классов  $S_2, S_5, S_7, S_8$  и  $S_{11}$  называют сетевыми. Структура элементов сетевой модели описывается ориентированным графом, не имеющим ориентированных циклов. В этой модели может содержаться несколько вариантов проектируемого объекта  $A_k$ , однако во всех вариантах сохраняется неизменным соотношение порядка между входящими элементами. Модели классов  $S_3, S_4, S_6, S_9, S_{10}$  и  $S_{12}$  называют перестановочными. Соотношение порядка между элементами проектируемого объекта  $A_k$  в перестановочных объектах обычно задается с помощью графа, содержащего ориентировочные циклы, причем все варианты объектов  $A_k$ , проектируемые по перестановочным моделям, различаются порядком между элементами, входящими в них.

Объектом проектирования  $A_k$  может быть технологический процесс, операция или технологический переход.

Если рассматривать технологический процесс в качестве объекта проектирования, то операции будут элементами. При проектировании операции элементами будут технологические переходы.

Если  $A_k$  должен содержать фиксированный набор элементов  $a_i \in A$ , то

$$A_k = a_1 \wedge a_2 \wedge \dots \wedge a_i \wedge \dots \wedge a_n = \bigwedge_{i=1}^n a_i;$$

если  $A_k$  может содержать любой элемент  $a_i \in A$ , то

$$A_k = a_1 \vee a_2 \vee \dots \vee a_i \vee \dots \vee a_n = \bigvee_{i=1}^n a_i;$$

а если какой-либо единственный элемент  $a_i \in A$ , то

$$A_k = a_1 \nabla a_2 \nabla \dots \nabla a_i \nabla \dots \nabla a_n = \bigtriangledown_{i=1}^n a_i.$$

Ниже приведены табличная, сетевая и перестановочная модели.

При обработке группы деталей (рис. 1.3.11, а) на токарном прутковом автомате с помощью табличной модели устанавливается последовательность обработки поверхностей  $F_1, F_2, \dots, F_8$  с определенными свойствами, поэтому состав свойств поверхностей, относящихся к группе деталей, будет

$$F(A) = (F_1 \wedge F_2 \wedge F_4 \wedge F_8) \vee F_3 \vee F_5 \vee F_6 \vee F_7.$$

Если ввести совокупность свойств более высокого уровня  $F'_1 = \{F_1, F_2, F_4, F_8\}$ , то получим

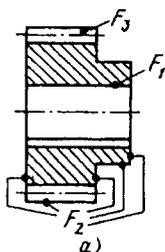
$$F'(A) = F'_1 \vee F_3 \vee F_5 \vee F_6 \vee F_7,$$

а если совокупности свойств для деталей 1-, 2-, 3-й групп (соответственно элементам  $a_1, a_2, a_3$  группы А деталей, т.е.  $a_1, a_2, a_3 \in A$ ), то

$$F'_1 = F(a_1) = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8\};$$

$$F'_2 = F(a_2) = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_7, F_8\};$$

$$F'_3 = F(a_3) = \{F_1, F_2, F_4, F_8\};$$



$\tau_i$	$F_i$		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$\tau_1$	/	/	/
$\tau_2$	/		
$\tau_3$		/	
$\tau_4$		/	
$\tau_5$			/
$\tau_6$			/
$\tau_7$	/	/	/
$\tau_8$	/		
$\tau_9$			/
$\tau_{10}$			/
$\tau_{11}$	/	/	/
$\tau_{12}$	/	/	/

б)



в)

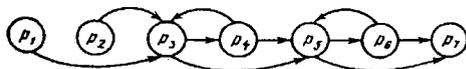


Рис. 1.3.13. Граф перестановочной модели расчеховки при изготовлении изделия. Операторы (цехи):  $P_1$  - литейный;  $P_2$  - кузнечный;  $P_3$  - механический;  $P_4$  - термический;  $P_5$  - сборочный;  $P_6$  - лакокрасочный;  $P_7$  - испытания и упаковки

$$F''(A) = F'_1 \nabla F'_2 \nabla F'_3.$$

Табличные модели предоставляют матрицы (рис. 1.3.11, б и в), в которых  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_8$  - операторы (технологические переходы при выполнении автоматной операции).

Сетевая модель включает матрицу свойств детали, описание логических отношений между свойствами и граф  $G = (T, C)$  взаимосвязи операторов ( $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ ;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  - дуги графа) по возможной последовательности их использования. Например, в логической сетевой модели класса  $S_5(T)$  изготовление зубчатого колеса (рис. 1.3.12), смежность и порядок операторов (операций) заданы графом.

Проектирование технологического процесса изготовления изделия характеризуется различными уровнями: самый высокий уровень - разработка принципиальной схемы технологического процесса, который включает отдельные этапы, причем этап может содержать несколько операций или одну операцию. В данном случае оператором будет являться этап технологического процесса. Моделирование технологических процессов разного уровня происходит с помощью моделей  $S_i(T)$ . При этом операторам модели  $S_i(T)$  более высокого уровня - этапам технологического процесса, соответствуют операции и переходы, входящие соответственно в маршрут и операцию, проектируемые по моделям более низкого уровня.

Граф перестановочной модели класса  $S_6(T)$  расчеховки при изготовлении изделия приведен на рис. 1.3.13.

Теоретические модели строят на основании изучения закономерностей. В отличие от формальных моделей они в большинстве случаев более универсальны и справедливы для широких диапазонов изменения технологических параметров. Теоретические модели могут быть линейными и нелинейными, а в зависимости от мощности множества значений переменных модели делят на непрерывные и дискретные. При технологическом проектировании наиболее распространены дискретные модели, переменные которых дискретны

Рис. 1.3.12. Сетевая логическая модель операторов (операций) технологического маршрута изготовления зубчатого колеса: а - зубчатое колесо; б - матрица операторов  $\tau_i$  (операций); в - граф взаимосвязи операторов. Операторы (операции):  $\tau_1$  - штамповка заготовки;  $\tau_2$  - протягивание отверстия и шпоночного паза;  $\tau_3$  - черновое обтачивание зубчатого колеса;  $\tau_4$  - чистовое обтачивание зубчатого колеса;  $\tau_5$  - нарезание зубчатого профиля;  $\tau_6$  - шевингование зубчатого профиля;  $\tau_7$  - термическая обработка;  $\tau_8$  - отделка базового отверстия;  $\tau_9$  - шлифование зубчатого профиля;  $\tau_{10}$  - притирка зубчатого профиля;  $\tau_{11}$  - мойка;  $\tau_{12}$  - контроль

величины, а множество решений счетно. Различают также модели динамические и статические. В большинстве случаев проектирования технологических процессов используют статические модели, уравнения которых не учитывают инерционность процессов в объекте.

Выбор типа математического моделирования, наиболее эффективного в условиях конкретной задачи, определяется её технологической сущностью, формой представления исходной технологической информации, общей целью исследования. Математическая модель процесса в общем виде

$$F = f(x, y),$$

где  $x$  - управляемые переменные;  $y$  - неуправляемые переменные;  $F$  - ожидаемая эффективность.

Ограничения, входящие в модель, имеют вид  $\varphi(x, y) = 0$ . Решения на модели получаются путем определения значения  $x$  (как функции от  $y$ ), максимизирующего (минимизирующего)  $F$ .

В зависимости от сложности задачи используются различные принципы построения моделей. Зачастую возникает необходимость разработки менее точной модели, но тем не менее более полезной для практики. Возникают две задачи: с одной стороны, - нужно разработать модель, на которой проще всего получить численное решение, а с другой стороны, - обеспечить максимально возможную точность модели. С целью упрощения модели используются такие приемы, как исключение переменных, изменение характера переменных, изменение функциональных соотношений между переменными (например, линейная аппроксимация), изменение ограничений (их модификация, постепенный ввод ограничений в условие задачи). Модели, являясь эффективным средством исследования структуры задачи, позволяют обнаружить принципиально новые стратегии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ивашенко И.А.** Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. М.: Машиностроение, 1975. 222 с.
2. **Колесов И.М.** Основы технологии машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение. 1997. 592 с.
3. **Матвеев В.В.** Размерный анализ технологических процессов. /В.В. Матвеев, М.М. Тверской, Ф.И. Бойков и др. М.: Машиностроение, 1982. 254 с.
4. **Мягков В.Д.** Допуски и посадки. Справочник /В.Д. Мягков, М.А. Палей, А.Б. Романов и др. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983, Т. 2. 448 с.
5. **Солонин И.С., Солонин С.И.** Расчет сборочных и технологических размерных цепей. М.: Машиностроение. 1980. 110 с.
6. **Справочник технолога-машиностроителя**, Т. 1/Под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. М.: Машиностроение. 1985. 656 с.
7. **Справочник технолога-машиностроителя** /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986, Т. 2. 496 с.
8. **Стрелец А.А., Фирсов В.А.** Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений. М.: Машиностроение, 1988. 120 с.
9. **Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения**. Ч. 1/ Под ред. В.Р. Верченко: Стандарты. 1974.
10. **Технология машиностроения: В 2 т.** Т. 1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др. / Под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1997. 564 с.
11. **Фридлиндер И.Г.** Размерный анализ технологических процессов обработки / И.Г. Фридлиндер, В.А. Иванов, М.Ф. Барсуков и др./Под общ. ред. И.Г. Фридлиндера. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 141 с.

## РАЗДЕЛ 2

# МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Глава 2.1

#### ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ

Обработка резанием относится к механической обработке и подразделяется на лезвийную (точение, строгание, фрезерование, сверление, зенкерование, развертывание, протягивание и др.) и алмазно-абразивную (шлифование, хонингование, полирование, суперфиниш и др.).

Большой вклад в развитие теории резания за последние 50 лет внесли: Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский, А.Н. Резников, А.Д. Макаров, Т.Н. Лоладзе, В.А. Кривоухов, В.Н. Подураев, В.А. Остафьев, С.С. Силин, В.С. Мухин, В.К. Старков, Е.Н. Маслов, Д.Г. Евсеев.

##### 2.1.1. НОРМАТИВЫ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ. ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ

Существуют несколько методов выбора режимов резания: табличный, аналитический, графоаналитический, машинный с использованием ЭВМ и специальных программ расчета.

При **табличном методе** обычно используют нормативы режимов резания.

Для выбора режимов резания по табличному методу необходимо знать: физико-механические характеристики обрабатываемого материала, припуск на обработку и глубину резания, материал и геометрию режущей части инструмента, размер резца.

Порядок выбора режима обработки следующий.

1. По заданному припуску назначают глубину резания. Если припуск велик, назначают несколько проходов и соответствующие глубины резания для каждого прохода.

2. Выбирают технологически допустимую подачу по следующим ограничениям:

а)  $S_{\text{шер}}$  - требуемой чертежом шероховатости обработанной поверхности детали;

б)  $S_{\text{жест}}$  - жесткости обрабатываемой детали, которая особенно важна при обработ-

ке валов с отношением длины вала к диаметру более 10;

в)  $S_{\text{пр.р}}$  - прочности резца на изгиб.

Наименьшая из трех подач ( $S_{\text{шер}}$ ,  $S_{\text{жест}}$ ,  $S_{\text{пр.р}}$ ) является технологически допустимой  $S_T$ .

3. По таблицам в зависимости от найденного значения  $S_T$  и назначенной глубины резания  $t$  выбирают скорость резания  $v$  и частоту вращения  $n$ .

4. По найденным значениям  $n$  и  $S_T$  находят обороты изделия и эффективную мощность, затрачиваемую на резание  $P_{\text{эф}}$ , по которой определяют мощность станка:

$$P_M = \frac{P_{\text{эф}}}{\eta_{\text{ст}}}, \quad (2.1.1)$$

где  $P_M$  - мощность двигателя станка;  $\eta_{\text{ст}}$  - коэффициент полезного действия механизма главного привода станка (приводится в паспорте металлорежущего станка). Ориентировочно можно принимать  $\eta_{\text{ст}} \approx 0,7 \div 0,9$ .

Табличный метод рекомендуется использовать в производственных условиях при отсутствии вычислительной техники, в проектных организациях при проектировании новых технологий, когда к готовой продукции не предъявляются высокие требования эксплуатации.

При **аналитическом методе** последовательность выбора режима аналогична табличному методу, однако при этом необходимо отметить следующие особенности:

1. Величина подачи  $S_{\text{шер}}$  в данном случае рассчитывается по зависимостям типа:

$$S_{\text{шер}} \leq \frac{k_0 R_a^{k_1} v^{k_2} r^{k_3} HVB^{k_4}}{t^{k_5} \varphi^{k_6} \varphi_1^{k_7}}, \quad (2.1.2)$$

где  $k_0, k_1 - k_7$  - коэффициенты, зависящие от обрабатываемого и инструментального материалов. Данные коэффициенты приведены в справочниках для различных марок обрабатываемых и инструментальных материалов;  $R_a$  - среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости;  $t$  - глубина резания;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  - главный и вспомогательный углы в плане соответственно;  $r$  - радиус при вершине реза в плане;  $HВ$  - твердость обрабатываемого материала.

2. Поддача, допускаемая прочностью реза,

$$S_{\text{пр.р}} \leq x_{\text{рз}} \sqrt{\frac{BH^2[\sigma_{\text{и}}]}{6c_{\text{рз}} l r^3 y_{\text{рз}}}}, \quad (2.1.3)$$

где  $B$  - ширина державки реза;  $H$  - высота державки реза.

Стандартные резы имеют следующие размеры державки, мм:

для резов прямоугольного сечения

$$B \times H = 10 \times 16; \quad 12 \times 20; \quad 16 \times 25; \\ 20 \times 30; \quad 25 \times 30; \quad 25 \times 40; \quad 30 \times 45; \quad 40 \times 60;$$

для резов квадратного сечения

$$B \times H = 6 \times 6; \quad 10 \times 10; \quad 12 \times 12; \quad 16 \times 16; \\ 20 \times 20; \quad 25 \times 25; \quad 30 \times 30; \quad 40 \times 40;$$

$l$  - вылет реза; в данном случае может быть рассчитан как  $l = (1 + 1,5)H$ ;  $[\sigma_{\text{и}}]$  - допускаемое напряжение на изгиб материала державки реза;  $x_{\text{рз}}, c_{\text{рз}}, y_{\text{рз}}$  - коэффициенты,

зависящие от свойств обрабатываемого материала ( $\sigma_{\text{в}}, HВ$ ), рода обрабатываемого материала (сталь, чугун, бронза и т.д.), геометрии режущего инструмента ( $\gamma, \varphi$  и т.д.), вида охлаждения.

3. Поддача, допускаемая жесткостью и точностью детали,

$$S_{\text{жест}} = x_{\text{рз}} \sqrt{\frac{\varepsilon J E f'}{1,1 c_{\text{рз}} l^3 y_{\text{рз}}}}, \quad (2.1.4)$$

где  $f'$  - прогиб детали;  $E$  - модуль упругости материала обрабатываемой детали;  $J$  - момент инерции сечения заготовки. Величина  $J$  для круглых сплошных деталей определяется как  $J = 0,05d^4$ , где  $d$  - диаметр заготовки;  $l$  - расстояние между точками закрепления заготовки или вылет детали при креплении ее только в патроне;  $\varepsilon$  - коэффициент жесткости, зависящий от способа закрепления заготовки на станке. При обработке на токарных станках встречается три случая закрепления заготовки (рис. 2.1.1).

Допустимая величина прогиба может быть рекомендована: при черновом точении  $f' = 0,2 + 0,4$  мм; при полустойким точении  $f' = 0,1$  мм; при точных работах  $f' = 0,2\Delta T$  ( $\Delta T$  - допуск на размер обрабатываемой поверхности).

Скорость резания определяется по зависимостям, которые указываются в нормативах режимов резания. Так, например, при точении деталей из теплостойких, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, резами с пластинами из сплавов ВК6-М, ВК8, ВК8-В скорость резания (м/мин)

$$v = \frac{c'_v}{T^{0,25} S^{0,15} l^{0,15}} \quad \text{при подаче на оборот} \\ S > 0,2 \text{ мм}$$

$$v = \frac{c''_v}{T^{0,25} S^{0,15} l^{0,15}} \quad \text{при подаче на оборот} \\ S \leq 0,2 \text{ мм,}$$

где  $T$  - период стойкости режущего инструмента.

В этих формулах  $c'_v, c''_v$  и показатели степеней справедливы только для конкретных условий резания.

Метод получения вышеуказанных эмпирических уравнений Тейлора - однофакторный поочередный эксперимент, который не позволяет учесть взаимовлияние анализируемых переменных параметров друг на друга.

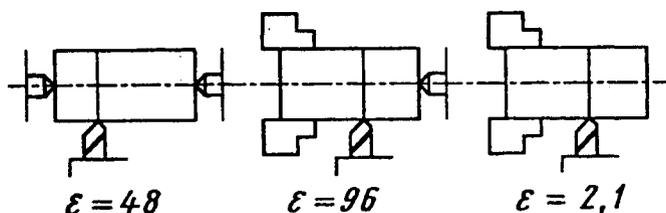


Рис. 2.1.1. Схемы закрепления заготовки

Степенные коэффициенты в уравнениях Тейлора не константы, а переменные параметры, функционально зависящие от условий обработки (режимов резания, геометрии инструмента, диаметра инструмента, диаметра обработки, марки используемой СОЖ). На разных подачах, глубинах и скоростях резания значения степенных коэффициентов в стойкостных уравнениях Тейлора различны и это различие достигает в некоторых случаях более чем 5 раз. Следовательно, достоверность указанных выше эмпирических уравнений невелика при реальном диапазоне изменения технологических условий обработки. Кроме того, выбор периода стойкости инструмента в уравнениях Тейлора слабо аргументирован технико-экономическими соображениями.

Получение указанных выше эмпирических уравнений длительно и трудоемко, связано с непроизводительным расходом обрабатываемых и инструментальных материалов, нерациональным использованием производственных площадей, металлорежущего оборудования и трудовых ресурсов, сдерживает сроки освоения новой продукции.

5. При аналитическом способе расчета режима обработки выбор станка производится по мощности, затрачиваемой на процесс резания, с последующей проверкой прочности механизма продольной подачи.

Данный метод расчета режима резания может быть использован, когда нет ограничений в выборе модели станка и его характеристик, и аналитические зависимости по определению подачи и скорости резания имеют достаточную точность расчета. На практике получено большое множество таких зависимостей, однако все они носят частный характер и справедливы только для конкретных сочетаний обрабатываемых и инструментальных материалов.

На основании изложенного выше можно сделать следующий вывод: разрабатываемые нормативы режимов резания должны быть научно обоснованы, базироваться на анализе физико-механических и теплофизических явлений, сопровождающих процесс резания, учитывать взаимовлияние переменных технологических факторов на этот процесс, обеспечивать оптимизацию процесса резания.

При графоаналитическом методе используется следующий порядок расчета режимов резания.

1. Исходя из припуска на обработку, намечается количество проходов и глубина резания.

2. Выбирается марка инструментального материала, размеры резца и его геометрия.

3. Расчетным путем по формулам (2.1.2, 2.1.3, 2.1.4) определяются лимитирующие подачи и наименьшая из них принимается за  $S_T$  (технологическую).

4. Вычерчивают график «линия станка» и «линия резца» (рис. 2.1.2).

Эти прямые линии строятся в двойных логарифмических осях, где по осям абсцисс и ординат откладываются соответственно частота вращения  $n$  и подача  $S$ .

Прямые получаются путем решения в логарифмической сетке следующих уравнений:

$$S_{ст} = \frac{A'}{n^{1/x_{pz}}} \text{ и } S_{рез} = \frac{B'}{n^{1/p}},$$

где  $A' = f(P, \eta_{ст}, D, t, \dots)$ ;  $B' = f(D, t, \dots)$ ;  $x_{pz}$ ,  $p$  - коэффициенты, определяемые экспериментально;  $S_{ст}$  - подача по паспорту станка;  $S_{рез}$  - подача режима резания;  $P$  - мощность двигателя станка;  $D$  - максимальный диаметр обрабатываемой детали на станке.

Режим резания, соответствующий точке  $O$  пересечения прямых  $MN$  и  $KL$ , обеспечивает одновременное использование станка и резца, поэтому считается наиболее эффективным: на участке  $OL$  режимы резания обеспечивают полное использование режущей способности резца, на участке  $MO$  - полное использование мощности станка. Подача, соответствующая этой точке, называется эффективной и назначается из условия  $S_{эф} < S_T$ . По ней определяется скорость резания  $v$ .

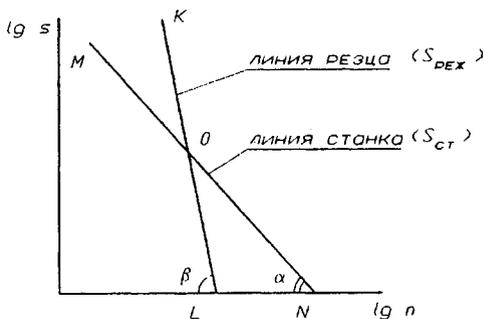


Рис. 2.1.2. График «линия станка» и «резца»

Если получится, что  $S_{эф} > S_T$ , то для выбора режима резания необходимо либо выбрать другой станок, имеющий меньшую мощность двигателя, либо заменить инструмент другим, имеющим более высокую режущую способность.

Графоаналитический метод выбора режимов резания требует довольно трудоемких вычислений для построения «линии станка» и «линии реза». Поэтому его использование в производственных условиях затруднено.

Сущность машинного метода заключается в использовании теоретических зависимостей по определению параметров процесса резания, режима обработки, параметров качества поверхностного слоя и точности обработки и вычислению экономически обоснованного режима обработки на ЭВМ. В томе IV-3 энциклопедии приведен подход Брянской научной школы технологов (проф. Сус-

лов А.Г.) к расчету оптимальных режимов резания, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений. В этом томе приводится подход к определению режима обработки, обеспечивающего комплекс параметров качества поверхностного слоя и точность обработки, базирующихся на применении теории подобия к процессу резания, разработанному проф. В.Ф. Безязычным.

В производственных условиях иногда необходимо обеспечить, наряду с заданной точностью обработки, комплекс параметров, характеризующий поверхностный слой - параметры шероховатости обрабатываемой поверхности, величину и степень наклепа, величину и знак остаточных напряжений с целью обеспечения тех или иных эксплуатационных показателей.

В этом случае расчет режимов резания производится по схеме, указанной на рис. 2.1.3.

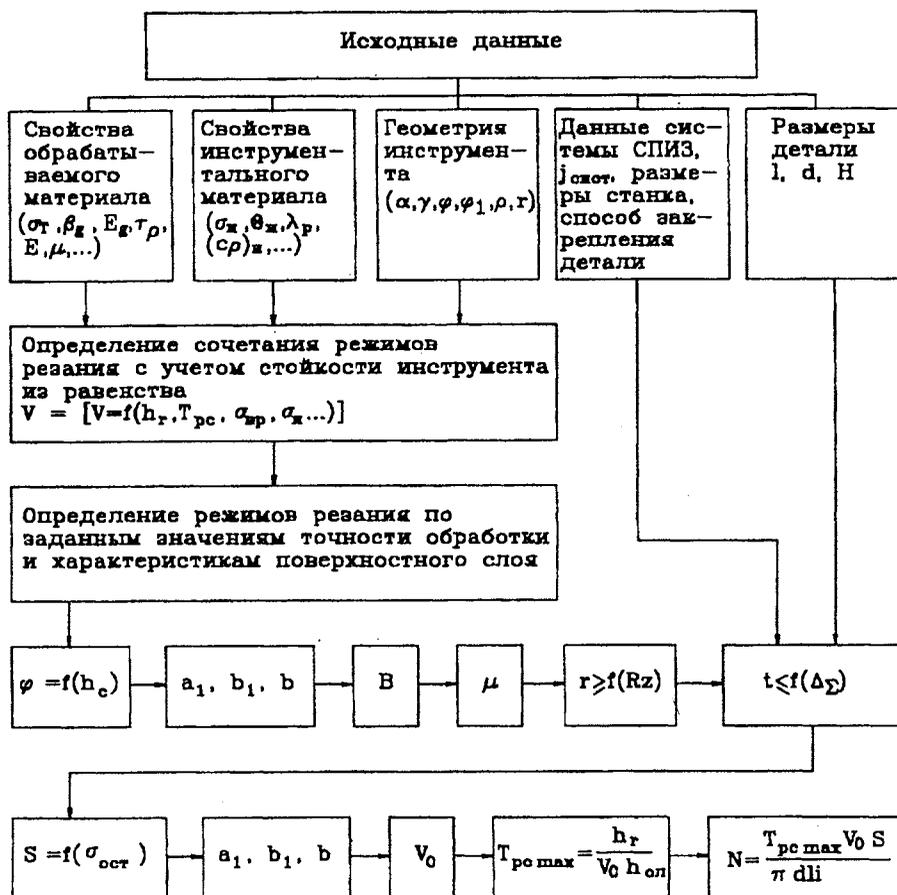


Рис. 2.1.3. Схема расчета режимов резания

Последовательность расчета:

1. По справочным данным находят свойства обрабатываемого материала ( $\lambda_d$  - теплопроводность материала обрабатываемой детали,  $c_p$  - удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала;  $a$  - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,  $\tau_p$  и  $E_g$  - сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу и его модуль упругости;  $\sigma_v$  и  $\sigma_T$  - временное сопротивление и предел текучести обрабатываемого материала;  $\theta_{пл}$  - температура плавления обрабатываемого материала;  $\beta_d$  - коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого материала и др.).

2. Выбирается инструментальный материал, определяются его свойства ( $\lambda_p$  и  $(c_p)_и$  - теплопроводность и удельная объемная теплоемкость материала реза;  $\sigma_{и}$  - предел прочности инструментального материала на сжатие;  $\beta_{и}$  - коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого материала и др.), а также задается допустимая фаска износа инструмента  $\Delta_{изн}$ .

3. Исходя из условий обработки задается геометрия инструмента ( $\alpha$  и  $\gamma$  - задний и передний углы реза;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  - главный и вспомогательный углы реза в плане;  $\lambda$  - угол наклона главной режущей кромки;  $r$  и  $\rho_1$  - угол при вершине реза в плане и угол округления режущей кромки и др.).

4. Определяются необходимые для расчета размеры детали ( $l$  - длина детали;  $d$  - диаметр детали;  $H$  - высота детали) в соответствии с требованиями чертежа.

5. Выбираются данные системы станок-приспособление-инструмент-заготовка, способ закрепления детали, жесткость системы  $j_{сист}$ , паспортные данные станка и др.

6. Определяется скорость резания, обеспечивающая заданный период стойкости режущего инструмента по формуле (2.1.5) с учетом формулы (2.1.6).

$$v = \left( \frac{\Delta_{изн} a^{(1+x)y_1} b_1^{z_1} \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon \right)^{y_1} (1 - \sin \gamma)^{0,73 y_1}}{c_1 c_p^{y_1} T_{pc} \left( \frac{\tau_p}{\sigma_{и}} \right)^{x_1} a_1^{(1+x+z)y_1 - z_1} \rho_1^{z_1}} \right)^{\frac{1}{1+(1+x)y_1}} ; \quad (2.1.5)$$

$$\frac{\pi dl}{S} = v T_{pc}, \quad (2.1.6)$$

где  $a_1$  и  $b_1$  - толщина и ширина среза;  $\beta$  и  $\varepsilon$  - угол заострения и угол при вершине реза в плане;  $T_{pc}$  - заданный период стойкости режущего инструмента;  $c_1, c, x, y, y_1, z, z_1$  - коэффициенты, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

7. Уточняется значение главного угла в плане реза в зависимости от требуемой величины наклепанного слоя обработанной детали (в градусах).

$$\varphi = \frac{h_c^{2,85} \sigma_{0,85}^{0,85} r^{10} s^{1,7} \alpha^{0,257} \gamma^{0,943}}{1,52 \cdot 10^{-22} \tau_p^{2,14} S^{1,71} \rho_1^{0,486} r^{0,171}}, \quad (2.1.7)$$

где  $h_c$  - глубина наклепа обработанной поверхности.

8. Уточняются параметры сечения среза  $a_1, b_1$ .

9. Рассчитывается критерий пластических деформаций, возникающих в процессе резания,

$$B = \left[ \frac{c \left( \frac{v a_1}{a} \right)^x D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0,73}} \right]^{y_1}, \quad (2.1.8)$$

где  $D = a_1 / b_1$  - критерий, характеризующий сечение среза;  $\Gamma = (\lambda_p / \lambda) \beta \varepsilon$  - критерий, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов.

10. Уточняется значение радиуса при вершине реза в плане. В частности при

$$r \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{S}{2r} \right)^2} \right) \leq t < r(1 - \cos \varphi);$$

$$r \geq \left[ \frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c \rho \rho_1^{0,1} a^{0,43} \left( 2,85 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right)}{v \lambda \sin^{0,165} \alpha} - \frac{-0,5 \tau_p \rho_1 b \left( \arccos \left( 1 - a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x}} \right) + \frac{a_2 B^{1-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right) \cos \alpha}{\tau_p \left( 1 + \frac{1}{B} + \operatorname{tg}(\arctg B - \gamma) \right)} \right] \frac{1}{8Rz}, \quad (2.1.9)$$

где  $\theta$  - температура в зоне резания;  $b$  - суммарная длина рабочей части режущих кромок;  $Rz$  - высота неровностей обработанной поверхности;  $\delta$  - длина фаски износа по задней поверхности инструмента;  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $x$  - величины, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

11. Уточняются параметры среза  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $b$ .

12. Уточняются значения подачи из условия обеспечения требуемой величины остаточных напряжений.

$$S \leq f(\sigma_{\text{ост}}, v, t, r, \varphi, \dots), \quad (2.1.10)$$

где  $\sigma_{\text{ост}}$  - заданная величина остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали.

13. Определяются окончательные параметры среза  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $b$  с уточненными значениями  $S$ ,  $t$ ,  $r$  и  $\varphi$ .

14. При наличии охлаждения корректируется значение скорости резания.

$$v = v \cdot k_{\text{охл}}, \quad (2.1.11)$$

где  $v$  - скорость резания, рассчитанная по формуле (2.1.5) с учетом новых значений параметров резания в соответствии с п. 13;  $k_{\text{охл}}$  - коэффициент, учитывающий повышение скорости резания при охлаждении.

15. Определяется максимальная фактическая размерная стойкость инструмента

$$T_{p.c \text{ max}} = \Delta_{\text{изн}} / (v h_{\text{ол}}), \quad (2.1.12)$$

где  $h_{\text{ол}}$  - относительный линейный износ режущего инструмента, равный отношению величины радиального износа к длине пути резания.

16. Рассчитывается число деталей, обработанных за период стойкости,

$$N_0 = T_{p.c \text{ max}} v S / (\pi d l i),$$

где  $i$  - число переходов.

**Оптимизация** технологических условий обработки деталей включает решение различных технологических, экономических, конструкторских, организационных задач.

В качестве критериев оптимизации обычно принимают: критерий минимальной технологической себестоимости выполнения операции, критерий максимальной производительности, обеспечивающий наименьшие затраты времени на обработку, и критерий точности обработки и параметров качества поверхностного слоя. Режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость, и режимы, соответствующие максимальной производительности, отличаются в основном скоростью резания и стойкостью инструмента. Скорость резания  $v_{\text{м.п}}$  по критерию максимальной производительности больше, а стойкость инструмента меньше, что обеспечивает большую производительность, но зато и большие затраты на инструмент.

Скорость резания  $v_3$ , обеспечивающая минимальную себестоимость обработки, больше скорости резания, обеспечивающей минимальный износ инструмента, или оптимальной скорости  $v_0$  по критерию точности обработки и параметров качества поверхностного слоя. В общем случае справедливо неравенство  $v_0 < v_3 < v_{\text{м.п}}$  (рис. 2.1.4). Однако для условий гибких автоматизированных производств иногда важнее получить меньший износ инструмента и погрешность обработки при незначительном увеличении себестоимости обработки на данной операции. Это позволит обойтись без введения дополнительных операций и уменьшить общую себестоимость изготовления детали.

*Критерий минимальной технологической себестоимости.* Технологическая себестоим-

мость выполнения операции, зависящая от режимов резания,

$$C_{\text{техн}} = B_c t_m + B_c t_{\text{см}} \frac{t_m}{T} + \Gamma_n \frac{t_m}{T}, \quad (2.1.13)$$

где  $B_c$  - полная себестоимость одной минуты работы станка и станочника без затрат на режущий инструмент;  $t_m$  - машинное время обработки;  $t_{\text{см}}$  - время смены затупившегося инструмента;  $\Gamma_n$  - затраты, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости между переточками;  $T$  - стойкость инструмента.

Экономический период стойкости инструмента, соответствующий минимальной себестоимости обработки,

$$T_3 = \frac{1-m}{m} \left( t_{\text{см}} + \frac{\Gamma_n}{3} \right). \quad (2.1.14)$$

Здесь  $3$  - стоимость одной минуты работы станка;  $3 = a_{\text{раб}} + a_{\text{ст}}$ , где  $a_{\text{раб}}$  - заработная плата рабочего за одну минуту с начислениями;  $a_{\text{ст}}$  - затраты, связанные с эксплуатацией станка в течение одной минуты его работы;  $m$  - показатель степени, характеризующий влияние стойкости инструмента на скорость резания.

Анализ зависимостей (2.1.13), (2.1.14) позволяет сделать вывод о целесообразности обработки деталей на экономических скоростях резания  $v_3$ , обеспечивающих минималь-

ную себестоимость обработки. Однако при работе на  $v_3$  несколько снижается производительность и уменьшается размерная стойкость инструмента.

*Критерий максимальной производительности.* Для обеспечения максимальной производительности обработку необходимо вести на скорости резания  $v_{\text{м.п}}$ , которой соответствует период стойкости инструмента  $T_{\text{м.п}}$ :

$$T_{\text{м.п}} = \left( \frac{1}{m} - 1 \right) t_{\text{см}}. \quad (2.1.15)$$

Сопоставив формулы (2.1.14) и (2.1.15), можно заметить, что  $T_3 > T_{\text{м.п}}$ , а так как скорость резания - величина, обратно пропорциональная стойкости инструмента, то скорость резания, при которой достигается максимальная производительность, выше экономической скорости резания, то есть  $v_{\text{м.п}} > v_3$ . При работе на  $v_{\text{м.п}}$  повышается производительность, но снижается стойкость инструмента, увеличивается погрешность обработки, ухудшается качество поверхностного слоя, повышается себестоимость обработки. Поэтому  $v_{\text{м.п}}$  целесообразно использовать на промежуточных операциях, где нет жестких требований к качеству поверхностного слоя и точности обработки.

*Критерий точности обработки и параметров качества поверхностного слоя.* При работе на оптимальной скорости резания  $v_0$  обеспечивается наибольшая размерная стойкость инструмента  $T_p$  и минимальный его износ.

Режимы резания, обеспечивающие заданные параметры поверхностного слоя и точности обработки, определяются следующим образом:

$$(t, S, v) = f \left\{ \sigma_{\text{ост}}, R_z, h_c, \beta_g, T_p, \sigma_T, E_g, \tau_p, \beta_1, \mu, \lambda, \lambda_p, \lambda_{\text{ст}}, \theta_{\text{пл}}, \alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, r, \rho_1, \delta, J_{\text{сист}}, B_1, H_1, H, L_p \right\},$$

где  $\beta_1$  - коэффициент температурного линейного расширения материала обрабатываемой детали;  $\mu$  - коэффициент Пуассона обрабатываемого материала;  $\lambda_{\text{ст}}$  - коэффициент температурного линейного расширения мате-

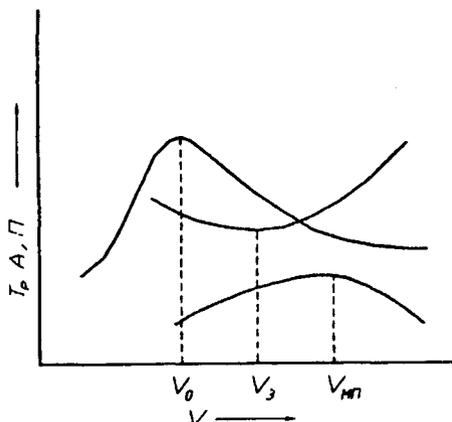


Рис. 2.1.4. Влияние скорости резания на размерную стойкость инструмента  $T_p$ , производительность  $\Pi$  и себестоимость обработки  $A$

риала державки резца;  $j_{\text{сист}}$  - жесткость технологической системы СПИЗ;  $B_1$ ,  $H_1$  - высота и ширина державки резца;  $L_p$  - вылет державки резца;  $H$  - размер обрабатываемой детали.

Снижение или повышение скорости резания по сравнению с оптимальной приводит к значительному увеличению интенсивности износа и снижению размерной стойкости инструмента, что оказывает влияние на параметры качества поверхностного слоя и точность обработки. Однако в некоторых случаях, а именно в условиях гибких автоматизированных производств и «безлюдных произ-

водств», экономически выгодно работать на скоростях  $v_3$ , обеспечивающих минимальную себестоимость обработки, хотя при этом снижается размерная стойкость инструмента.

Таким образом, оптимизацию по критерию точности обработки и параметров качества поверхностного слоя необходимо применять при проектировании новых технологических процессов в действующем производстве как средство технически обоснованного назначения режимов резания.

*Определение режимов резания с учетом технико-экономических показателей.* Технологическая себестоимость выполнения операций, зависящая от режимов резания,

$$C_{\text{техн}} = B_c \frac{\pi dl}{1000Sv} + B_c \frac{\pi dl c_1 \left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right)^{x_1} t_{\text{см}}}{\Delta_{\text{изн}}} \left[ \frac{c \left(\frac{a_1}{a}\right)^{1+x} D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0,73}} \right]^{y_1} v^{y_1(1+x)} \left(\frac{\rho_1}{a_1}\right)^{z_1} +$$

$$+ \Gamma_n \frac{c_1 \left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right)^{x_1} \pi dl}{\Delta_{\text{изн}} 1000S} \left[ \frac{c \left(\frac{a_1}{a}\right)^{1+x} D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0,73}} \right]^{y_1} v^{y_1(1+x)} \left(\frac{\rho_1}{a_1}\right)^{z_1}; \quad (2.1.16)$$

скорость резания, соответствующая минимальной себестоимости,

$$v_{\text{min}} = \sqrt[2]{\frac{\Delta_{\text{изн}} B_c}{y_1(1+x)+1 \left[ \frac{c \left(\frac{a_1}{a}\right)^{1+x} D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0,73}} \right]^{y_1} \left( B_c t_{\text{см}} + \Gamma_n \right) \left(\frac{\rho_1}{a_1}\right)^{z_1}}}, \quad (2.1.17)$$

технологическая производительность

$$\theta_{\text{техн}} = \frac{60}{t_m + \frac{t_m}{T} t_{\text{см}}}. \quad (2.1.18)$$

Максимальное значение производительности будет при условии

$$\left( t_m + \frac{t_m}{T} t_{\text{см}} \right) = 0,$$

где

$$t_m + \frac{t_m}{T} t_{\text{см}} = \frac{\pi dl}{1000S} \frac{1}{v} + \frac{c_1 \left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right)^{x_1} \left[ \frac{c \left(\frac{a_1}{a}\right)^{1+x} D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0,73}} \right]^{y_1} v^{y_1(1+x)} \left(\frac{\rho_1}{a_1}\right)^{z_1}}{\Delta_{\text{изн}}}. \quad (2.1.19)$$

Скорость резания, обеспечивающая максимальную производительность,

$$v_{\max} = \frac{\Delta_{\text{ИЗМ}}}{(1+x)y_1 c_1 t_{\text{с.м}} \left( \frac{\tau_p}{\sigma_{\text{н}}} \right)^{x_1} \left[ \frac{c \left( \frac{a_1}{a} \right)^{1+x} D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0,73}} \right]^{y_1} \left( \frac{\rho_1}{a_1} \right)^{z_1}} \frac{1}{(1+x)y_1+1} \quad (2.1.20)$$

Таким образом, по формулам (2.1.17) и (2.1.20) можно определять значения скорости резания, соответствующие одному из условий оптимизации процесса резания: минимальной себестоимости изготовления детали или максимальной производительности обработки.

**Определение режимов резания путем многоуровневой оптимизации.** Необходимость быстрого освоения производства новых изделий требует разработки экспрессивных и, в первую очередь, теоретических методов определения технологических условий обработки, позволяющих на стадии проектирования технологического процесса изготовления закладывать решения, обеспечивающие при минимальных затратах заданные требования к поверхностному слою, так как поверхностный слой детали в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, магнитоэлектрическому, световому и другим воздействиям. Потеря деталью своего служебного назначения и ее разрушение в большинстве случаев начинается с поверхностного слоя.

Задачей технолога является обеспечение комплекса показателей качества поверхностного слоя и точности размеров обработанной детали ( $Ra_o$  - заданная величина среднего арифметического отклонения профиля шероховатой поверхности,  $\sigma_{\text{ост.о}}$  - заданная величина остаточных напряжений в поверхностном слое,  $h_{\text{с.о}}$  - заданная величина глубины наклепа в поверхностном слое обработанной поверхности,  $\Delta T_o$  - заданная величина погрешности обработки). В каждом конкретном случае эксплуатационные свойства детали определяются в большей или меньшей степени каждым из этих показателей. В общем случае отклонение от оптимальной величины любого из этих показателей качества (в сторону увеличения или уменьшения действительной величины показателя) влечет за собой ухудшение эксплуатационных свойств детали. Кроме того, данные показатели имеют различные единицы измерения, поэтому необходимо использовать их относительное, а не абсолютное изменение от оптимальной величины. В качестве целевой функции оптимизации используется функция вида:

$$f(Ra_o, \sigma_{\text{ост.о}}, h_{\text{с.о}}, \delta_{\Sigma o}) = c_1 \left( \frac{Ra - Ra_o}{Ra_o} \right)^2 + c_2 \left( \frac{\sigma_{\text{ост}} - \sigma_{\text{ост.о}}}{\sigma_{\text{ост.о}}} \right)^2 + c_3 \left( \frac{h_c - h_{\text{с.о}}}{h_{\text{с.о}}} \right)^2 + c_4 \left( \frac{\Delta T_{\Sigma} - \Delta T_{\Sigma o}}{\Delta T_{\Sigma o}} \right)^2$$

или, используя обозначения типа  $q_1 \equiv Ra$ ,  $q_2 \equiv \sigma_{\text{ост}}$ ,  $q_3 \equiv h_c$ ,  $q_4 \equiv \Delta T_{\Sigma}$ , функция общего вида:

$$f(Q) = \sum_{i=1}^k c_i \left( \frac{q_i - q_{io}}{q_{io}} \right)^2,$$

где  $c_i$  - соответствующие весовые коэффициенты, позволяющие установить вклад того или иного показателя качества поверхност-

ного слоя детали в ее общую надежность;  $k$  - число показателей качества;  $Q$  - комплекс показателей качества.

В том случае, когда при решении оптимизационной задачи удается обеспечить точное совпадение заданных параметров качества и точности с расчетными, величина целевой функции будет равной нулю, т.е.  $f(Q) = 0$ . В противном случае, когда хотя бы один из расчетных параметров будет отличаться от заданного, целевая функция будет положительной,

т.е.  $f(Q) > 0$ . Поэтому целевая функция в процессе оптимизации должна быть сведена к минимуму.

Кроме того, на процесс резания накладываются ряд ограничений, обусловленных технологией, физикой и механикой процесса резания. Их количество и вид определяются в каждом конкретном случае отдельно, они могут иметь и простую, и довольно сложную форму зависимостей. Наиболее часто используются ограничения следующего вида:

- 1) ограничения по подаче;
- 2) ограничения по скорости резания;
- 3) ограничения по стойкости инструмента.

Кроме перечисленных на процесс оптимизационного поиска могут в каждом конкретном случае накладываться ограничения, связанные с физикой и технологией процесса, как правило, имеющие сложный, ярко выраженный нелинейный характер. Например, ограничения по мощности приводов, ограничения по прочности режущего инструмента, ограничения по температуре в зоне обработки, по силам резания и т.п.

Для решения поставленной задачи используется алгоритм оптимизационного поиска, построенный на базе методов нежесткого допуска, штрафных функций и деформируемого многогранника.

Разработанный поисковый алгоритм является базовым элементом системы расчета режимов обработки, обеспечивающих заданные показатели точности и качества поверхностного слоя деталей. Методика работы системы расчета режимов резания с использованием оптимизационного алгоритма нежесткого допуска представлена на рис. 2.1.5.

В ряде случаев при проведении оптимизационного поиска с целью получения расчетных величин режимов обработки (сочетания скорости резания  $v$ , подачи  $S$  и глубины резания  $t$  или сочетания скорости  $v$  и подачи  $S$ ) не удается обеспечить требуемый комплекс показателей качества поверхностного слоя и точность обработки детали, то есть один из нескольких показателей, входящих в целевую функцию оптимизации. Даже при лучшем решении задачи оптимизации имеют значительные отклонения от своих оптимальных значений. Такая ситуация наиболее часто возникает при числе показателей, входящих в целевую функцию, параметров точности и качества поверхностного слоя, превышающем число переменных процесса оптимизационного поиска изменяемых технологических параметров обработки.

Анализ проблемы назначения режимов резания, обеспечивающих комплекс опти-

мальных параметров качества и заданную точность обработки, результаты многочисленных практических расчетов, позволили сделать вывод о необходимости использования в ряде случаев большего количества переменных оптимизационного поиска с целью повышения эффективности расчетов и повышения общей надежности результатов вычислений. В то же время, использование большего числа переменных при проведении оптимизационного поиска, особенно при использовании сложных, рассматриваемых при каждом изменении переменных процесса ограничений, таких как ограничения по температуре в зоне резания, по силам резания и т.п., приводит к резкому увеличению времени решения задачи оптимизации. Все это требует применения более гибкого подхода к решению задачи назначения режимов обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхностного слоя и точности обработки. С целью преодоления данной проблемы предлагается следующий алгоритм многоуровневой системы оптимизации.

На первом этапе расчета режимов в качестве переменных процесса используются величины скорости резания  $v$ , подачи  $S$  и (при желании технолога) глубины резания  $t$ . Если в процессе оптимизации получаемые при рассчитанных величинах  $S$ ,  $v$ ,  $t$  показатели качества поверхностного слоя и точности обработки удовлетворяют их заданным оптимальным величинам, результаты расчета считаются окончательными и процесс заканчивается. Иначе в число переменных включается одна или более дополнительных величин, влияющих на процесс резания, например, геометрические параметры  $r$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi_1$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  и т.д., уменьшается размер деформируемого многогранника, а в качестве исходной точки для расчета используются результаты предыдущего уровня и производится новая оптимизация. Число уровней оптимизации, число переменных процесса оптимизации на каждом уровне определяется технологом заранее и задается в специальной подпрограмме описания исходных данных.

Использование многоуровневого алгоритма в системе обеспечивает значительно лучшее приближение получаемых показателей точности и качества обработки к их заданным величинам.

Оптимальное управление процессом механообработки предполагает решение двухэтапной задачи: задачи внешней оптимизации - назначения технологических условий обработки, обеспечивающих получение деталей заданной точности с требуемыми параметрами

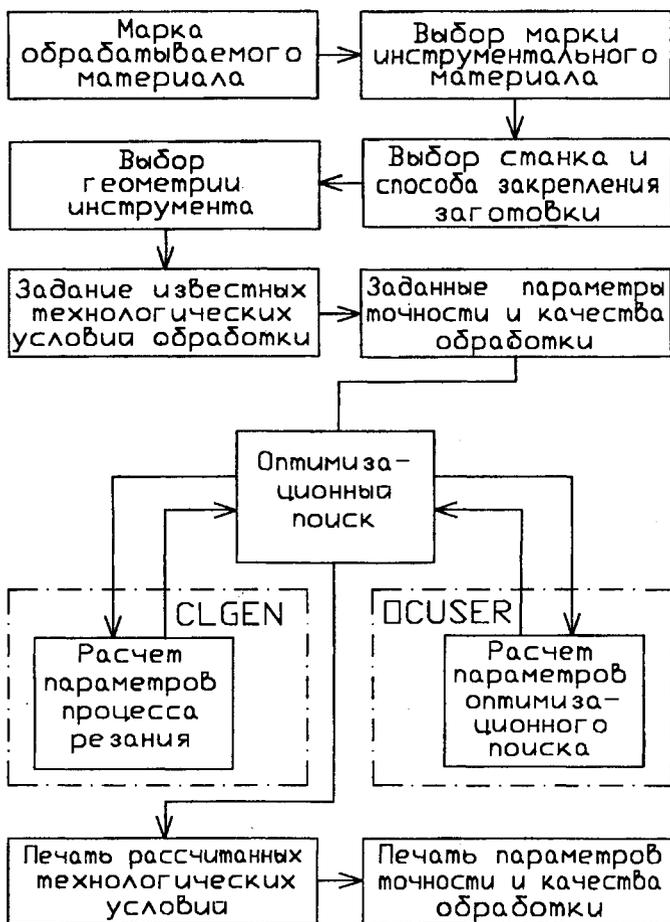


Рис. 2.1.5. Алгоритм работы системы расчета технологических условий обработки

качества поверхностного слоя при стационарном протекании процесса резания, и задачи внутренней оптимизации - автоматизированного управления процессом обработки, позволяющего компенсировать нестабильность процесса, вызванную износом режущего инструмента, колебаниями припуска заготовки и другими факторами.

Заданному комплексу показателей качества поверхностного слоя соответствует некоторая определенная величина энергетического критерия  $A$  ( $A = a_f b(c_p) \theta / P_z$ , где  $P_z$  - сила резания). Это положение может быть положено в основу алгоритма работы автоматизированной системы управления процессом резания, обеспечивающей получение детали заданной точности с требуемыми показателями качества поверхностного слоя. Для практической реализации алгоритма авторами системы использован станок с ЧПУ мод. 16A20F3C43

с системой ЧПУ MC2109, оснащенный датчиками температуры и силы резания. Для организации связи системы электроавтоматики станка с управляющей ЭВМ типа IBM PC разработан интерфейсный блок и доработано математическое обеспечение ЧПУ.

После ввода в управляющую ЭВМ геометрии детали и режущего инструмента, марок обрабатываемого и инструментального материалов, параметров станочного оборудования и приспособлений и других известных технологических условий обработки, а также после задания требуемых показателей точности обработки и качества поверхностного слоя детали, система расчета режимов резания определяет оптимальные условия обработки. Для полученных условий обработки определяется оптимальная величина энергетического критерия и пределы его возможного отклонения, зависящие от величин допустимых от-

клонений параметров качества от их требуемых величин. Полученные режимы резания передаются на станок и производится обработка детали. Алгоритм работы системы представлен на рис. 2.1.6.

В процессе обработки контролируются текущие величины силы резания и температуры в зоне резания. По полученным величинам рассчитывается текущая величина энергетического критерия. В случае отклонения этой величины за допустимые пределы проводится расчет по специальному алгоритму но-

вых режимов обработки, обеспечивающих поддержание критерия на заданной оптимальной величине.

Новые режимы передаются на станок, изменяются условия процесса резания, что позволяет компенсировать нестабильность его протекания. Поддержание стабильным энергетического критерия обеспечивает получение комплекса заданных показателей точности и качества поверхностного слоя обрабатываемой детали.



Рис. 2.1.6. Алгоритм работы автоматизированной системы управления

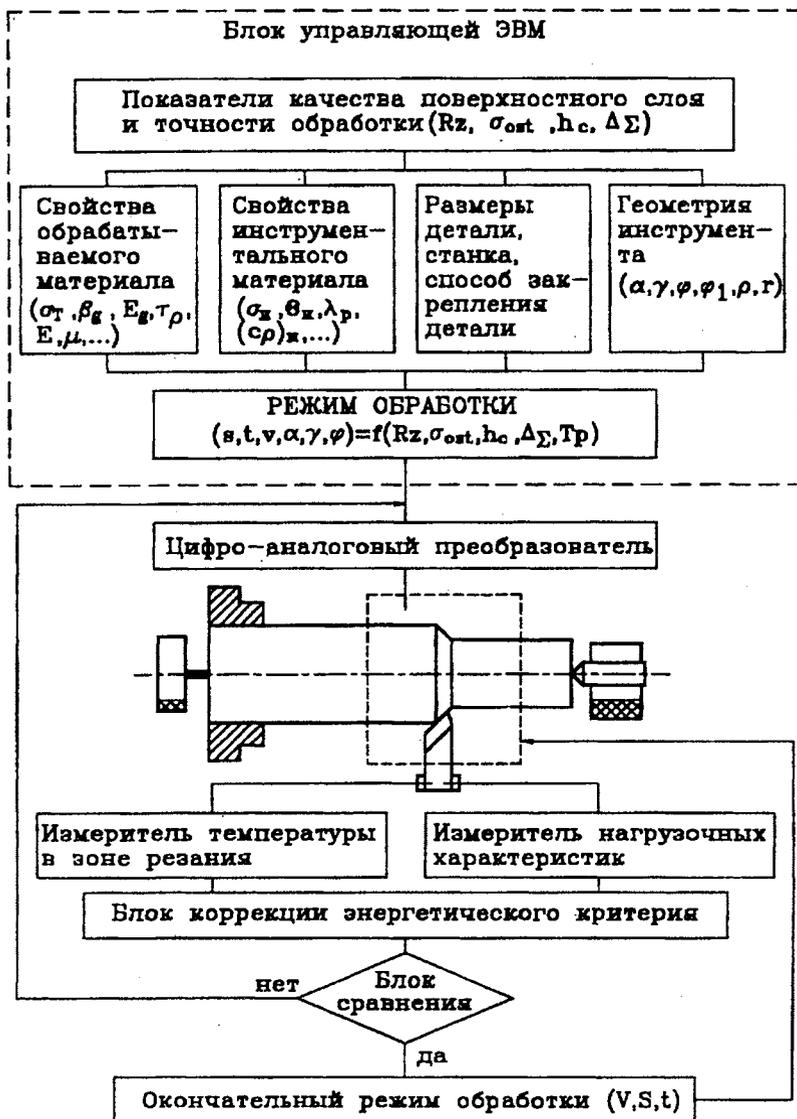


Рис. 2.1.7. Система автоматизированного управления процессом обработки

Разработанная система управления процессом обработки (рис. 2.1.7) опробована в лабораторных условиях на различных обрабатываемых и инструментальных материалах. Комплексное решение задач внешней и внутренней оптимизации позволило помимо обеспечения заданного качества обработки деталей, их эксплуатационных свойств сократить сроки технологического проектирования, повысить производительность процесса обработки.

## 2.1.2. РЕЗАНИЕ ЧУГУНОВ И СТАЛЕЙ

Химический состав и механические свойства чугунов и сталей определяют одно из основных свойств применительно к обработке резанием - обрабатываемость.

*Обрабатываемость* - технологическое свойство материала, определяющее его способность подвергаться резанию. В табл. 2.1.1. обрабатываемость материала представлена коэффициентом  $k_v = v/v_3$ , где  $v$  - скорость

### 2.1.1. Обрабатываемость чугунов и сталей

Обрабатываемый материал			Значения $k_v$ при обработке инструментом	
Группа материала	Марка	Твердость HB	быстрорежущим	твердосплавным
<b>Чугуны</b>				
Серый	СЧ 15 - СЧ 35	120-300	1,8-0,4	1,6-0,45
Высокопрочный	ВЧ 35 - ВЧ 80	140-300	1,4-0,2	1,6-0,4
Ковкий	КЧ 30-6 - КЧ 70-2	110-240	1,7-0,9	1,9-1,0
Легированный	ЧН15Д7 ХШ	120-250	0,7-0,5	0,89-0,72
<b>Углеродистые стали</b>				
Конструкционные обычного качества ( $C \leq 0,5\%$ )	Ст0 - Ст6	77 - 169	1,8 - 1,3	2,1 - 1,4
Качественные	10 - 60	169 - 317	1,4 - 0,6	1,5 - 0,85
Повышенной и высокой обрабатываемости резанием	A12 - A40Г	107 - 248	1,8 - 0,8	2,2 - 0,96
Конструкционные качественные и инструментальные ( $C > 0,6\%$ )	65 - 70, У7 - У13	169 - 200	0,55 - 0,2	0,8 - 0,34
<b>Легированные стали</b>				
<b>Низколегированные</b>				
Хромистые	15Х - 50Х, ШХ15	126 - 375	0,9 - 0,65	1,25 - 0,7
Никелевые	25Н - 40Н	128 - 375	1,4 - 0,7	1,83 - 0,58
Марганцовистые	15Г - 70Г	128 - 375	1,1 - 0,45	1,2 - 0,7
Содержащие хром, марганец, кремний	15ХГ - 35ХГ2 20ХГС - 45ХГСЛ	128 - 375	1,2 - 0,35	1,2 - 0,7

<b>Среднелегированные</b>				
Хромоникелевые	12ХН3 - 37ХН3А	128 - 375	1,05 - 0,5	1,15 - 0,7
Содержащие хром, молибден, никель, алюминий	35ХМА - 38Х2МЮЛ	128 - 375	0,9 - 0,4	0,95 - 0,55
Содержащие хром, никель, вольфрам, ванадий, молибден	12Х2НВФА - 50ХФЛ	174 - 375	0,6 - 0,2	0,8 - 0,31
Инструментальные	ХВГ, Р6М5, Р9Ф5		0,2 - 0,1	0,41 - 0,17
<b>Высокопрочные стали</b>				
Содержащие хром, кремний, никель, молибден, вольфрам, ванадий	28Х3СНМВФА,	450	0,3	0,44
	38Х5МСФЛ,	460	0,25	0,36
	43Х3СНМВФА	460	0,15	0,24
<b>Коррозионно-стойкие стали</b>				
Содержащие хром, кремний, никель, титан, молибден, вольфрам, ванадий, бор, марганец	03Х12Н10МГ	277 - 302	0,9	1,2
	07Х16Н6	285	0,8	1,0
	30Х13	225	0,8	1,0
	13Х12НВМФ2	262 - 352	0,9 - 0,7	1,1 - 0,9
	14Х17Н2	262 - 383	0,8 - 0,5	1,0 - 0,6
	10Х11Н23Т3МР	262	0,35	0,45
	17Х12НН18МФБ	262 - 321	0,5	0,65

Примечание. Эталонным материалом являются: для чугунов СЧ 24, для сталей - сталь 40.

резания оцениваемого материала;  $v_3$  - скорость резания эталонного материала.

Обрабатываемость материала не является физической константой материала и зависит от его химического состава, термической обработки, микроструктуры и условий обработки и др.

Основное влияние на обрабатываемость чугуна оказывает его микроструктура и механические свойства.

**Графит.** Обрабатываемость чугуна улучшается с увеличением содержания графита и уменьшением размеров его включений.

**Феррит.** Увеличение содержания феррита приводит к улучшению обрабатываемости чугуна.

**Перлит.** Увеличение содержания перлита ухудшает обрабатываемость чугуна. Пластинчатый перлит обрабатывается лучше, чем зернистый.

**Карбиды.** Наличие карбидов резко снижает обрабатываемость чугуна.

С повышением твердости и прочности чугуна обрабатываемость его ухудшается. Основное влияние на обрабатываемость стали оказывает химический состав и микроструктура. С повышением содержания углерода обрабатываемость стали снижается. Повышенные содержания серы улучшает ее обрабатываемость. Повышение содержания марганца более 2 % ухудшает обрабатываемость стали.

Обрабатываемость сталей ухудшается с увеличением содержания в них легирующих элементов (в порядке уменьшения степени влияния): алюминия, кремния, титана, ванадия, хрома, вольфрама, никеля, бора, молибдена. Обрабатываемость сталей улучшается с увеличением содержания в них таких элементов как сера, фосфор, свинец, селен, теллур, кальций.

Микроструктура влияет на обрабатываемость стали следующим образом.

**Феррит.** В низкоуглеродистых сталях ( $C < 0,3\%$ ) увеличение феррита снижает их обрабатываемость; при содержании углерода более 0,3 % увеличение содержания феррита улучшает обрабатываемость стали.

**Перлит.** При содержании углерода до 0,5 % лучшую обрабатываемость имеют стали с пластическим перлитом, при содержании углерода более 0,5 % - с зернистым.

**Сорбит.** Обрабатываемость улучшается при обработке твердосплавным инструментом и ухудшается при обработке быстрорежущим.

**Аустенит** резко снижает обрабатываемость.

**Марпенсит** имеет низкую обрабатываемость твердосплавным инструментом и удовлетворительную - инструментом с синтетическими сверхтвердыми материалами.

**Размер зерна.** С увеличением размера зерна обрабатываемость стали улучшается.

**Неметаллические включения.** Оксиды, нитриды, карбиды алюминия, кремния, титана, вольфрама, ванадия снижают обрабатываемость стали, оксиды и сульфиды марганца, железа, кальция - улучшают.

**Инструментальные и абразивные материалы.** Для лезвийной обработки чугунов и сталей применяются, в основном, быстрорежущие стали (БРС); металлокерамические твердые сплавы (ТС), минералокерамика (МК) и сверхтвердые материалы (СТМ) (инструментальные материалы расположены в порядке снижения прочности на изгиб и в порядке возрастания теплостойкости и износостойкости). БРС применяют для изготовления резбонарезного и зубообрабатывающего инструмента, сверл, зенкеров, разверток, фасонных резцов, протяжек и инструментов со сложным профилем режущих лезвий. ТС наиболее широко применяют при точении, фрезеровании, сверлении, зенкерованием, развертывании, протягивании чугунных деталей. МК и СТМ применяют, в основном, при прецизионном точении и фрезеровании, в редких случаях МК может использоваться при полустойковой обработке чугунных и стальных деталей.

БРС являются универсальным инструментальным материалом и применяются при резании с большими сечениями среза и малыми скоростями резания. Различают базовую группу БРС - стали нормальной производимости (P18, P6M5, P12), используемые для обработки конструкционных сталей с твердостью до HB280 и феррито-перлитных чугунов с твердостью до HB220; БРС повышенной производимости: вольфрамокобальтовые (P9K5, P9K10 и др.), вольфрамованадиевые (P9Ф5, P12Ф3 и др.), вольфрамомолибденовые с кобальтом (P6M5K5, P9M4K8) и с ванадием (P6M5Ф3, P6M5Ф2K8, P12Ф2K5M3 и др.), применяемые для обработки конструкционных сталей с твердостью более HB280, перлитных чугунов, коррозионностойких, высокопрочных, жаростойких и жаропрочных сталей. Порошковые БРС (P6M5Ф3-МП, I3P6M5Ф3-МП, P6M5Ф2K8-МП) применяют аналогично вышеприведенным, но обеспечивают повышение стойкости в 1,3-2 раза. Твердые сплавы делятся на следующие группы: ВК (вольфрамо-кобальтовая), ТТК (титано-тантало-вольфрамо-кобальтовая),

ТК (титано-вольфрамо-кобальтовая) и БВТС (безвольфрамовые твердые сплавы). Существуют ТС серии МС, которые являются аналогами обычных ТС, но имеют лучшие стойкостные свойства: вольфрамо-кобальтовые МС301 - МС347, титано-тантало-вольфрамо-кобальтовые МС221 - МС241, титано-вольфрамо-кобальтовые МС101 - МС146.

Минералокерамические инструментальные материалы представлены оксидной (ЦМ, ВО) и оксидно-карбидной (В, ВОК) керамикой. Сверхтвердые инструментальные материалы - природным и синтетическим алмазом (А, АС) и кубическим нитридом бора (композиты 01, 02, 03 и т.д.).

Твердые сплавы группы ВК целесообразно использовать для обработки чугунов, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, группы ТТК - для обработки коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, а также черновой обработки легированных сталей, группы ТК - для обработки углеродистых и легированных сталей, БВТС - чистой и получистой обработки углеродистых и легированных сталей. Твердые сплавы МС применяются аналогично ТС групп ВК, ТТК и ТК, но со скоростями резания большими на 15-30 %. Оксидно-карбидная керамика используется для получистой и чистой обработки закаленных и незакаленных сталей и чугунов (ВОК71), оксидная керамика - для чистой обработки закаленных сталей (ВО13, ЦМ332). Из сверхтвердых инструментальных материалов для чистой обработки закаленных сталей и чугунов следует использовать только нитрид бора.

При черновой обработке, а также в условиях ударной нагрузки (большие, в том числе изменяющиеся силы, небольшая температура), следует использовать марку твердого сплава с повышенным содержанием кобальта (ВК8, МС347, ТТ7К12, Т5К10, КНТ30), при чистой обработке с большими скоростями (малые силы, большая температура) - твердый сплав с пониженным содержанием кобальта (ВК3, МС301, ТТ7К21Т, Т30К4, МС101).

Для снижения адгезии инструмента с обрабатываемым материалом, содержащим легирующий элемент, следует использовать инструментальный материал без данного элемента или с пониженным его содержанием. Поэтому при обработке жаропрочных сталей с повышенным содержанием титана не следует использовать твердый сплав групп ТК и ТТК, а при обработке закаленных сталей и чугунов - алмазный инструмент.

Для повышения износостойкости быстрорежущего или твердосплавного инструмента

на всю поверхность наносят покрытие из нитрида титана; при этом стойкость инструмента повышается в 1,5-3 раза. Для обработки резанием чугунов и сталей широко применяются и алмазно-абразивные инструменты.

**Материал абразивного зерна** определяется в зависимости от марки обрабатываемого материала и стадии обработки. Для абразивной обработки сталей используется электрокорунд и монокорунд. Электрокорунд нормальный (13А, 14А, 15А) используется для шлифования, в том числе и обдирочного незакаленных сталей; электрокорунд белый (23А, 24А, 25А) - для обычного и скоростного шлифования закаленных углеродистых и легированных сталей; электрокорунд циркониевый (38А) - для обдирочного шлифования сталей; электрокорунд хромтитанистый (91А, 92А, 93А, 94А) - для обычного и скоростного шлифования закаленных углеродистых легированных и труднообрабатываемых сталей; монокорунд (43А) - для шлифования и заточивания труднообрабатываемых и инструментальных сталей.

Для абразивной обработки чугунов используется карбид кремния черный (54С) и зеленый (63С и 64С).

**Зернистость абразивного материала.** Крупнозернистый инструмент (более 40 мкм) применяется при обдирочных и черновых операциях (припуск большой), при обработке вязких (легированных) сталей, при большой площади контакта инструмента с деталью (плоское шлифование торцом круга). Средне- и мелкозернистый инструмент (32 мкм и менее) при высоких требованиях к точности обработанной поверхности и малой шероховатости, при обработке хрупких материалов (чугунов) и твердых закаленных сталей, при заточке режущего инструмента. При обработке твердых (закаленных чугунов и сталей) применяют мягкие круги; при обработке мягких (незакаленных легированных) - твердые. Мягкими кругами шлифуются также коррозионно-стойкие и жаропрочные стали.

**Структура круга.** Вязкие стали следует обрабатывать кругами с открытой структурой, твердые и хрупкие чугуны - с закрытой. При черновых и обдирочных стадиях используются круги с более открытой структурой, на чистовых и отделочных стадиях - с более закрытой. Чем меньше площадь контакта детали с кругом, тем более закрытую структуру следует использовать.

**Смазочно-охлаждающие технологические среды.** Несмотря на многообразие СОТС наибольшее распространение при резании чугунов и сталей получили жидкие СОТС. При

этом у них преобладает либо охлаждающее воздействие (водные растворы солей), либо смазочное (масла). Исходя из данных особенностей СОТС и проводят их выбор (с учетом преобладания того или другого воздействия). При обработке пластичных сталей, склонных к образованию сливной стружки (стали легированные, коррозионно-стойкие, жаропрочные), при чистовых стадиях обработки, а также при развертывании, резбонарезании, протягивании, зубообработке, шлицефрезеровании, профильном и глубинном шлифовании, резбошлифовании, полировании, доводке и притирке чугунов и сталей целесообразно использовать СОТС с преобладающим смазочным воздействием (Аквол-10М, МР-1У, МР-4, ОСМ-1 и др.). При обработке хрупких, склонных к образованию элементной суставчатой и хрупкой сливной стружки (чугуны, углеродистые и низколегированные стали), при черновых стадиях точения, растачивания, сверления, зенкерования, фрезерования, а также на операциях отрезки пилами, круглого, внутреннего, бесцентрового шлифования чугунов и сталей целесообразно использовать СОТС с преобладающим охлаждающим воздействием (водные растворы 2-5 % Укринола-1, Аквола-6, Синтола-2, ЭГТ, ЭТ-2 и др.). При необходимости предотвратить распространение из зоны резания пылевидной стружки или графитовой пыли (при лезвийной обработке чугуна) следует использовать жидкие СОТС в виде тумана. Капли жидкости адсорбируют частицы пыли и лишают их летучести.

**Период стойкости инструментов** - время резания новым или восстановленным режущим инструментом (лезвием) от начала резания до отказа. Значения периода стойкости лезвийного инструмента зависят от ряда факторов: условий производства, типа оборудования, конструкции инструмента, инструментального материала. Чем выше серийность производства, тем меньший период стойкости инструмента следует принимать; чем выше стоимость станкоминуты используемого оборудования, тем меньший период стойкости инструмента следует принимать. Чем сложнее и дороже инструмент в изготовлении и наладке, тем больший период стойкости инструмента следует принимать; чем больше время, затрачиваемое на смену или восстановление инструмента, тем больший период стойкости следует принимать; чем выше стоимость материала инструмента, тем больший период стойкости следует принимать.

Период стойкости абразивного инструмента не является ограничивающим фактором и поэтому режимы абразивного резания при-

нимаются исходя из требований по точности и качеству обработанной поверхности. Средние значения периодов стойкости лезвийных инструментов представлены в табл. 2.1.2.

**Режимы резания.** Различное содержание в чугунах и сталях углерода и легирующих элементов определяет различия режимов механической обработки деталей из данных сплавов. Кроме химического состава обрабатываемого материала режимы резания определяются требованиями по производительности, себестоимости, качеству поверхности, применяемому инструментальному материалу.

Требуемые прочность обработки и качество поверхности определяют метод и стадию обработки, которым соответствует диапазон параметров режимов резания (табл. 2.1.3, 2.1.4).

В табл. 2.1.3 представлены диапазоны режимов резания чугунов и сталей, имеющих обрабатываемость, близкую к эталонной ( $k_v = 0,9 + 1,1$ ), для прочих чугунов и сталей режимы резания требуют корректировки в соответствии с их коэффициентом обрабатываемости  $k_v$  (см. табл. 2.1.1).

**Улучшение обрабатываемости.** Улучшить обрабатываемость чугуна возможно на стадии его получения путем повышения содержания меди, а также модифицирования, вакуумирования и продувки газами жидкого расплава. При этом уменьшается содержание твердых неметаллических включений, а также на стадии последующей термической обработки - путем создания благоприятной микроструктуры.

Улучшить обрабатываемость стали возможно на стадии ее получения за счет модифицирования специальными добавками (серой, свинцом, теллуrom, селеном, кальцием), формирования неметаллических включений благоприятного состава и формы (подбором раскислителей), а также на стадии последующей термической обработки путем создания благоприятной структуры.

Улучшить обрабатываемость стали в процессе механической обработки можно:

- 1) подбором рациональной геометрии лезвия инструмента (двойная заточка лезвия, подточка перемычки сверла, радиус скругления режущей кромки, фаска на передней поверхности лезвия) и установки стружколомов;

- 2) подбором рациональной кинематики процесса резания. При торцовом фрезеровании стальных заготовок необходимо обеспечить несимметричное их расположение относительно фрезы: для заготовок из конструк-

### 2.1.2. Периоды стойкости лезвийных инструментов

Инструмент	Вид обработки и диаметр инструмента	Инструментальный материал	Обрабатываемый материал							
			Чугун	Сталь углеродистая	Сталь легированная	Сталь высокопрочная, коррозионно-стойкая, жаропрочная				
			Период стойкости T, мин							
Резец	Точение:	ТС (ВК, ТТК, ТК) БВТС (ТМ, ТН)	90	90	60	30				
	черновое									
	получистовое	ТС (ВК, ТТК, ТК), МК (ВОК, ЦМ)	60	60	60	30				
	чистовое									
	тонкое	СТМ	90	90	80-90	80-90				
	Отрезание, про- резание канавок	ТС	30	30	30	30				
БРС		30	30	30	30					
Сверло	Диаметр, мм:	БРС/ТС								
	до 5						20/15	15/18	6/5	6/5
	« 10						35/25	25/10	10/10	10/10
	« 20						60/45	45/20	17/20	17/20
	« 40						105/70	70/35	35/-	25/-
	« 60						170/-	100/-	-/-	-/-
Зенкер	Диаметр, мм:	БРС/ТС								
	до 20						30/30	30/30	24/24	24/24
	« 40						55/55	50/50	50/50	50/50
	« 60	70/70	80/80							
Развертка	Диаметр, мм:	БРС/ТС								
	до 20						60/60	40/30	40/	40/
	« 40						120/100	80/50	60/	60/
	« 60	180/160	120/100							

Метчик	Диаметр, мм:	БРС, ТС	30	40	20	15														
	до 10						60	90	30	20										
	св. 10																			
Круглая плашка	-	БРС	90	90	90	90														
Фреза	Торцовая:	БРС/ТС																		
	$\varnothing$ 100 мм						60/120	60/120	60/120	60/120										
	$\varnothing$ 200 мм						100/200	100/200	100/200	100/200										
	Концевая:																			
	$\varnothing$ 20 мм											40/60	40/60	40/60	40/60					
	$\varnothing$ 50 мм											60/80	60/80	40/60	40/60					
	Цилиндрическая											90/	90/	90/	80/					
	Дисковая																			
	$\varnothing$ 100 мм																60/120	60/120	60/120	60/120
	$\varnothing$ 150 мм																80/150	80/150	80/150	80/150
Зубообрабатывающая (червячная):	БРС																			
<i>t</i> до 4,0						480											240	240	240	
<i>t</i> до 8,0						960											480	480	480	
Протяжка	Круглая	БРС/ТС	45-90/180	55-70/180	45-55/120	45-55/120														
	Шлицевая		35-70/180	45-55/180	25-45/120	25-45/120														

Примечание. Периоды стойкости резцов из ТС приведены для напайных пластин; для резцов со сменными пластинами из ТС период стойкости может быть снижен в 1,5-2 раза.

### 2.1.3. Режимы лезвийного резания

Метод обработки и диаметр инструмента	Чугун			Сталь		
	$t$ , мм	$S_o$ , мм ( $S_z$ , мм)	$v$ , м/мин	$t$ , мм	$S_o$ , мм ( $S_z$ , мм)	$v$ , м/мин
1. Точение, растачивание:						
черновое	4-12	1-3,5	30-130	2-10	1-3,0	40-100
получистовое	2-4	0,35-1,5	100-185	1-3	0,35-1,5	80-150
чистовое	0,15-2,0	0,05-0,5	170-320	0,15-1,5	0,05-0,5	120-300
2. Фрезерование торцовое, цилиндрическое:						
черновое	2,0-8,0	(0,1-0,6)	80-120	2,0-8,0	(0,06-0,9)	70-100
получистовое	1,0-2,5	(0,05-0,2)	100-198	1,0-2,5	(0,05-0,15)	80-150
чистовое	0,45-1,5	(0,01-0,1)	155-300	0,4-1,2	(0,01-0,2)	100-300
3. Сверление, $d=4\div 40$ мм	2-20	0,07-0,52	25-65	2-20	0,06-0,5	24-50
4. Рассверливание, $d=40\div 100$ мм	4-25	1,24-2,2	30-42	4-25	0,95-1,7	28-34
5. Зенкерование, $d=10\div 100$ мм						
черновое	1,44-5,94	0,99-2,58	19-44	1,44-5,94	0,76-1,98	22-44
получистовое	0,46-0,91	0,48-1,84	29-75	0,46-0,91	0,37-1,42	36-65
чистовое	0,41-0,56	0,48-1,26	37-75	0,41-0,56	0,37-0,97	44-70

6. Развертывание, $d=16\div 100$ мм						
черновое	0,23-0,3	2,49-5,4	6,4-17	0,23-0,3	0,99-2,17	8,4-21
получистовое	0,1-0,12	2,05-4,87	10-24	0,1-0,12	0,82-1,95	10,9-27
чистовое	0,06-0,08	1,09-4,44	11-27	0,06-0,08	0,68-1,77	11,5-30
7. Стругание, долбление:						
		$S_{2x}$ , мм			$S_{2x}$ , мм	
черновое	2,5-20	0,6-2,0	50-25	2,0-10	0,3-2,0	45-25
получистовое	1,5-2,5	0,7-1,2	75-40	1,0-2,0	0,9-1,5	60-30
чистовое	1,0-5	0,35-1,0	80-45	0,8-1,0	0,25-0,9	70-37
8. Резбонарезание резцом:						
предварительный проход	0,15-0,6P	-	60-90	0,1P-0,6P	-	84-139
чистовой проход	0,07-0,1	P	-	0,07-0,1	P	-
метчиком	-	-	5,9-11,3	-	-	8,3-15,8
плашкой	-	-	2,0-7,0	-	-	2,45-7,9
9. Протягивание						
	-	(0,08-0,2)	3-15	-	(0,06-0,15)	3-15
10. Зубофрезерование:						
Червячные фрезы модульные:						
черновое, получистовое	-	1,0-3,6	17-48	-	0,8-3,4	22-60
чистовое	-	0,5-2,0	19-50	-	0,5-2,0	24-62
Дисковые фрезы модульные						
	-	1,2-4,5	12-27	-	0,7-2,5	17-32

Примечание. Данные таблицы приведены для условий резания твердосплавным (1-6) и быстрорежущим (7-10) инструментом на станках средней группы жесткости; P - шаг резьбы.

### 2.1.4. Режимы абразивного резания

Метод обработки	Чугуны и стали				
	$t$ , мм	Продольная подача на оборот $S_o$ , мм	Радиальная подача на оборот $S_p$ , мм	$v_k$ , м/с	Скорость заготовки $v_3$ , м/мин
<b>Круглое наружное шлифование</b>					
С продольной подачей на каждый ход:					
предварительное	0,01-0,025	(0,3-0,7) <i>B</i>	-	30-35	15-25
окончательное	0,05-0,015	(0,2-0,4) <i>B</i>	-	-	15-55
С продольной подачей на двойной ход:	0,015-0,05	(0,3-0,7) <i>B</i>	-	30-35	20-30
Врезное:					
предварительное	-	-	0,0025-0,075	-	30-50
окончательное	-	-	0,001-0,005	30-35	40-60
<b>Круглое внутреннее шлифование</b>					
С продольной подачей на каждый ход:					
предварительное	0,005-0,02	(0,4-0,7) <i>B</i>		30-35	15-30
окончательное	0,0025-0,01	(0,25-0,4) <i>B</i>		-	20-40
<b>Плоское шлифование</b>					
Периферией круга:					
предварительное	0,005-0,015	(0,3-0,6) <i>B</i>		30-25	8-30
окончательное	0,005-0,01	(0,2-0,25) <i>B</i>		-	20-60

Торцом круга:					
предварительное	0,015-0,04	-	-	30-35	4-12
окончательное	0,005-0,01	-	-	-	2-3
<b>Хонингование</b>	Припуск:	$v_{в.п.}$ , м/мин	$S_{p.}$ , мкм/дв.ход		
предварительное ( $p_d=0,6-1,5$ МПа)	100 мкм	5-27	1,0-3,0	20-80 м/мин	-
окончательное ( $p_d=0,3-0,6$ МПа)	10 мкм	-	0,3-1,0	-	-
<b>Суперфиниширование</b>		$v_{в.п.}$ , м/мин			
$p_d=0,4-0,8$ МПа	-	1,0-2,0	-	-	180-360

П р и м е ч а н и я . 1. Инструментальный материал: электрокорунд для обработки сталей, карбид кремния - для чугунов.

2.  $V$ , мм - высота абразивного круга.

3.  $v_{в.п.}$  - скорость возвратно-поступательного движения инструмента.

4.  $p_d$  - давление брусков на обрабатываемую поверхность.

5. При суперфинишировании: частота колебаний инструмента  $n_k=350-1400$  кол/мин; амплитуда колебаний инструмента  $A=2...6$  мм.

ционных углеродистых и легированных сталей - сдвиг их в направлении врезания зуба фрезы, чем обеспечивается начало резания при малой толщине срезаемого слоя; для заготовок из жаропрочных и коррозионно-стойких сталей - сдвиг заготовки в сторону выхода зуба фрезы из резания, чем обеспечивается выход зуба из резания с минимально возможной толщиной срезаемого слоя;

3) подбором рационального маршрута механической обработки, когда на предшествующих операциях проводится предварительная нагортовка (калибрование, накатывание и др.) вязкой стали;

4) использованием комбинированных методов резания.

### 2.1.3. РЕЗАНИЕ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ И ЖАРОПРОЧНЫХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Развитие современного машиностроительного производства связано с созданием и освоением технологии обработки сталей и сплавов с особыми физико-механическими свойствами, важнейшими из которых являются коррозионная стойкость, жаропрочность и высокая механическая прочность.

Наряду с высокими эксплуатационными свойствами, данные материалы отличаются низким уровнем обрабатываемости.

Обширные теоретико-экспериментальные исследования, проведенные В.Н. Подуревым, А.М. Даниеляном, П.И. Бобриком, Я.Л. Гуревичем, Н.И. Резниковым, В.А. Кривоуховым, А.Д. Чубаровым, А.Ш. Шифринным и другими отечественными учеными, позволили выявить следующие основные особенности резания коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, затрудняющие их лезвийную обработку.

1. Высокое упрочнение обрабатываемого материала в процессе деформации резанием, объясняемое специфическими особенностями строения кристаллической решетки этих материалов. Вследствие повышенной способности к упрочнению при пластической деформации их прочностные свойства  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$  возрастают в 2-4 раза, что сильно влияет на снижение обрабатываемости данных материалов.

2. Малая теплопроводность коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, приводящая к повышенной температуре в зоне контакта инструмента со стружкой и обработанной поверхностью, а следовательно, к активизации явлений адгезии и диффузии в указанных зонах, интенсивному схватыванию контактных поверхностей и разрушению режущей части инструмента.

3. Способность сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах, что приводит к высоким удельным нагрузкам на контактные поверхности инструмента в процессе резания. Усугубляет действие этого фактора низкая теплопроводность данных материалов, благодаря чему высокая температура на контактных поверхностях не позволяет снизить механические свойства обрабатываемого материала на условной плоскости сдвига в зоне стружкообразования.

4. Большая истирающая способность коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, обусловленная наличием в них кроме фазы твердого раствора еще, так называемой, второй фазы, образующей интерметаллидные или карбидные включения. Эти включения действуют на рабочие поверхности инструмента подобно абразиву, приводя к увеличенному износу инструмента. Особенно много подобного рода включений имеют литые жаропрочные сплавы; они еще более сильно изнашивают режущий инструмент. Большое влияние на обрабатываемость указанных материалов имеют и происходящие при их лезвийной обработке структурные превращения, сопровождающиеся выпадением карбидов.

5. Пониженная виброустойчивость движения резания, обусловленная высокой упругостью коррозионно-стойких и жаропрочных материалов при неравномерности протекания их пластического деформирования в процессе резания. Возникновение вибраций приводит к переменным силовым и тепловым нагрузкам на рабочие поверхности инструмента, к микро- и макровыкрашиваниям режущих кромок.

6. Обработка резанием по корке вызывает дополнительное ухудшение обрабатываемости коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов. Это обусловлено усиленным абразивным и ударным воздействием на рабочие поверхности режущего инструмента неметаллических включений, оксидов, сульфидов, силикатов, а также многочисленных пор, образующихся в поверхностном слое указанных материалов при их литье или прессовании. Последнее еще более усиливается значительными поверхностными неровностями корки.

Учитывая рассмотренные особенности, процесс резания коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов протекает следующим образом: вначале рабочие поверхности инструмента соприкасаются с относительно мягким, неупрочненным металлом и под их воздействием происходит пластическая деформация срезаемого слоя, сопровождаемая значительным поглощением энергии. При этом срезаемый слой получает большое уп-

рочнение и приобретает свойства наклепанного металла, т.е. становится хрупким. Запас пластичности при этом в значительной мере исчерпывается и происходит сдвиг-разрушение, образование элемента стружки. Малая теплопроводность этих материалов приводит к резкому снижению отвода тепла в стружку и обрабатываемую заготовку, а следовательно, повышению температуры в зоне контакта режущей части инструмента и заготовки с активизацией процессов адгезии и диффузии.

В результате этого значительно увеличивается износ режущего инструмента и явления налипания (схватывания), вызывающие разрушение режущих кромок инструмента. Интенсификации этих процессов способствуют повышенные механические характеристики обрабатываемого материала при высокой температуре, большая истирающая способность материалов, а также переменное воздействие этих факторов, обусловленное вибрациями.

Одной из особенностей строения жаропрочных сталей и сплавов является их значительная разнородность и неравномерность выделения карбидной и интерметаллидной фаз. В связи с этим при составлении технических условий на заготовки из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, подвергающихся лезвийной обработке, следует уделять особое внимание равномерности их строения, поскольку в этих сплавах часто встречаются неравномерно деформированные зоны после прокатки, штамповки иликовки.

**Основные особенности обработки резанием титановых сплавов следующие:**

1. Малая пластичность, приближающая их по свойствам к высокопрочным материалам. Это приводит к тому, что при обработке образуется специфическая стружка, по внешнему виду похожая на сливную, с малым коэффициентом её усадки. Стружка с малым коэффициентом усадки имеет и малую площадь контакта с передней поверхностью режущего инструмента, что, в сочетании с высокой прочностью титановых сплавов, приводит к большим нормальным давлениям на режущий инструмент, к повышенному его износу.

2. Высокая химическая активность, способствующая при резании активному взаимодействию титановых сплавов с окружающей средой. Благодаря этому по мере увеличения температуры в зоне резания происходит сильное поглощение кислорода и азота из воздуха, что приводит к повышенному окислению. Это вызывает интенсивное окиснообразование и охрупчивание материала вследствие диффузии кислорода и водорода в обрабатываемый материал. Поэтому при лезвийной обработке

титановых сплавов выделяется относительно меньшее количество тепла, чем при обработке резанием жаропрочных сплавов. Вместе с тем титановые сплавы имеют еще более низкую теплопроводность, чем жаропрочные стали и сплавы. Поэтому температура в зоне резания продолжает оставаться высокой, снижая работоспособность инструмента и вызывая интенсивные структурные превращения как в самом обрабатываемом материале, так и в образующейся стружке, окисление которой приводит к повышению её твердости и, соответственно, к повышению способности истирать режущий инструмент.

3. Так же как и при обработке коррозионно-стойких и жаропрочных материалов, титановые сплавы оказывают высокое абразивное воздействие на используемый режущий инструмент вследствие содержания в них высокотвердых включений в виде оксидов нитридов и карбидов.

4. При назначении режимов резания титановых сплавов особое внимание следует уделять вопросам техники безопасности. Образование тонкой стружки, тем более пыли, в процессе стружкообразования приводит к её легкому воспламенению с интенсивным горением. Титановая стружка, покрытая техническими масляными жидкостями, способна к самовозгоранию. Пылеобразная стружка взрывоопасна и вредна для здоровья обслуживающего персонала. С учетом этого при обработке титановых сплавов не следует назначать подачи на оборот менее 0,08 мм, работать инструментом с износом более 0,8...1,0 мм и со скоростями резания более 100...150 м/мин.

**По обрабатываемости резанием тугоплавкие материалы** разделяются на следующие три группы:

- вольфрам и его сплавы;
- молибден, хром и их сплавы;
- ниобий, тантал, ванадий.

Вольфрам является наиболее труднообрабатываемым материалом из всех тугоплавких металлов.

Заготовки из вольфрама получают методами порошковой металлургии, а также дуговой и электронно-лучевой плавкой с последующим прессованием. При всех способах плавки и спекания используют инертную газовую среду или вакуум для предотвращения взаимодействия металла с кислородом, азотом и воздухом.

Заготовки, получаемые методом порошковой металлургии, мало пластичны, поэтому для повышения обрабатываемости их пропитывают расплавленным серебром или медью, после чего вольфрамовые заготовки режутся также легко, как, например, латунь, допуская скорости резания до 400-600 м/мин.

Вольфрамовые заготовки, полученные методом литья с последующим прессованием, имеют высокую плотность и вызывают значительные трудности при их лезвийной обработке, не допуская скорости резания более 60...90 м/мин.

Низкая обрабатываемость вольфрама объясняется его исключительно высокими хрупкостью, твердостью, прочностью, теплоустойчивостью, абразивными свойствами. Другим недостатком вольфрама является склонность к образованию нестойких оксидных пленок.

Вследствие этих причин при обработке вольфрама резанием применяют острозаточенный твердосплавный режущий инструмент, а с целью устранения опасности выкрашивания вольфрамовых заготовок (особенно на кромках) их точение следует вести от середины к торцам, со стороны торцов протачивать фаски до конечного диамет-

ра, по мере возможности со стороны торцов устанавливать подкладки. При обработке тонкостенных деталей надо учитывать возможное их разрушение при закреплении или в процессе резания, если оно сопряжено с возникновением больших сил.

Наиболее рациональными инструментами для токарной обработки вольфрама по корке (до 1,5 мм) являются инструменты с твердосплавными пластинами ВК8, ВК15, ВК8-В, а при небольшой толщине корки (0,3...0,5 мм) - ВК6-М.

Получистовую и чистовую обработку вольфрама рекомендуется осуществлять сплавами ВК6-М, ВК6-ОМ, ВК10-М и Т30К4. Резцы с пластинками твердых сплавов других марок имеют значительно меньшую стойкость. Рекомендуемые геометрические параметры резцов для токарной обработки вольфрама указаны в табл.2.1.5.

**2.1.5. Рекомендуемые геометрические параметры резцов**

Вид обработки	$\gamma_f, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$\varphi_1, ^\circ$	$r, \text{ мм}$
Обдирка	-10	5-10	8-10	45	15	1,0-1,5
Черновая	-5	5-10	8-10	45	15	1,0-1,5
Получистовая	-3-0	5-10	8-10	45	15	0,5-0,8
Чистовая	0	10-15	8-10	30-45	15	0,2-0,3

За критерий затупления резцов, оснащенных твердосплавными пластинками, следует принимать износ по задней поверхности, равный: при черновой обработке 0,9...1 мм; при получистовой обработке 0,5...0,6 мм; при чистовой обработке 0,25...0,3 мм.

Процесс стружкообразования при резании вольфрама протекает по схеме хрупкого разрушения; при этом обработанная поверхность имеет характерную ярко выраженную шероховатость (с правильными рядами надрывов), уменьшающуюся с увеличением скорости резания.

В связи с этим при токарной обработке легированного вольфрама твердосплавными резцами рекомендуются следующие оптимальные режимы резания (табл.2.1.6).

Поправочные коэффициенты  $K_p$  на скорость резания при токарной обработке литого деформируемого вольфрама с различным содержанием молибдена имеют следующие значения (табл. 2.1.7).

При лезвийной обработке вольфрама и его сплавов рационально применять смазочно-охлаждающие жидкости с высокими смазочными свойствами (10% эмульсия Аквол-6, масляные жидкости МР-6, МР-2у с химиче-

ски и поверхностно-активными противозносными присадками).

Указанные СОЖ снижают адгезионное изнашивание режущего инструмента, повышая тем самым его стойкость.

Обрабатываемость вольфрама резанием ввиду его высокой хрупкости зависит от вида операции. Вероятность откальвания и растрескивания при обработанной поверхности особенно велика на операциях, связанных с ударным воздействием инструмента, например при фрезеровании.

Точение вольфрама характеризуется высокой радиальной составляющей силы резания. Это вызывает большие деформации в технологической системе и повышенный износ вершины режущего инструмента (особенно при использовании инструмента с отрицательными углами наклона режущей кромки). Поэтому обработку деталей из вольфрама следует проводить с небольшими глубинами резания ( $t \leq 1,5$  мм, см. табл. 2.1.6).

Одним из основных факторов, способствующих получению наиболее удовлетворительных результатов лезвийной обработки вольфрама, является жесткость технологической системы.

## 2.1.6. Оптимальные режимы резания

Вольфрам	Вид обработки	Режимы резания		
		$t$ , мм	$S_o$ , мм	$v$ , м/мин
Горячепрессованный, пропитанный медью. Плотность 70%	Черновая и получистовая	1-3	0,2-0,3	60-80
	Чистовая	До 1	0,08-0,2	80-120
Металлокерамический	Получистовая	1-2	0,2-0,3	40-60
	Чистовая	До 1	0,08-0,15	60-80
Изготавливаемый методом холодного прессования с последующей проковкой	Обдирка по корке и черновая обработка без корки	1,5-2	0,2-0,3	15-20
	Получистовая	1-1,5	0,2-0,3	20-25
	Чистовая	До 1	0,08-0,15	25-30
Литой деформированный холодного прессования с последующей проковкой	Обдирка по корке и черновая обработка без корки	2-3	0,3-0,5	20-30
	Получистовая	1-2	0,2-0,3	25-35
	Чистовая	До 1	0,08-0,15	30-40
Горячепрессованный без пропитки медью	Обдирка по корке и черновая обработка без корки	2-5	0,3-0,55	15-20
	Получистовая	1-2	0,2-0,3	20-25
	Чистовая	До 1	0,08-0,15	25-30

2.1.7. Поправочные коэффициенты  $K_n$ 

Коэффициент $K_n$	Содержание молибдена, %				
	0	До 10	До 20	До 30	До 50
	1	1,2	1,5	1,8	2,4

Уровень обрабатываемости вольфрамовых заготовок можно поднять путем их нагрева с помощью токов высокой частоты или горелкой до температур 300-400 °С. С повышением температуры вольфрам становится более пластичным при одновременном понижении его прочности, что приводит к увеличению стойкости режущих инструментов в несколько раз, а также к устранению выкрашивания и растрескивания обрабатываемого материала. Нагрев выше указанных температур не рекомендуется, так как это приводит к интенсивному окислению вольфрама и снижению стойкости режущих инструментов.

Заготовки из пористого вольфрама, пропитанные после спекания расплавленными серебром, медью или их сплавами, можно обрабатывать как твердосплавными, так и быстрорежущими инструментами на высоких скоростях резания. После завершения лезвийной обработки таких заготовок пропитывающий металл удаляют интенсивным нагревом.

**Обрабатываемость резания молибдена и его сплавов** менее затруднительна, чем вольфра-

ма, но также имеет ряд характерных особенностей.

Обрабатываемость молибдена резанием определяется способом получения заготовки: молибден, получаемый плавкой, несмотря на то, что он плотнее порошкообразного молибдена, получаемого спеканием, меньше растрескивается и хорошо поддается обработке резанием.

Общей особенностью обработки резанием для обоих видов молибденовых материалов является их высокая истирающая способность.

Другой особенностью молибдена является ограниченный выбор видов используемых СОЖ, так как молибден химически активен и легко взаимодействует с рядом смазочно-охлаждающих жидкостей, например, с осерненными маслами.

При токарной обработке молибдена и его сплавов рекомендуется применение в качестве СОЖ высокохлорированных соединений ( $CCl_4$  хлорпарафин и др.), повышающих стойкость режущих инструментов в 4,5-10 раз.

Особое внимание при лезвийной обработке молибдена следует уделять повышению

жесткости используемой технологической системы, ликвидации в ней зазоров.

Наиболее рационально для токарной обработки молибдена и его сплавов применять

режущие инструменты, оснащенные твердосплавными пластинами ВК6, ВК8, ВК6-М, ТГ10К8-Б со следующими геометрическими параметрами (табл. 2.1.8).

### 2.1.8. Геометрические параметры инструментов, оснащенных твердосплавными пластинами

$\gamma, ^\circ$	$\gamma_f, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$\varphi_1, ^\circ$	$f, \text{мм}$	$r, \text{мм}$
15-20	0-5	10-12	45-60	15-20	$(0,6-0,8) s$	0,2-0,5

Рекомендуемые режимы резания при токарной обработке молибденовых сплавов указаны в табл. 2.1.9:

### 2.1.9. Режимы резания при токарной обработке молибденового сплава

Точение	Марка молибденового сплава	Скорость резания $v, \text{м/мин}$	Подача на оборот $S_o, \text{мм}$	Глубина резания $t, \text{мм}$
Получистовое	ВМ1 ЦСДМ	90-120	0,2-0,5	Св. 1
	ВМ2 ЦМ2-А	80-100		До 4
Чистовое	ВМ1 ЦСДМ	120-150	0,15-0,2	До 1
	ВМ2 ЦМ2-А	90-120		

**Примечание.** Точение по корке молибдена и его сплавов рекомендуется проводить резцами группы ВК с охлаждением на режимах:  $v=15 \div 25 \text{ м/мин}$ ;  $S_o=0,04-0,4 \text{ мм}$  на оборот.

**Чистый ниобий, тантал и их сплавы** по сравнению с другими тугоплавкими металлами (вольфрамом, молибденом и др.) относительно легко обрабатываются резанием. Однако лезвийная обработка ниобия и тантала имеет ряд нижеуказанных особенностей.

Обладая большой пластичностью и вязкостью, ниобий и тантал склонны к налипанию на режущие кромки инструмента и к образованию задиров и наволакиваний на обрабатываемую поверхность частиц металла. Последнее объясняется высокой температурой, возникающей в зоне резания вследствие низкой теплопроводности тантала и ниобия и больших сил трения между поверхностями инструмента и обрабатываемой детали. Для повышения стойкости инструмента и для уменьшения параметров шероховатости обработанной поверхности при резании указанных материалов рекомендуется применять смазочно-охлаждающие жидкости с высокими смазочными свойствами - концентрированные эмульсии или маловязкие масла с противозносными свойствами.

Хорошей смазочно-охлаждающей жидкостью при осуществлении процесса лезвийной обработки тантала, ниобия и их сплавов

является смесь, состоящая из 60 % сульфорезола, 25 % керосина, 15 % олеиновой кислоты. Почти во всех случаях применение смазочно-охлаждающих сред приводит к загрязнению образующейся стружки, что нежелательно, так как снижается её ценность.

При механической обработке тантала, ниобия и их сплавов нельзя применять большие скорости резания вследствие заметного окисления и газонасыщения указанных материалов даже при незначительном их нагреве ( $>180 \dots 200^\circ\text{C}$ ). Работа на повышенных скоростях резания приводит к окислению стружки и обработанной поверхности заготовок, а следовательно, к ухудшению качества металла.

Характерной особенностью лезвийной обработки ниобия, тантала и их сплавов является применение сравнительно небольших подач ( $S_o$  до 0,4 мм). Увеличение подачи по сравнению с указанной приводит к значительному ухудшению качества обработанной поверхности.

Точение ниобия, тантала и их сплавов рекомендуется производить резцами, оснащенными твердосплавными пластинами ВК6-М и ВК8, а также резцами из быстрорежущих сталей, лучшими из которых для этой

цели являются P9K5 и P18 (с твердость после термообработки 63...65 HRC).

Большое влияние на обрабатываемость резанием и стойкость инструмента оказывает геометрия режущего инструмента. При точении ниобия, тантала и их сплавов рекомендуются применять режущие инструменты со следующими геометрическими параметрами:  $\gamma = 20 \div 25^\circ$ ;  $\gamma_f = 0 \div 5^\circ$ ;  $f = (0,6 \div 0,8) S_o$ ;  $\alpha = 12 \div 15^\circ$ ;  $\varphi = 45 \div 75^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15 \div 20^\circ$ ;  $r = 0,2 \div 0,5$  мм.

Критический износ затупления режущих инструментов при токарной обработке ниобия, тантала и их сплавов составляет:

$h_{з.крит} = 0,4 \div 0,5$  мм при черновом и получистовом резании;  $h_{з.крит} = 0,3$  мм при чистовом резании.

Небольшие величины допускаемого затупления режущих инструментов при токарной обработке указанных материалов объясняются большой склонностью данных материалов к налипанию на режущие поверхности инструментов, что резко ухудшает как сам процесс обработки, так и качество обработанных поверхностей.

Рекомендуемые режимы резания при точении ниобиевых сплавов резцами ВК6-М указаны в табл. 2.1.10:

**2.1.10. Рекомендуемые режимы резания ниобиевых сплавов**

Точение	Обрабатываемый материал	$v$ , м/мин	$S_o$ , мм	$t$ , мм
Получистовое	Технический ниобий НП-13Д и тантал	60-70	0,15-0,40	До 3
	Сплав ниобия ИРМН-3	45-60		
	Сплав ниобия ВН-1	39-40		
Чистовое	Технический ниобий НП-13Д и тантал	70-80	0,08-0,15	До 1
	Сплав ниобия ИРМН-3	60-75		
	Сплав ниобия ВН-1	40-50		

**Примечание.** При точении указанных материалов твердосплавными резцами ВК8 скорости резания следует снижать на 15-20%, а при работе быстрорежущими резцами на 60-75%. При точении с применением СОТС скорости резания следует повышать на 10-15%.

Точение тантала, ниобия и их сплавов по корке с неметаллическими включениям рекомендуется проводить резцами ВК8 с охлаждением на режимах:  $v = 10 \div 15$  м/мин;  $S_o = 0,3 \div 0,5$  мм.

**Основные проблемы лезвийной обработки бериллия** обусловлены хрупкостью, а также высокими абразивными свойствами, которыми он обладает.

Поскольку бериллий имеет в своей основе гексагональную кристаллическую решетку, его свойства в значительной степени зависят от метода производства, величины зерен и их ориентации. Указанные факторы оказывают влияние на обрабатываемость бериллия резанием.

Заготовки из бериллия изготавливают методом литья и, главным образом, методом порошковой металлургии. Литой бериллий является малопластичным металлом, имеющим столбчатую структуру; кроме того, для него характерна анизотропия механических свойств. Эти качества обуславливают высокий износ инструмента и относительно плохую способность поддаваться механической обра-

ботке. Последнее связано с обособлением отдельных зерен и образованием мозаичной структуры. Литой бериллий очень легко растрескивается.

Способ изготовления бериллия методом порошковой металлургии не оказывает большого влияния на его обрабатываемость и механические свойства, так как они зависят от величины зерна, которая регулируется главным образом величиной частиц исходного порошка. Заготовки, получаемые из порошка меньшей зернистости, обрабатываются резанием значительно легче, чем заготовки с зернами более крупных фракций.

Стоимость бериллия очень высока, поэтому при обработке бериллия резанием необходимо соблюдать условия, обеспечивающие получение незагрязненной бериллиевой стружки.

Ввиду этого обстоятельства бериллий желательнее обрабатывать всухую, так как даже незначительное загрязнение стружки приводит к понижению её качества на 50-75%.

По обрабатываемости резанием бериллий сходен с чугуном, но обрабатывается ху-

же, так как более хрупок и обладает повышенной истирающей способностью. Стружка хорошо ломается и не наматывается на обрабатываемое изделие или режущий инструмент, но при этом снимаемая стружка крошится и распадается на отдельные крупные и мелкие элементы, превращаясь в пыль и загрязняя воздушную среду.

Данная пыль высоко токсична и её вдыхание представляет большую опасность для обслуживающего персонала, поэтому каждый процесс механической обработки бериллия должен быть обеспечен соответствующей вентиляцией.

С увеличением скорости лезвийной обработки бериллиевых заготовок количество пыли (по массе) сильно возрастает. С увеличением глубины резания количество образующейся пыли также увеличивается, но в значительной степени, чем при увеличении скорости резания.

При назначении режимов резания бериллия следует учитывать мощность вентиляционной системы и метод сбора стружки.

Нагрев бериллия до температуры свыше 800 °С дает интенсивное окисление, поэтому, выбирая режимы резания, необходимо исхо-

дить из условий нагрева обрабатываемой заготовки ниже 600-700 °С.

Одним из главных факторов, обеспечивающих качественную лезвийную обработку бериллия, является жесткость технологической системы.

Бериллий обладает высокими истирающими свойствами, поэтому инструмент для его обработки необходимо оснащать пластинами из твердого сплава: ВК3-М, ВК6-М при чистовом точении и ВК8, ВК6-М при черновом.

За критерий затупления этих твердосплавных резцов следует принимать износ по задней поверхности, равный 0,5-0,6 мм.

При обработке бериллия величины переднего, заднего и главного угла в плане существенно влияют на параметры шероховатости обработанной поверхности, величину сколов на кромках детали, стойкость инструмента.

Оптимальные геометрические параметры режущих инструментов при токарной обработке бериллия имеют следующие значения (табл. 2.1.11).

Рекомендуемые режимы резания бериллия указаны в табл. 2.1.12.

### 2.1.11. Геометрические параметры режущих инструментов

Точение	$\gamma, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$\varphi_1, ^\circ$	$r, \text{мм}$
Черновое	5-10	6-8	45-60	15-20	0,5-1,0
Чистовое	12-15	8-10	25-35	15-20	0,3-0,5

### 2.1.12. Режимы резания бериллия

Точение	Скорость резания $v, \text{м/мин}$	Подача $S_o, \text{мм}$	Глубина резания $t, \text{мм}$
Черновое	60-80	0,2-0,5	От 1 до 5
Чистовое и получистовое	100-120	0,05-0,2	До 1

### 2.1.4. РЕЗАНИЕ ПЛАСТМАСС

Механическая обработка резанием является обязательной, наиболее ответственной и самой трудоемкой операцией в технологическом цикле получения изделий из пластмасс. Она предполагает использование почти всех видов обработки металлов (табл. 2.1.13).

Под действием механических напряжений, теплоты и химических реагентов в зоне резания пластмасс неизбежны структурные превращения полимера и выделение при этом избыточной энергии, которая сильно интенсифицирует течение физических явлений - износа инструмента, выделение теплоты, образования дефектного слоя обработанной поверхности и др.

Молекулярные цепи у полимеров имеют относительную подвижность. Это обуславливает то, что при внедрении режущего клина в обрабатываемый полимерный материал из-за сильного упругого последдействия пластмассы действительная толщина среза становится меньше номинальной.

Упругое последствие при обработке отверстий, пазов, канавок уменьшает их поперечный размер у различных пластиков на 10...200 мкм.

В зависимости от природы полимера, его наполнителя, прочности адгезионной связи наполнителя с полимером, толщины среза, степени износа инструмента, температуры в зоне резания образуется непрерывная стружка

## 2.1.13. Основные виды обработки пластмасс резанием

Заготовки	Вид обработки резанием
Листы, плиты, бруски и др.	Разрезка дисковыми фрезами, ленточными и циркульными пилами, абразивными кругами, сверление, зенкерование и развертывание отверстий, фрезерование цилиндрическими, торцовыми, угловыми и концевыми фрезами и др.
Тела вращения (прутки, трубы, сложные экструдированные профили и др.)	Отрезка резцами, пилами, фрезами. Удаление технологического припуска резцами, шлифовальными кругами.
Мелкие и средние детали обычной точности	Удаление грата, литников и других технологических припусков лезвийным или абразивным инструментом. Отрезка резцами, абразивными кругами. Нарезание резьб, зубьев и др.
Крупные детали, получаемые намоткой, контактным пресованием, пневмо- и вакуумформованием и др.	Удаление технологических припусков точением, фрезерованием, шлифованием. Получение отверстий, пазов, окон и др. Сверлением, зенкерованием, развертыванием, фрезерованием, долблением, резьбонарезанием и др.

типа сливной без признаков текстурирования, или элементная стружка, или полностью диспергированная стружка (пыль), или стружка надлома. Полимерная стружка склонна прилипать к прикромочным поверхностям и стружечным пространствам (стружечным канавкам) инструмента.

При обработке пластмасс вследствие их малой механической прочности и низкой твердости в сравнении с металлами сила резания в несколько десятков раз меньше, чем при резании железоуглеродистых сплавов. Из-за увеличенных площадок касания на задней поверхности инструмента, на которой действуют значительные силы упругого последействия, радиальная составляющая в несколько раз больше главной составляющей, особенно когда задняя поверхность изношена. Это не позволяет достичь требуемого качества обработки поверхности изделия, так как вызывает сколы и отслаивание слоев наполнителя. Прочности и жесткости металлорежущих инструментов вполне достаточно для обработки любых пластмасс с любыми сечениями среза. Составляющие силы резания пластмасс рассчитывают по тем же формулам, что и при резании металлов.

Несмотря на малые твердость и прочность поликристаллических материалов в сравнении с металлами, в зоне резания возбуждается высокая температура. Она почти всегда превышает термостойкость полимера

(250..500 °С), а при неблагоприятных условиях резания может достигать термостойкости алмаза и быстрорежущей стали.

При средних режимах резания, например слоистых пластмасс, температура достигает 300...400 °С, при неблагоприятных условиях резания - 450...550 °С. Больше всего на изменение температуры влияют износ инструмента и скорость резания, меньше - подача и глубина резания.

Обработываемость пластмасс резанием зависит от материала связующего, от природы, структуры и количества наполнителя композиции. Оценка их обработываемости резанием весьма сложна, так как требует учета многих одновременно действующих факторов.

Все огромное разнообразие современных пластмасс по обработываемости резанием объединяют в пять групп (табл. 2.1.14). Обработываемость пластмассы, режим обработки резанием которой не известен, устанавливают в последовательности: 1) по стандарту на рассматриваемую пластмассу устанавливают термopластичное (ТП) или терморeактивное (РП) полимерное связующее пластмассы; 2) по стандарту определяют природу наполнителя - органическая (ОРГ) или неорганическая (НОР); 3) по стандарту устанавливают структуру наполнителя - порошок, волокно, ткань и др.; 4) сопоставляя установленные по стандарту данные о пластмассе, определяют группу обработываемости.

## 2.1.14. Классификация обрабатываемости пластмасс

Группа обрабатываемости	Связующее	Пластмасса		
		Наполнитель		Представители
		Природа	Структура	
1	Термопласт	-	Газ	Пенополистирол, пенополиэтилен, поливинилхлорид
2	Термопласт	Без наполнителя		Полиметилметакрилат (оргстекло), поликарбонат, полиэтилен, пластикат
		Органическая	Порошок	Полиамидная или другая смола с фторопластовым или другим порошковым наполнителем
		Органическая	Волокно	
	Реактопласт	Без наполнителя	Газ	Эпоксидно-фенольные смолы типа Э032-301 Мипора, пенополиуретан
3	Термопласт	Неорганическая	Порошок	Полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид, полипропилен Фторопласт, полистирол, полиформальдегид и его сополимеры Фольгофторопласт, фольголаван (листовой)
		Неорганическая	Волокно	
		Неорганическая	Фольга	
3	Реактопласт	Органическая	Порошок	Пресс-материалы на основе фенольной, эпоксидной, полиэфирной смолы Пресс-материалы на основе фенольной и других смол и наполнением из древесной, текстолитовой и балитовой крошки Волокниты с целлюлозным, полиамидным, полиэфирным волокном Текстолиты, органоолокниты
		Органическая	Крошка	
		Органическая	Волокно	
		Органическая	Ткань	
4	Реактопласт	Органическая	Листы	Гетинаксы, органогетинаксы Пресс-материалы (пресс-порошки) на основе фенолоформальдегидной (резольной), эпоксидной и других смол с кварцевым, асбестовым, слюдяным, графитовым порошковыми наполнителями Реактопласты с наполнителем в виде зерен и микробаллонов, чешуек и других из стекла, углерода, оксидов и др. Реактопласты с наполнителем из неорганических волокон (стекло, асбест, кварц, базальт, керамика (нитрид бора) и др.) Реактопласты (стеклотекстолиты, асботекстолиты) Реактопласты (асбопластики из асбестовой бумаги, картон) Фольгированные стеклотекстолит, стеклопластики и др. пресс-материалы и реактопласты с неорганическим наполнителем
		Неорганическая	Порошок	
		Неорганическая	Зерно (гранула)	
		Неорганическая	Волокно	
		Неорганическая	Ткань	
		Неорганическая	Лист	
Неорганическая	Фольга			
5	Реактопласт	Неорганическая	Проволока	Композиты на основе трехмерного полимера с наполнителем из одно- или многожильной металлической проволоки или сетки

Конструктивные и геометрические параметры режущей части инструмента для эффективной обработки пластмасс должны отличаться от соответствующих параметров металлорежущего инструмента (табл. 2.1.15).

При выборе инструментального материала для эффективной обработки пластмасс следует обязательно учитывать *три особенности процесса резания полимерных материалов*:

1) из-за интенсивного изнашивающего воздействия всех пластмасс и особенно пластмасс с твердым неорганическим наполнителем инструментальный материал должен быть износостойким. Этому в наибольшей мере

отвечают алмазные сверхтвердые материалы (АСТМ) и малокобальтовые вольфрамокарбидные твердые сплавы;

2) из-за очень низкой теплопроводности и термостойкости всех пластмасс инструментальный материал должен быть максимально теплопроводным - это алмазные сверхтвердые материалы и малокобальтовые вольфрамокарбидные твердые сплавы;

3) из-за существенно меньшей механической, чем у металлов, прочности режущая часть инструмента может быть менее прочной. Это позволяет использовать любые современные инструментальные материалы.

### 2.1.15. Конструктивные параметры режущих инструментов для обработки пластмасс в зависимости от параметров металлорежущих инструментов

Параметры металлорежущих инструментов	Параметры инструментов при обработке пластмасс
Исполнительный размер (размерного) инструмента $d$	$d - \delta$ (где $\delta$ - допуск на размер)
Число зубьев $z$	(0,3...0,6) $z$
Допустимый износ режущей части $h$	(0,2...0,5) $h$
Ширина технологической ленточки $f_d$	(0,2...0,7) $f_d$
Начальный (после заточки) радиус округления режущей кромки $\rho_0$	(0,3...0,7) $\rho_0$
Площадь (поперечная) сечения стружечной канавки $F_s$	*Св. 1,5 $F_s$
Параметр шероховатости прикромочных участков $Ra$	(0,2...0,5) $Ra$
Механическая прочность прикромочных участков $\sigma$	(0,1...0,5) $\sigma$
Главный задний угол $\alpha$	(1,5...2,5) $\alpha$
Вспомогательный задний угол $\alpha'$	(1,5...2) $\alpha'$
Передний угол $\gamma$	0...5 °
Главный угол в плане $\varphi$	(0,7...1) $\varphi$
Вспомогательный угол в плане $\varphi'$	(1,5...3,5) $\varphi'$
Угол подъема винтовой стружечной канавки $w_k$	(1,2...2) $w_k$
Радиус сопряжения режущих кромок (радиус при вершине) $r_B$	(1...1,5) $r_B$

С учетом дефицита вольфрама рекомендации<sup>1</sup> по выбору инструментального материала приведены в табл. 2.1.16.

<sup>1</sup> Минералокерамику (ЦМ332), керметы (В0К60, В3) и другие материалы этой группы применять для обработки пластмасс из-за низкой стойкости не следует.

Наиболее распространены в машиностроении и других отраслях промышленности четыре вида обработки пластмасс резанием: точение, сверление, фрезерование и шлифование. Самой распространенной операцией механической обработки пластмасс является операция резания листов, плит, прутков резцами, фрезами, дисковыми пилами и шлифовальными

ми кругами; сравнительно меньше доля строгания и долбления, зенкерования и развертывания, резьбы- и зубонарезания, протягивания.

Тела вращения из пластмасс обрабатывают на универсальных и револьверных станках, на различных операционных токарных станках, на специальных автоматах и полуавтоматах. В качестве инструмента используют стандартные токарные резцы для обработки пластмасс или соответствующие стандартные металлорежущие резцы, которые должны быть обязательно перезаточены. Инструментальный материал режущей части выбирают по табл. 2.1.16. Геометрические параметры режущей части резцов, режим резания и другие условия обработки регламентированы Общемашиностроительными нормативами. Рациональный режим резания при точении пластмасс устанавливают в последовательности: 1) находят группу обрабатываемости пластмассы (см. табл. 2.1.14); 2) выбирают инструментальный материал резца (см. табл. 2.1.16) и назначают его стойкость; 3) определяют глубину резания; 4) подбирают подачу; 5) отыскивают скорость резания.

Обработка внутренних цилиндрических отверстий сверлами - наиболее распространенная технологическая операция получения деталей из пластмасс. Пластмассы сверлят на универсальных и специальных сверлильных станках, специально предназначенных для обработки пластиков стандартными и металлорежущими со специальной заточкой (потребителем) сверлами. Из-за стесненного резания и малых вспомогательных углов в плане (обратная конусность), из-за сильного упругого восстановления полимерных материалов в зоне резания и на обработанной поверхности (на ленточках сверла) возникает значительное трение. Поэтому скорость реза-

ния при сверлении должна быть значительно (в 1,5-3,5 раза) меньше, чем при других видах обработки резанием. Ширина цилиндрических ленточек должна быть максимально уменьшена хотя бы у вершин (уголков). Режим резания следует назначать в той же последовательности, что и при точении.

Плоскости и другие линейчатые поверхности у деталей из пластмасс обрабатывают цилиндрическими, торцовыми, кольцевыми, фасонными и другими фрезами на универсальных, преимущественно на быстроходных, а также на специальных и специализированных станках, оснащенных пылеотражающими устройствами. Самой распространенной в промышленности и во многих отраслях народного хозяйства операцией обработки пластмасс является операция разрезки листовых, плиточных заготовок и заготовок другой формы дисковыми фрезами и круглыми пилами. Фрезы делают из инструментальных сталей и оснащают инструментальными пластинами из твердых сплавов, а торцовые фрезы - поликристаллами из СТМ. Режим резания при фрезеровании пластмасс назначают так же, как при точении и сверлении.

Абразивная обработка пластмасс всегда сопряжена, во-первых, с опасностью засаливания абразивного инструмента из-за низкой термостойкости полимера и, во-вторых, из-за образования дефектного слоя обработанной поверхности.

При абразивной обработке пластмасс наиболее часто используют плоское шлифование периферией и торцом круга, круглое наружное и внутреннее шлифование, а также разрезку листов, плит, прутков и др. - дисковыми кругами из обычных и сверхтвердых абразивов.

### 2.1.16. Рекомендуемые инструментальные материалы (с учетом дефицита вольфрама) для эффективной обработки пластмасс

Группа обрабатываемости пластмасс	Инструментальный материал			
	Вольфрамсодержащий		Безвольфрамовый	
	Обработка пластмасс			
	Неабразивных	Абразивных	Неабразивных	Абразивных
3-4	АСТМ ВК6-М, ВК8	АСТМ ВК3-М, ВК4	АСТМ КНТ76	АСТМ ТН20
2-3	Р6М3 ХВСГ	Р12, Р9К5 11Р3М3Ф2	- ЭХС	- ЭХС
1-2	У12А	-	У12А	-

Примечание. Общие рекомендации таблицы не распространяются на группу компози- тов с наполнителем из металлической проволоки или сетки.

Форму и размеры шлифовальных кругов выбирают по стандарту в соответствии с видом шлифования, параметрами станка и припуском на обработку. Для исключения или уменьшения засаливания, особенно при шлифовании пластмасс с органическим наполнителем, круги следует выбирать с мягкими связками и открытой структурой, с хорошей самозатачиваемостью.

Отрезные круги должны отвечать требованиям: высокая режущая способность, незакаливаемость, малая высота (толщина), допускать обработку без СОЖ.

### 2.1.5 РЕЗАНИЕ СТЕКЛОМАТЕРИАЛОВ

При формообразовании изделий из материалов на основе стекла применяют следующие виды механической обработки. Шлифование свободным абразивом - при обработке плоских, сферических и других видов поверхностей в изделиях из технического стекла, осуществление которых возможно с помощью притира, а также при сверлении отверстий. В качестве абразива используют порошки электрокорунда нормального, карбида кремния, карбида бора и т.п. разной зернистости. Шлифование связанным абразивом используют во всех перечисленных выше случаях при обработке как стекла, так и ситаллов, и, кроме того, при резке заготовок, круглом шлифовании, выполнении пазов, выемок, фасонных профилей и т.д. На этих операциях применяют алмазно-абразивный инструмент. Обработка точением с использованием резцов, оснащенных, в основном, пластинами твердого сплава типа ВК, используется только при изготовлении крупных заготовок деталей астрономических приборов из технического стекла для выборки избытка материала при формировании поверхностей сложной формы и для растачивания больших отверстий. Иногда для сверления в стекле отверстий диаметром менее 10 мм применяют сверла, оснащенные пластинами твердого сплава.

Наиболее распространенными (до 80 % от общего объема механической обработки) и эффективными являются операции алмазного шлифования стекломатериалов.

Обработка таких материалов имеет ряд особенностей, обусловленных их физико-механическими характеристиками и, прежде всего, повышенной хрупкостью.

Диспергирование стекломатериалов при шлифовании свободными абразивными порошками представляет собой процесс одновременного воздействия на обрабатываемую поверхность большой массы зерен абразивного материала, при котором форма поверхности задается, в основном, через их посред-

ство формой инструмента. При этом зерна, находящиеся между взаимно перемещающимися обрабатываемой поверхностью и инструментом, перекатываются или проскальзывают, производя ударно-вибрационное воздействие на материал и создавая на его поверхности царапины, сопровождаемые трещинами, идущими вглубь. При пересечении трещин происходит скалывание частиц материала с его поверхности и образование рельефного слоя  $h_p$ . Продолжающиеся в глубину материала под рельефным слоем части трещин остаются при этом в виде так называемого трещиноватого слоя  $h_T$  и совокупность этих двух слоев образует разрушенный или дефектный слой  $H_p$ .

Между величинами основного передатчика энергии диспергирования - абразивного зерна ( $h_3$ ), диспергированной с поверхности частицы материала ( $a_m$ ) и элементами разрушенного слоя имеются определенные зависимости:  $a_m = (0,1...0,2) h_3$ ;  $h_p = (0,2...0,3) h_3$ ;  $h_T = (0,6...0,7) h_3$ ;  $H_p = (0,8...1,0) h_3$ . Приведенные соотношения справедливы для стекла, а для стекломатериалов с другими механическими свойствами могут несколько отличаться от них.

В результате воздействия на поверхность значительной массы абразивных зерен различных размеров, перемещающихся во всевозможных направлениях и с весьма разнообразными скоростями, глубина рельефного слоя и шероховатость обработанной поверхности во всех направлениях получают достаточно однородными. Участвующая в процессе шлифования СОТС способствует равномерному распределению зерен абразива и их перемещению между поверхностями, удаляет измельченные зерна и продукты диспергирования материала, оказывает охлаждающее и химическое воздействие на обрабатываемый материал.

Шлифование стекломатериалов связанным абразивом - это процесс скоростного микроцарапания обрабатываемой поверхности совокупностью единичных алмазных зерен, распределенных по всей рабочей поверхности инструмента. Одновременно с этим происходит также разрушение или изнашивание материала связки, что способствует высвобождению и вовлечению в работу нового массива неизношенных абразивных зерен (свойство самозатачивания инструмента). Это свойство является весьма важным для поддержания эффективности работы инструмента на некотором постоянном уровне. В противном слу-

чае инструмент очень быстро теряет режущие свойства вследствие затупления и износа зерен, засаливания рабочей поверхности круга шламом, что резко осложняет процесс шлифования, отрицательно сказывается на его производительности, точности и качестве обработки. Восстановление режущей способности абразивного инструмента предполагает его обязательную правку тем или иным способом.

При обработке связанными абразивными зернами рельефный и трещиноватый слой не являются равномерными во всех направлениях, что связано с определенностью траекторий перемещения зерен относительно поверхности обрабатываемого материала. При этом зерна оставляют на поверхности диспергируемого материала следы в виде царапин, направленных соответственно этим траекториям. При одинаковой зернистости свободных абразивных зерен и абразивного инструмента глубина рельефного и всего разрушенного слоя при работе инструментами с закрепленными зернами обычно меньше, чем при работе свободных зерен. Это объясняется прежде всего тем, что в данном случае работу диспергирования производит не все зерно, а лишь его часть, выступающая из связки. Величина неровностей рельефного слоя может регулироваться как характеристиками рабочей поверхности инструмента, так и режимом его работы. Роль жидкости при диспергировании поверхности материала связанным абразивом по существу - та же, что и при использовании свободного абразива.

В зависимости от условий взаимодействия стекломатериалов с режущими зернами инструмента (уровень нагрузки на зерна, глубина их внедрения, геометрия режущей части) в зоне контакта можно получить различные виды деформации: от упругой с пластическим перемещением материала до хрупкого разрушения. Процесс шлифования материалов на основе стекла при условиях, обеспечивающих интенсивное разрушение поверхности (черновые операции обработки), представляет собой хрупкое разрушение с образованием царапин, системы трещин и выкалыванием материала. Шлифование же при малых нагрузках на зерна абразива и чрезвычайно малой глубине внедрения их в материал (чистовое шлифование) может представлять собой упруго-пластичное разрушение с образованием выдавленных царапин и царапин, сопровождающихся отделением стружки. Интенсивность диспергирования и структура получаемой поверхности определяются тем, какой из процессов разрушения преобладает, так как в общем виде процесс абразивного диспергирования происходит при наличии одновременно

и хрупких, и упруго-пластических деформаций материала.

Процесс полирования стекла заключается в удалении микрорельефа со шлифованной поверхности и сообщении ей такой фактуры, дефекты которой значительно меньше длины световой волны, вследствие чего она становится прозрачной и кажется идеально гладкой. Ситаллы в силу своих прочностных характеристик полированию практически не поддаются: для них в качестве финишных операций применяются притирка или доводка мелкозернистыми алмазными брусками или пастами.

Рассмотренные особенности алмазно-абразивной обработки стекломатериалов позволяют обоснованно подойти к выбору марки инструментального материала, зернистости, концентрации зерен, связки, режимов и СОТС.

Для обработки стекла и других неметаллических конструкционных материалов, как правило, применяют следующие марки алмазов: шлифпорошки из природных алмазов - А1, А2, А3, из синтетических - АС4, АС6, АС15, АС20, АС32, АС50 зернистостью 800/630 - 50/40; микропорошки из природных алмазов - АМ, АН, из синтетических - АСМ, АСН зернистостью 60/40 - 1/0; субмикропорошки из природных алмазов - АМ5, АМ1, из синтетических - АСМ5, АСМ1 зернистостью 0,7/0,3 - 0,1/0. С целью повышения работоспособности алмазно-абразивного инструмента возможно применение металлизированных алмазных порошков. Нанесение специальных покрытий на зерна алмазов повышает прочность удержания зерен в связке, способствует лучшему отводу теплоты.

При выборе марки алмазного порошка необходимо учитывать вид обрабатываемого материала, операцию обработки, тип применяемого инструмента и требования к качеству обработанной поверхности. Так, на операциях резки, сверления, грубого шлифования, где требуется высокая производительность обработки, необходимо применять порошки повышенной прочности, такие как А1-А3, АС32, АС15, АС6; на операциях тонкого шлифования - алмазные микропорошки АСМ, АСН.

При обработке материалов на основе стекла применяют в основном шлифовальные круги различных форм и типоразмеров, отрезные круги, алмазные отрезные сегментные круги, алмазные сверла, сборный алмазно-абразивный инструмент.

Зернистость алмазно-абразивного инструмента влияет на параметры шероховатости обработанной поверхности, глубину и структуру трещиноватого слоя, относительный рас-

ход алмазов, производительность и, следовательно, на себестоимость шлифования. С увеличением зернистости инструмента возрастают производительность обработки, параметры шероховатости и глубина нарушенного обработкой слоя, что вызвано ростом нагрузки на каждом из зерен; применение мелкозернистого инструмента обеспечивает требуемые параметры шероховатости поверхности и снижает дефектность. Поэтому рекомендуется черновые операции выполнять крупнозернистым инструментом, обеспечивающим требуемую производительность, а чистовые - мелкозернистым.

Изменение концентрации и зернистости алмазов позволяет регулировать количество работающих зерен и, следовательно, расстояния между ними, а также высоту выступания зерен над связкой. Эти факторы оказывают непосредственное влияние на усилия, действующие на зерна, на глубину их врезания в материал, температуру в зоне обработки, интенсивность разрушения обрабатываемого материала, износ инструмента, параметры шероховатости обработанной поверхности, параметры трещиноватого слоя и на ряд других показателей процесса. Для обработки материалов на основе стекла применяют в основном круги низкой и средней концентрации (25...100 %). При крупных зернистостях, а также в целях снижения параметров шероховатости и дефектности обработанной поверхности концентрацию кругов необходимо повышать. Более высокая концентрация целесообразна также при обработке материалов с высокой твердостью, когда необходимо повысить стойкость инструмента. Например, для обработки технических силаллов применяют инструмент со 100 %-ной концентрацией алмазов, а при торцовом шлифовании технического стекла - с 25-50 %-ной концентрацией.

Связка алмазного инструмента является наиболее важной его характеристикой, определяющей не только эффективность, но и возможность применения алмазного инструмента для обработки стекломатериалов. Связка, основным назначением которой является закрепление зерен в инструменте, должна не только обеспечивать высокую режущую способность, но и обладать хорошей смачивающей способностью по отношению к алмазу, обеспечивать работу инструмента в режиме самозатачивания, иметь хорошую теплопроводность и достаточную термостойкость, способствовать снижению коэффициента трения и адгезии с обрабатываемой поверхностью, гарантировать высокую механическую прочность, жесткость и износостойкость алмазного слоя инструмента в целом. Для обра-

ботки материалов на основе стекла применяют алмазный инструмент на металлических связках (М1, М04, МЖ, МТ и другие) как более прочных и износостойких, и только в отдельных случаях используют керамические и каучукодержающие связки. Желательно, чтобы состав связки обеспечивал работу алмазного инструмента в режиме самозатачивания.

Основные параметры режимов алмазного шлифования - скорость, глубина и подача влияют на характер перемещения алмазных зерен относительно обрабатываемой поверхности, производительность процесса шлифования и качество обработки. Закономерности, определяющие связь эффективности шлифования с его режимами, наиболее наглядно выявляются на станках, работающих с заданной постоянной силой прижима  $P_y$  алмаз-

ного круга к обрабатываемой детали (схема торцового шлифования). Интенсивность съема стекла, т.е. производительность обработки, в этом случае возрастает пропорционально росту давления и происходит по причине увеличения глубины внедрения зерен в обрабатываемый материал и, следовательно, объема материала, удаляемого в единицу времени. Обычно используемый диапазон давлений составляет 0,2-0,6 МПа и зависит от характеристик круга и прочностных свойств обрабатываемого материала.

Увеличение скорости резания способствует повышению производительности обработки, уменьшению параметров шероховатости и дефектности обработанной поверхности и, в определенных пределах, снижению изнашивания инструмента. Оптимальная скорость при обработке стекла и подобных материалов составляет 25-30 м/с. Однако с учетом свойств обрабатываемого материала, схемы обработки, типа применяемого инструмента зачастую обработку неметаллических материалов проводят с другими, отличными от рекомендуемой, скоростями резания. Например, шлифование изделий на круглошлифовальных станках выполняют со скоростью 20...30 м/с, резку отрезными кругами - со скоростью 40...50 м/с, сверление кольцевыми сверлами - со скоростью 3,0...8,0 м/с, торцовое шлифование плоских поверхностей - со скоростью 15...20 м/с. С ростом поперечной и продольной подачи повышается производительность обработки, однако растут силы резания, снижается срок эксплуатации инструмента, увеличиваются параметры шероховатости обработанной поверхности и глубина дефектного слоя. Глубину резания и значения продольной подачи следует снижать при увеличении площади контакта инструмента с изделием, а также для повышения качества обработки.

Наибольшее влияние на изменение сил резания оказывают продольная и поперечная подачи, а скорость резания - в меньшей степени. Показатели процесса шлифования существенно зависят от температуры в зоне контакта инструмента и детали. При обработке стекол и ситаллов при условии достаточно надежного поступления СОТС в зону контакта температура не превышает 300...350 °С и не оказывает существенного влияния на изнашивание инструмента, структуру и качество поверхностных слоев обрабатываемого материала.

Алмазное шлифование большинства хрупких неметаллических материалов невозможно без применения СОТС. Одним из эффективных методов воздействия на процессы резания материалов на основе стекла является применение СОТС с направленными свойствами. В этом случае среда помимо выполнения традиционных охлаждающей, смазочной и мощнейшей функций оказывает существенное диспергирующее действие. Последнее, за счет разупрочнения поверхностных слоев материала под действием СОТС, позволяет интенсифицировать процесс резания и, как следствие, повысить производительность обработки и работоспособность инструмента. Уменьшение энергетических затрат, приходящихся на единицу объема удаляемого припуска, благоприятно сказывается на глубине и структуре нарушенного обработкой слоя. Чтобы удовлетворить эти условия, СОТС для обработки стекломатериалов должна быть родственной по физико-химической структуре обрабатываемому материалу, т.е. быть полярной, содержать в своем составе поверхностно-активные добавки, повышающие диспергирующее действие среды и улучшающие ее доставку в зону обработки, а также повышающие смазочную способность сред за счет создания экранирующих пленок между поверхностями изделия и инструмента. Этими свойствами в полной мере обладают водные растворы ПАВ (оксиэтилированных жирных спиртов, алкилмоносульфатов и др.), обеспечивающие при алмазном шлифовании стекол и ситаллов снижение энергоемкости процесса до двух раз по сравнению с водой, в основном применяемой на производстве.

### 2.1.17. Технология механической обработки изделий из стекломатериалов

Обрабатываемый материал	Операции механической обработки, применяемый инструмент и показатели качества поверхности на стадиях:		
	предварительного формообразования	окончательного формообразования	финишной обработки
Техническое стекло	Варианты: 1) Точение твердосплавными резцами; $Ra = 10,0 \dots 6,3$ мкм 2) Обдирочное (черновое) шлифование свободным абразивом зернистостью 10; $Ra = 5,0 \dots 3,2$ мкм или алмазным инструментом (АС20-АС6) с зернистостью 200/160-125/100 и интенсивными режимами; $Ra = 2,5 \dots 1,25$ мкм	Попереходное шлифование свободным абразивом (последовательно с зернистостью 5, М28); $Ra = 1,25 \dots 0,8$ мкм или алмазным инструментом (АС4, АСМ, АСН) последовательно с зернистостью 125/100-80/63, 50/40 на шалящих режимах с применением правки инструмента; $Ra = 0,8 \dots 0,63$ мкм	Механическое полирование; $Ra = 0,2 \dots 0,12$ мкм
Технические ситаллы	Черновое шлифование алмазным инструментом (А1-А3, АС32-АС20) с зернистостью 315/250 - 200/160 и интенсивными режимами; $Ra = 3,2 \dots 1,25$ мкм	Чистовое шлифование алмазным инструментом (А1-А3, АС6, АС4) последовательно с зернистостью 125/100 - 63/50 на шалящих режимах, с применением правки инструмента; $Ra = 0,63 \dots 0,32$ мкм	Доводка или притирка алмазными брусками или пастами (АМ, АН) с зернистостью 40/28 - 10/7; $Ra = 0,08 \dots 0,04$ мкм

Среды, обладающие повышенной диспергирующей способностью, целесообразно применять на операциях черногого и получистового шлифования технических стекол и на всех операциях обработки ситаллов в силу создания в их присутствии благоприятной структуры дефектного поверхностного слоя (развитой трещиноватости в поверхностном слое в сочетании с мелкодефектной структурой более глубоких слоев). На чистовых операциях обработки стекла рекомендуется применять эмульсии с поверхностным натяжением жидкости  $(38...44) \times 10^{-3}$  Н/м и кислотностью раствора рН 9,0...9,2, в частности 3-5 %-ную эмульсию эмульсола "Эмус". При ее применении более чем в 1,5 раза можно увеличить производительность и во столько же снизить параметры шероховатости обработанной поверхности. К преимуществам этой СОТС можно отнести способность создавать условия для самозатачивания инструмента. При обработке ситаллов применение СОТС, содержащих масляные добавки, нежелательно из-за создания в изделии под их влиянием глубокого трещиноватого слоя, содержащего дефекты в виде развитых трещин.

Учитывая технологическую наследственность рабочего воздействия инструмента и имея сведения о глубине и структуре нарушенного обработкой слоя, формируемого на каждой из стадий технологического процесса, отличающихся характеристиками используемого инструмента, режимами обработки и т.п., разработана типовая технология механической обработки изделий из стекломатериалов (табл. 2.1.17).

#### 2.1.6. РЕЗАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПКМ)

Неоднородность или, в ряде случаев, слоистость структуры и относительно низкая адгезия связующего с армирующими волокнами приводят к тому, что механическая обработка может сопровождаться образованием трещин, расслоений и сколов материала, ворсистости или разлохмачивания перерезанных волокон, что вызывает существенные трудности в обеспечении высокого качества поверхностного слоя. Структурная анизотропия приводит к анизотропии технологических параметров резания - силовых факторов, параметров шероховатости, глубины дефектного слоя, износа и др.; например, при обработке однонаправленных ПКМ в зависимости от направления вектора скорости относительно перерезаемых армирующих волокон изменение составляющих силы резания может достигать 2-3 раз, глубин дефектного слоя (трещин) - 3 раз и более, износа инструмента - до 1,5-1,8 раза; для органоластиков в ши-

роких пределах изменяются параметры ворсистости поверхности.

Низкая теплопроводность ПКМ, в 100-600 раз ниже теплопроводности сталей, вызывает в зоне обработки концентрацию теплоты резания в тонких поверхностных слоях материала. Это явление в сочетании с низкой теплостойкостью ПКМ (180...350 °С) может приводить к термодинамической деструкции обработанной поверхности, т.е. к разрыву химических связей молекулярных цепей полимера, появлению прижогов с образованием коксового слоя связующего и, одновременно, активно влияет на механизм износа инструмента, что в целом ограничивает интенсивность режимов резания, предъявляет особые требования к конструктивному исполнению и материалам режущих инструментов, обеспечивающих отвод основной доли теплоты (до 90 % и более) из зоны резания.

Высокие упругие характеристики ПКМ приводят к упругому восстановлению поверхностного слоя материала после воздействия инструмента, что сопровождается увеличением площади контакта и контактных нагрузок на задней поверхности режущих элементов и, как следствие, повышенной интенсивностью износа последних. Кроме того, упругое восстановление обработанных поверхностей необходимо учитывать в случаях изготовления высокоточных деталей. Например, при сверлении органоластиков уменьшение диаметра (усадка) отверстий может составлять до 0,1...0,15 мм на 10 мм диаметра сверла. При обработке резанием крупногабаритных корпусных деталей точность изготовления может во многом зависеть от протекания присущих ПКМ реологических процессов, вызывающих изменение во времени относительного положения обработанных поверхностей изделия.

Высокое абразивное воздействие наполнителей ПКМ (стеклянные, борные, угольные волокна) при резании в связи с их высокой твердостью (до 40...43 ГПа) обуславливает малый период стойкости вследствие интенсивного изнашивания режущего инструмента; геометрия режущего клина подвергается большим изменениям, оказывая значительное влияние на качество поверхности и размерную точность.

Резание ПКМ сопровождается образованием мелкодисперсной пыли (частиц наполнителя со связующим) с выделением токсичных газообразных веществ - продуктов разложения связующего. В целях соблюдения условий техники безопасности и производственной санитарии станки необходимо оснащать пылеотсасывающими устройствами большой мощности, а производственные помещения - приточно-вытяжной вентиляцией.

## 2.1.18. Рекомендуемые геометрические элементы режущей части резцов

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$\varphi^\circ$	$\varphi_1^\circ$	$r_B$ , мм	$l_f$ , мм
<b>Стеклотекстолиты</b> СТ, СТУ	ВК2, ВК3-М	5	25	45	15	0,5-2	-
	АСБ, АСПК	-5	10	45	15-30	1,5-2	-
СТЭФ	ВК3-М, ВК8 АСБ, АСПК	0-2	15-20	45	20	1-2	-
ВФТ	ВК2, ВК3-М	5-10	25	45	12	0,5-1	-
ФН	ВК2, ВК3-М	10	10	45	15	0,5-2	-
СК-9Ф	ВК2, ВК3-М	0	20	45	15	1-3	-
<b>Стекловолокниты</b> АГ-4В	ВК2, ВК6 ВК3-М ВК6-М	5 10 18	25 25 15	45 45 45	12 45 45	0,5-1 0,5-1 1,5-2	- - -
РТП-100, РТП-170	ВК-2+ВК6-М	5-10	20-25	45	12	0,5-2	-
<b>Стеклопластики</b> АГ-ЧС, ЭФБ-П 27-63»С» 33-18»С» П-5-2	ВК2, ВК3-М ВК2, ВК3-М ВК2 ВК2, ВК3-М	5-10 5 5-10 10	25 25 20-25 20	45 45 45 40-45	12 15 12 20	0,5-1 0,5-4 0,5-2 1-2	- - - -
«Н»	ВК2, ВК3-М ВК4, ВК6-М ВК8	10	20	45	15-45	1	-
	АСБ, АСПК	20	0-2	45	20	-	0,2-0,6
Углепластик	ВК2, ВК3-М ВК4, ВК6-М ВК8	15	25-30	45	15-45	1	-
	АСБ, АСПК	20	0-2	45	20	-	0,2-0,6
Органопластик с расположением волокон: однонаправленное	Р6М5, Р9 Р12, Т15К6	10	20	45	45	2-2,5	-
	ВК2, ВК3-М ВК4, ВК8	15	32	45	45	2-2,5	-
Боропластик	СТМ	-3	20	40	12	-	-

ПКМ обычно обрабатывают точением, сверлением и фрезерованием.

В качестве инструментального материала при обработке резанием стекло-, угле- и органоластиков рекомендуют использовать вольфрамо-кобальтовые марки твердого сплава: ВК2, ВК3-М, ВК4, ВК6-М, ВК8. Сплавы с высоким содержанием кобальта (например, ВК8) менее износостойки, но лучше воспринимают динамические нагрузки. Применение быстрорежущих инструментальных сталей Р9, Р12, Р6М5 и других допускают на операциях сверления и фрезерования в случаях единичного или мелкосерийного производства, а также при резании органоластика благодаря низкой твердости армирующих волокон. Наиболее эффективными инструментами при обработке стекло- и углепластиков, обеспечивающими высокую производительность обработки, являются инструменты с режущей частью из природных или синтетических алмазов (СТМ). При их использовании получают наименьшие параметры шероховатости поверхности, высокую точность размеров деталей при значительной стойкости инструментов. Применение алмазов ограничивается их повышенной хрупкостью, особенно в условиях прерывистого резания и при больших сечениях среза. Наиболее эффективно использование резов с алмазными вставками типа АСПК (карбонадо) при глубине резания

$t \leq 1$  мм и АСБ (баллас) при  $t \leq 2$  мм.

Выбор геометрических параметров инструмента при точении ПКМ определяется значительным влиянием этих факторов на качество поверхностного слоя. Геометрические параметры режущей части резцов для наружного точения, установленные с учетом минимизации указанных явлений, представлены в табл. 2.1.18.

Подачу  $S_0$ , мм назначают исходя из требований к параметрам шероховатости обработанной поверхности ( $R_a$ ,  $R_z$ ) при условии отсутствия сколов, вырывов и расслоений материала, а также с учетом заданной степени точности. Для различных обрабатываемых материалов и материалов режущей части инструмента подача  $S$  в зависимости от параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$  может быть выбрана или определена расчетным путем согласно табл. 2.1.19 или 2.1.20.

Скорость резания  $v$ , м/с, рассчитывают по эмпирическим формулам табл. 2.1.21, используя соответствующие значения постоянных  $c_v$ ,  $m$ ,  $x_v$ ,  $y_v$  для различных марок обрабатываемого и инструментального материалов. Рекомендуемые геометрические параметры и критерий затупления спиральных сверл при обработке различных ПКМ приведены в табл. 2.1.22.

**2.1.19. Рекомендуемые значения подач при точении в зависимости от параметров шероховатости поверхности**

Обрабатываемый материал	Параметр шероховатости	Марка инструментального материала	Подача $S_0$ , мм, при радиусе кривизны вершины лезвия $r_B$ , мм			
			До 0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2
Стеклотекстолиты, стекловолокниты, стеклопластики (кроме марки «Н»)	$R_a$ , мкм:					
	1,25-2,5	Р6М5	0,03-0,05	0,04-0,07	0,05-0,09	-
	2,5-5,0	ВК2, ВК6	0,09-0,12	0,1-0,16	0,12-0,18	0,14-0,2
	Св. 5,0	ВК8	0,2-0,3	0,2-0,4	0,25-0,5	0,3-0,5
	1-1,25	АСБ,	До 0,10	-	-	-
	1,25-3,75	АСПК	0,10-0,20	-	-	-
	3,75-6,1		0,20-0,30	-	-	-
	6,1-7,5		0,30-0,40	-	-	-
Стеклопластик «Н», углепластик	$R_z$ , мкм:					
	5-10	АСБ,	До 0,10	-	-	-
	10-15	АСПК	0,10-0,20	-	-	-
	15-25		0,20-0,30	-	-	-
	20-30		0,30-0,40	-	-	-

2.1.20. Данные для расчета подачи  $S_0$ , мм в зависимости от заданных параметров шероховатости поверхности при точении стеклопластиков «Н», угле- и органопластиков

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	Параметр шероховатости	$S = Ra(Rz)^{n_s} v^{m_s} t^{x_s} / (c_s k_s)$					Границы применения		
			$c_s$	$k_s$	$n_s$	$m_s$	$x_s$	$v$ , м/с	$S_0$ , мм	$t$ , мм
Стеклопластик «Н», углепластик	ВК	Ra	199	$k_{s1}$	1,39	0,25	0,28	0,62-2,83	0,09-0,5	0,2-5
		Rz	1039	$k_{s1}$	1,39	0,21	0,26			
Органопластик	Р6М5, ВК	Ra	864	$k_{s3}$	1,69	1,51	0,46	0,62-2,83	0,09-0,5	0,5-5
		Rz	$1,095 \cdot 10^5$	$k_{s4}$	2,22	1,60	0,73			

Примечание. Покровочный коэффициент  $k_s$  в зависимости от затупления резца по задней поверхности:

Степень затупления $h_3$ , мм	0	0,05	0,10	0,15	0,20
$k_{s1}$	1,0	0,73	0,94	1,47	1,53
$k_{s2}$	1,0	0,62	0,89	1,87	1,36
$k_{s3}$	1,0	1,44	1,16	-	-
$k_{s4}$	1,0	1,70	1,26	-	-

2.1.21. Данные для расчета скорости резания  $v$ , м/с при точении

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	$v = \frac{c_v}{T m_t^{x_v} S^{y_v}}$				Границы применения	
		$c_v$	$m$	$x_v$	$y_v$	$S_0$ , мм	$t$ , мм
Стеклотекстолиты СТ	BK2	7,93	0,18	0,02	0,09	0,1-0,2	0,5-2
		3,12	0,18	0,09	0,66	0,21-0,4	1-4
	BK	$c_{v1}^*$	0,36	0,2	0,4	0,1-0,5	0,5-5
	СТМ	$c_{v2}^*$	1,0	0,1	0,12	0,1-0,4	0,5-3
ФН СК-9Ф	BK2	3,77	0,11	0,19	0,42	0,1-0,4	0,2-3
	BK2	3,48	0,25	0,22	0,29	0,1-0,4	0,2-3
Стекловолокнит АГ-4В	BK2	3,4	0,16	0,18	0,2	0,1-0,5	0,5-2
	BK	$c_{v3}^*$	0,44	0,2	0,45	0,1-0,4	0,2-3
Стеклопластики 27-63»С» П-5-2	BK2	3	0,35	0,32	1	0,1-0,4	0,5-3
	BK2	5	0,58	0,42	0,49	0,1-0,4	0,5-3
«Н»	BK, ТК	$c_{v4}^*$	0,49	0,38	0,37	0,1-0,4	0,2-4
	СТМ	$c_{v5}^*$	1,0	0	0,12	0,1-0,4	0,5
	СТМ	$c_{v6}^*$	1,0	0	0,12	0,1-0,4	0,5-1
Углепластик	BK, ТК	$c_{v7}^*$	0,49	0,38	0,37	0,1-0,4	0,2-4
	СТМ	$c_{v8}^*$	1,0	0	0,12	0,1-0,4	0,5
	СТМ	$c_{v9}^*$	1,0	0	0,12	0,1-0,4	0,5-1
Органопластик	БР	$c_{v10}^*$	0,32	0,11	0,18	0,1-0,5	0,5-5
	BK, ТК	$c_{v11}^*$	-	0,31	0,05	0,18	0,1-0,5

\* Коэффициент  $c_v$  в зависимости от марки инструментального материала

Марка быстрорежущей стали (БР)	P9	P6M5	P12	P6M5K5		
$c_{v10}$ .....	3,15	3,11	3,42	3,63		
Марка твердого сплава (ВК, ТК)	ВК2	ВК3-М	ВК4	ВК6-М	ВК8	T15K6
$c_{v1}$ .....	-	8,73	-	7,96	6,11	-
$c_{v3}$ .....	-	6,75	-	6,13	4,72	-
$c_{v4}$ .....	3,85	4,45	2,93	-	2,53	1,47
$c_{v7}$ .....	4,81	5,56	3,66	-	3,16	1,84
$c_{v11}$ .....	7,62	7,79	6,43	-	5,95	4,42
Марка СТМ	АСБ	АСПК				
$c_{v2}$ .....	2160	3250				
$c_{v5}$ .....	2320	3480				
$c_{v6}$ .....	2170	3250				
$c_{v8}$ .....	2900	4350				
$c_{v9}$ .....	2710	4060				

## 2.1.22. Рекомендуемые геометрические параметры и критерий затупления спиральных сверл

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	Геометрические параметры сверл, °				Критерий затупления $h_3$ , мм
		2φ	γ	α	ω	
<b>Стеклотекстолиты</b>						
СТ	ВК6, ВК6-М, ВК8	70-80	15	25	20	0,1-0,3
СТЭФ	ВК6, ВК6-М, ВК8	70-90	15	30	20	
КАСТ	ВК8	70	10	25	-	
Стекловолокнит	Р6М5	85	-	20-24	8-15	
АГ-4В	Р6М5	70	10-15	16	-	
	ВК8	70	12	20	-	
<b>Стеклопластики</b>						
АГ-4С	Р6М5	60	15	20	10-15	
	ВК6, ВК6-М, ВК8	70	12	20	20	
СВАМ	Р6М5	70	15	30	10-15	
	ВК6, ВК6-М, ВК8	70	10	25	20	
«Н»	Р6М3, Р6М5, Р6М5К5, Р9, Р9Ф5К5, Р12	100	15	20	-	0,15-0,20
	ВК2, ВК3, ВК3-М, ВК4, ВК6, ВК6-М, ВК8	100	10	20	-	0,1-0,15
Углепластик	Р6М3, Р6М5, Р6М5К5, Р9, Р12	90-100	10-15	15-20		
	ВК2, ВК3-М, ВК4, ВК6-М, ВК8	90-100	10	15-20		
Органопластик	Р6М5, ВК8	90-100	10	15	-	0,1-0,12
Боропластик	ВК2, ВК3-М, ВК6-М, ВК8	105	10	20	-	0,25-0,30

В табл. 2.1.23 приведены рекомендуемые подачи  $S_o$  при сверлении стеклопластиков (кроме модификации «Н») быстрорежущими сверлами. Меньшие значения  $S_o$  следует выбирать для сверл малого диаметра, большие - для сверл большого диаметра. Подачи при обработке отверстий в стеклопластике «Н» и углепластике

$$S_o = n_s R_z + m_s v + x_s D + c_s,$$

при сверлении боропластиков

$$S_o = c_s R_z^{n_s} v^{m_s} D^{x_s}.$$

Значения постоянных и показателей степеней приведены в табл. 2.1.24.

Скорость резания вычисляют с учетом подачи, диаметра сверла и заданного периода стойкости  $T$  в соответствии с табл. 2.1.25. Период стойкости рекомендуют выбирать в зависимости от диаметра сверла из следующих соотношений:  $T = (0,5...2) D$  для быстрорежущих сверл и  $T = (2...3) D$  для твердосплавных сверл. Стойкость сверл диаметром до 4 мм принимают ниже указанных значений.

При сверлении боропластика применение твердосплавных сверл в связи с их крайне низкой стойкостью (до 2 мин) допустимо лишь в случаях обработки малого числа отверстий. В условиях серийного производства рекомендуют использовать алмазные сверла.

В изделиях из ПКМ фрезерованием обрабатывают чаще всего пазы, окна, лючки и т.п. При этом применяют концевые, дисковые и торцовые фрезы, реže - цилиндрические.

**2.1.23. Рекомендуемые значения подач при сверлении стеклопластиков (кроме марки «Н»)  
в зависимости от заданного параметра шероховатости**

Параметр шероховатости поверхности $R_a$ , мкм	2,5-4	4-7,5	7,5-10	Более 10
Подача $S_o$ , мм	0,1-0,2	0,15-0,3	0,2-0,4	0,3-0,8

**2.1.24. Данные для расчета подачи  $S_o$ , мм, в зависимости от параметра шероховатости  $R_z$   
при сверлении стеклопластика «Н», угле- и боропластиков**

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	$c_s$	$n_s$	$m_s$	$x_s$	Границы применения		
						$v$ , м/с	$S_o$ , мм	$t$ , мм
Стеклопластик «Н»	ВК8	-0,238	$1,98 \cdot 10^{-2}$	0,463	$-3,45 \cdot 10^{-2}$	0,07-1,28	0,1-0,5	4-20
Углепластик	Р6М5	-0,233	$2,01 \cdot 10^{-2}$	0,506	$-3,57 \cdot 10^{-2}$			
Боропластик	ВК8	$5,72 \cdot 10^{12}$	-10	1,6	2,9	0,04-0,60	0,05-0,3	4-20

2.1.25. Данные для расчета скорости резания  $v$ , м/с при сверлении

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	$v = \frac{c_v D^{x_v}}{T^m S^{y_v}}$				Границы применения	
		$c_v$	$m$	$x_v$	$y_v$	$S_o$ , мм	$D$ , мм
Стеклотекстолиты: СТ	P6M5 BK, TK	0,23	0,66	0,80	0,34	0,1-0,6	5-25
		$c_{v1}$ *	0,90	0,90	0,37	0,1-0,6	5-25
СТЭФ КАСТ	BK6, BK8 P6M5	1,81	1,16	1,24	0,98	0,07-0,3	6-18
		0,473	1,17	1,04	0,60	0,07-0,4	6-22
Стекловолокнит АГ-4В	P6M5 BK8	0,286	0,64	0,59	0,26	0,007-0,4	6-22
		3,47	0,71	0,60	0,26	0,07-0,4	6-22
Стеклопластики: АГ-4С	P6M5 BK8	0,226	0,56	0,63	0,32	0,06-0,2	5-9
		2,19	0,8	0,73	0,43	0,06-0,2	5-9
«Н»	BK БР	$c_{v2}$ *	1,30	0,08	0,93	0,1-0,4	4-20
		$c_{v3}$ *	0,60	0,14	0,28	0,08-0,4	4-20
Углепластик	BK БР	$c_{v4}$ *	1,34	0,11	0,96	0,1-0,4	4-20
		$c_{v5}$ *	0,67	0,18	0,31	0,08-0,4	4-20
Боропластик	BK8	$9,83 \cdot 10^{-3}$	0,68	0,76	0,38	0,05-0,3	4-20

\* Коэффициент  $c_v$  в зависимости от марки инструментального материала:

Марка твердого сплава . . . . .	BK2	BK4	BK6-M	BK8	BK10-M	T15K6	T15K10
$c_{v1}$ . . . . .	-	3,36	3,66	3,05	1,22	2,14	1,83
$c_{v2}$ . . . . .	35,4	27,4	-	17,7	-	-	-
$c_{v4}$ . . . . .	39,2	30,4	-	19,6	-	-	-
Марка быстрорежущей стали	P6M3	P6M5	P6M5K5	P9	P9Ф5K5	P12	
$c_{v3}$ . . . . .	0,21	0,21	0,24	0,18	0,21	0,23	
$c_{v5}$ . . . . .	0,27	0,27	0,31	0,24	0,27	0,29	

### 2.1.26. Рекомендуемые геометрические элементы режущей части фрез

Обрабатываемый материал	Тип фрезы	Материал режущей части (группа *)	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$\alpha_1^\circ$	$\varphi^\circ$	$\varphi_1^\circ$	$\omega^\circ$	$r_B$ , мм
Стеклотекстолиты, стекловолокниты, стеклопластики (кроме марки «Н»)	Цилиндрическая	БР	10	20	-	-	-	30	-
		ТС	8-15	15	-	-	-	30	-
	Торцовая	БР	5-12	18-25	-	45-90	10-20	0-25	0,3-2
		ТС	5-12	15-20	-	45-90	10-20	0-25	0,3-2
		АС	0-5	18	-	45	15	-	1,5-2
	Дисковая	БР	10	20	-	-	2,5	-	-
	Концевая	ТС	5	18	3	-	2,5	-	-
ТС		15	20	-	-	-	40	-	
Прорезная	ТС	5-10	20-22	-	-	-	10-15	-	
Стеклопластик «Н», углепластик	Торцовая	ТС	5-18	18-20	16-18	45	10-15	10	-
		АС	0-5	18	18	45	15	-	1,5-2
	Дисковая	ТС	5-8	18-20	8	90	3	15	-
	Концевая	ТС	10-15	20	16-18	90	10-15	40	-
Органопластик	Торцовая	ТС, БР	0-10	12-15	-	45	15	-	1,5-2
		АС	0-5	18	18	45	15	-	1,5-2
	Прорезная	БР	20-22	18-22					

\* ТС - твердый сплав группы ВК; БР - быстрорежущая сталь; АС - алмаз синтетический (АСБ, АСПК)

Рекомендуемые с учетом особенностей процесса резания ПКМ геометрические параметры фрез приведены в табл. 2.1.26. За критерий износа всех типов фрез из твердого сплава и быстрорежущей стали принимают их износ по задней поверхности зуба, равный  $h_3 = 0,2...0,3$  мм для чистовых операций и  $h_3 = 0,5...0,6$  мм для черновых операций. Допустимый износ фрез с вставками из АСБ и АСПК принимают  $h_3 = 0,3$  мм.

Глубина резания и ширина фрезерования определяются припуском на обработку и видом фрезерования. Подачу на зуб фрезы  $S_z$ , мм, выбирают в зависимости от заданного параметра шероховатости поверхности и точности обработки. При  $S_z > 0,25$  мм увеличивается вероятность появления сколов на кромках обрабатываемых поверхностей; для подач  $S_z < 0,03$  мм могут появляться прижоги уже при небольшом износе зуба. Интервалы значений подач в зависимости от параметров шероховатости поверхности приведены в табл. 2.1.27.

Скорость резания определяют по формуле  $v = v(T, t, S_z, B, D)$  в соответствии с табл. 2.1.28.

Фрезерование боропластика твердосплавными фрезами практически невозможно из-за их катастрофически быстрого изнашивания. Обработка в ограниченных объемах может проводиться фрезами, оснащенными вставками из искусственного алмаза АСВ, однако стойкость инструмента и в этом случае остается неудовлетворительной (до 1...2 мин). Для обработки пазов в боропластике исполь-

зуют специальный алмазный инструмент, работающий по принципу абразивных инструментов.

Работы по совершенствованию процесса резания ПКМ направлены на увеличение производительности труда, повышение качества изготовления изделий, стойкости инструмента, технико-экономических показателей обработки.

Повышение технологических характеристик достигают путем оптимизации условий обработки (выбора режимов резания, геометрических параметров инструмента и марки его материала, параметров технологической системы, СОЖ и др.) при традиционной схеме резания или применением новых методов обработки: широких срезов, высокоскоростной обработки, точения с предразрушением срезаемого слоя, обработки с дополнительным технологическим покрытием и ряда других.

**Метод широких срезов (МШС).** Сущность метода заключается в использовании для удаления припуска инструмента с шириной режущей кромки 100...300 мм и более, работающего на операции точения с поперечной подачей по тангенциальной или радиальной схеме обработки фасонным инструментом. Метод позволяет обрабатывать протяженные части поверхности, иногда все подлежащие формообразованию поверхности изделия, включая наружные, внутренние и торцовые, состоящие из участков разной конфигурации и точности. Это дает возможность значительно, в 10...20 раз и более сократить трудоемкость формообразования при высоком качестве поверхностного слоя. Обрабатывают изделия из стекло-, угле- и органо-пластиков, сопротивление резанию которых

### 2.1.27. Рекомендуемые значения подач при фрезеровании стеклотекстолита, стекловолокниста, стеклопластика и углеродистого пластика в зависимости от заданных параметров шероховатости

Параметр шероховатости поверхности Ra, мкм	Материал режущей части	Глубина резания $t$ , мм	Вид фрезерования	
			Цилиндрическое, дисковое	Торцовое
			Подача $S_z$ , мм	
1,25-2,5	Твердый сплав	-	До 0,03	До 0,03
2,5-5		-	0,03-0,10	0,03-0,06
5,0-10	Быстрорежущая сталь	-	0,10-0,30	0,06-0,15
10-16		-	0,25-0,40	0,05-0,25
16-20		-	0,35-0,60	0,25-0,50
0,32-3	АСБ,	1-1,5	-	0,04-0,08
3-12,5	АСПК	1,5-2	-	0,06-0,25

2.1.28. Данные для расчета скорости резания  $v$ , м/с, при фрезеровании

Вид фрезерования	Обрабатываемый материал	Материал режущей части	$v = c_v D^q / (T^m t^{x_v} S_z^{y_v} B^{u_v})$						Границы применения		
			$c_v$	$m$	$x_v$	$y_v$	$q_v$	$u_v$	$S_o$ , мм	$t$ , мм	$v$ , м/с
Цилиндрическое	Стеклотекстолит СТ	ВК4	$73,2 \cdot 10^2$	1,4	0,57	0,33	0	0	0,05-0,6	0,5-4	0,8-8
		Р6М5	26,2	1,27	0,55	0,78	0	0	0,1-1	0,5-4	0,6-3
Дисковое	Стеклопластик «Н», углепластик	ВК	$c_{v1}^*$	0,50	0,19	0,13	0,05	0	0,03-0,6	1-40	-
Торцовое	Стеклотекстолит СТЭФ	АСПК	$9,7 \cdot 10^{10}$	3,33	0,53	0,5	0	0,43	0,04-0,5	0,2-2	$v \leq 12,5$
		АСПК	$11,7 \cdot 10^{10}$	3,45	0,17	0,38	0	0,62	0,04-0,5	0,2-2	$v \leq 12,5$
	Стеклопластик «Н», углепластик	ВК	$c_{v2}^*$	0,51	0,42	0,13	0,285	0,2	0,03-0,6	1-10	-
		АСБ	$13,88 \cdot 10^8$	2,63	0,16	0,71	0	0,79	0,03-0,6	0,2-2	-

\* Коэффициенты  $c_{v1}$ ,  $c_{v2}$  в зависимости от марки инструментального материала:

Марка твердого сплава (ВК) .....	ВК2	ВК4	ВК6	ВК8
$c_{v1}$ .....	70,84	56,67	45,34	34,00
$c_{v2}$ .....	77,63	62,10	49,68	37,26

существенно меньше, чем при обработке металлов. При МШС скорость резания выбирают из рекомендаций для обычной обработки, подачу - исходя из точности обработки с учетом деформаций технологической системы. Применение метода может ограничиваться требованиями к точности обработки, возможностями передачи рабочего движения на изделие, технологическими возможностями оборудования, оснастки, инструмента.

**Метод высокоскоростной обработки.** Режим обработки ПКМ, в первую очередь, скорость резания при обычном резании, назначают из условия отсутствия термоокислительной деструкции материала, что считают одним из обязательных требований обеспечения качества поверхностного слоя изделия. Во многих случаях это существенно ограничивает производительность обработки. В области высоких скоростей резания (25...100 м/с) при температурах, значительно (до 2...4 раз) превышающих критические температуры термодеструкции ПКМ, существует широкий диапазон условий обработки, при котором обеспечивается высокое качество поверхностного слоя, что объясняется малым при высоких  $v$ , недостаточным для протекания термоокислительных процессов, временем действия контактной температуры на заготовку. Это позволяет повысить производительность обработки в 50-100 раз. Применение метода может ограничиваться техническими возможностями оборудования, большими габаритами (инерционными силами) или недостаточной жесткостью заготовки.

**Метод точения с предразрушением срезаемого слоя.** Сущность метода заключается в целенаправленном изменении физико-механических свойств материала срезаемого слоя за счет предварительного его деформирования, которое осуществляют в процессе резания дополнительным механическим источником энергии, формируя при этом в поверхностных слоях удаляемого материала развитую систему микро- и макротрещин. Механическое воздействие осуществляют одним из методов поверхностного деформирования (накатывания, выглаживания, чеканки и т.п.), добиваясь частичного разрушения матрицы ПКМ в объеме материала срезаемого слоя, снижения механических характеристик и, как следствие, уменьшения силы и температуры резания. Метод позволяет при точении стекло- и углепластиков повысить стойкость режущего инструмента до 10 раз и более, снизить параметры шероховатости поверхности и погрешности формы.

**Метод обработки с дополнительным технологическим покрытием.** Метод предназначен для повышения качества обработанных лез-

вийным инструментом поверхностей изделий из волокнистых ПКМ, обеспечивая удаление ворса, образующегося в результате перерезания волокон в процессе резания. При обработке детали в окончательный размер образующийся ворс связывают последующим нанесением на обработанную поверхность твердеющего технологического покрытия, которое затем удаляют лезвийным инструментом. В качестве покрытия используют различные типы связующего, применяемого при изготовлении ПКМ, или быстротвердеющие клеи и лаки, имеющие химическое родство с основным материалом. Технологическое покрытие должно заполнять неровности поверхности и после полимеризации (затвердения) обеспечивать хорошую адгезию с материалом заготовки и перерезанными волокнами. Механическая обработка технологического покрытия на режимах тонкого точения позволяет получить параметр шероховатости поверхности деталей из органопластика  $Ra=0,5...0,2$  мкм и высокую точность, практически полностью исключает ворсистость обработанной поверхности, что не обеспечивается другими способами чистовой обработки. Метод можно использовать на операциях точения, фрезерования, сверления, зенкерования, развертывания и ряде других. Режимы резания ПКМ и технологического покрытия назначают в соответствии с рекомендациями по обработке указанных материалов в обычных условиях.

#### 2.1.7. СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) являются обязательными при высоком качестве продукции и высоком уровне экономических показателей производства элементом технологического обеспечения операций обработки заготовок резанием. Путем рационального применения СОТС можно в среднем в 1,5-2,5 раза повысить стойкость режущих инструментов, на 10...20 % и более увеличить производительность обработки заготовок, существенно улучшить качество обработанных поверхностей, а тем самым и эксплуатационные характеристики деталей.

Технологическая эффективность СОТС определяется комплексом его функциональных действий (эффектов) непосредственно в процессе механической обработки - смазочного, диспергирующего, охлаждающего, моющего. Смазочное действие СОТС заключается в его экранирующем и антифрикционном эффектах вследствие образования на контактирующих поверхностях режущего инструмента и обрабатываемой заготовки вторичных

структур. Диспергирующее действие СОТС проявляется как на обрабатываемой заготовке, так и в зоне контакта между заготовкой и инструментом, и определяется его высокой поверхностной активностью - способностью непосредственно в зоне разрушения эффективно снижать поверхностную энергию (работу образования новой поверхности) обрабатываемого твердого тела (заготовки). Моющее действие СОТС проявляется в физико-химических, механических и гидродинамических процессах (отделение дисперсных продуктов от поверхностей заготовки и инструмента, стабилизация продуктов диспергирования и предотвращение их последующей десорбции заготовкой, инструментом или элементами системы применения СОТС). С помощью охлаждающего действия СОТС, определяемого его теплофизическими свойствами и гидродинамическими условиями в зоне обработки, обеспечивается дополнительный отвод тепла из зоны обработки и, как следствие, - снижение контактных температур и особенно температур режущего инструмента и заготовки.

Современные ассортименты включают шесть классов СОТС: 1) газообразные; 2) жидкие: водосмешиваемые - образующие в воде эмульсии, дающие прозрачные растворы (синтетические); масляные; 3) быстроиспаряющиеся; 4) расплавы металлов, солей и других веществ; 5) твердые; 6) пластичные. В подавляющем большинстве на операциях обработки заготовок резанием в качестве СОТС используют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ).

Отечественный базовый ассортимент включает более 50 СОЖ, в том числе 12-13 наиболее широко употребляемых на операциях обработки заготовок резанием водных СОЖ, приготавливаемых из исходных продуктов (концентратов) на машиностроительных предприятиях, и примерно столько же масляных жидкостей, поставляемых в готовом для применения состоянии. Базовый ассортимент содержит водные СОЖ трех видов: с невысоким, средним и высоким содержанием присадок, усиливающих смазочные свойства СОЖ. К первому виду относятся синтетические и полусинтетические СОЖ на основе продуктов Аквол-10М, Аквол-11, Карбамол-III и Э1, эмульсии Укринол-1М, МХО-60, Веле, Автокат; ко второму виду - эмульсии Синтал-2, Аквол-2, 14 и 15, Аквемус, полимерсодержащая СОЖ Аквапол-1; к третьему виду - эмульсии Аквол-2 и 6. Ассортимент включает и масляные СОЖ тех же трех видов, начиная от масел ОСМ-1, Укринол-14 и ОСМ-3 с невысоким содержанием присадок и кончая СОЖ МР-4, МР-7, МР-10, МР-99 с высоким

их содержанием. Чем выше содержание присадок, тем для более напряженных и сложных условий обработки заготовок резанием предназначается СОЖ. Базовый ассортимент постепенно изменяется: осваивается производство новых высокоэффективных СОЖ и исходных продуктов для их приготовления, прекращается по тем или иным причинам выпуск отдельных СОЖ и концентратов.

Разработаны и опубликованы рекомендации по выбору СОЖ для операций обработки заготовок из различных материалов на металлорежущих станках. Рекомендации учитывают, как правило, обрабатываемость материала заготовки (его химический состав, физико-механические свойства, структуру, твердость), вид обработки, инструментальный материал и в отдельных случаях особенности геометрии режущего инструмента, требования к качеству обработанной поверхности.

Реализуют два принципиально различных направления повышения технологической эффективности СОЖ на операциях обработки заготовок резанием: 1) изменение физико-химических свойств СОЖ; 2) изменение условий контактирования СОЖ с режущим инструментом и обрабатываемой заготовкой.

Физико-химические свойства СОЖ можно варьировать двумя путями. Во-первых, путем изменения исходных свойств СОЖ за счет изменения ее химического состава. При этом стремятся повысить химическую и физическую активность СОЖ по отношению к обрабатываемой заготовке и режущему инструменту, чтобы усилить смазочные и диспергирующие свойства СОЖ. Во-вторых, - путем временного изменения свойств СОЖ в нужном направлении в результате энергетического воздействия (магнитного, электрического, светового, звукового и др.). Второе направление повышения технологической эффективности СОЖ путем изменения условий контактирования СОЖ с инструментом и с заготовкой реализуется за счет техники подачи СОЖ.

Технологический процесс применения водных СОЖ в машиностроении более сложен, чем процесс применения масляной жидкости, поступающей на предприятие в готовом для использования виде. Типовой технологический процесс применения водосмешиваемой СОЖ (рис. 2.1.8) начинается с операции ее приготовления, после чего следует сбор приготвленной СОЖ в баках и ее бактериологическая обработка. Затем жидкость транспортируется к станкам (операция 4) и, проходя через специальные устройства, подвергается энергетической обработке для повышения эксплуатационной и технологичес-

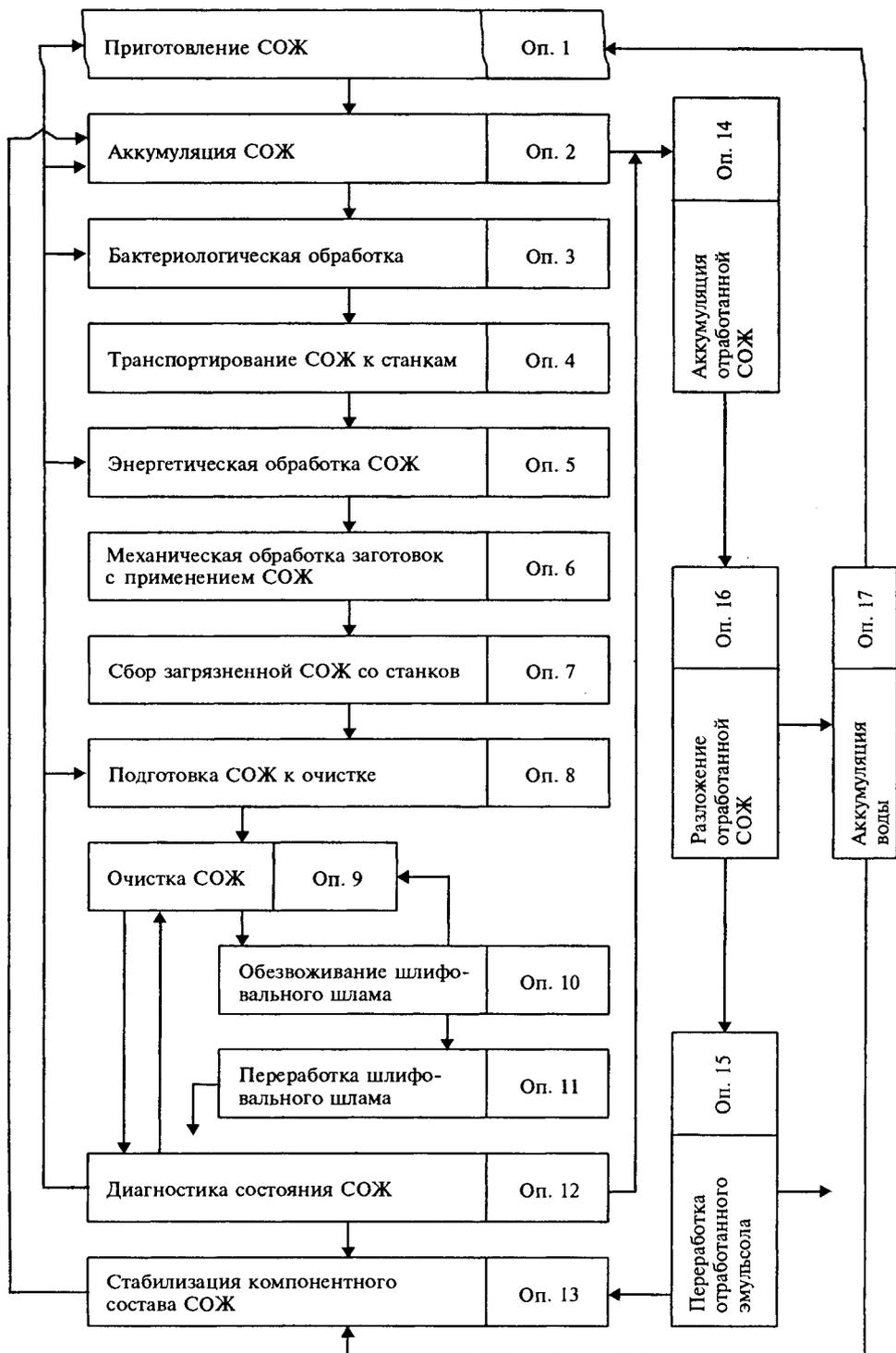


Рис. 2.1.8. Структурная схема технологического процесса применения СОЖ

кой эффективности. В процессе обработки заготовок жидкость загрязняется механическими и иными примесями. На операции 8 осуществляется подготовка СОЖ к очистке, например, ее электромагнитная обработка с целью коагуляции частиц загрязнений и повышения тем самым вероятности их последующего удаления на операции 9. Если обработка заготовок выполняется абразивными инструментами, то затем следуют специфические операции обезжоживания и переработки шлама. После очистки диагностируется состояние СОЖ (операция 12). Результаты диагностики определяют режимы работы оборудования на операциях очистки, стабилизации компонентного состава СОЖ (операция 13), бактериологической и энергетической обработки. После очистки и стабилизации компонентного состава СОЖ аккумулируется в баках, откуда насосами подается к станкам. При выходе состояния СОЖ за допустимые пределы с операции диагностики подается команда на разложение отработанной (операция 16) и приготовление новой СОЖ (операция 1). В результате разложения эмульсионной СОЖ получают воду, которую используют для приготовления СОЖ. Выделенный при разложении отработанный эмульсол поступает на переработку (операция 15) и после регенерации может быть, в частности, использован для приготовления СОЖ и стабилизации ее компонентного состава.

Таким образом по представленной на рис. 2.1.8 схеме строится замкнутый цикл безотходной технологии применения СОЖ. Максимальный эффект от применения СОЖ на операциях металлообработки может быть обеспечен лишь при оптимальном функционировании всех операций технологического процесса применения СОЖ. Реализация такого процесса путем создания соответствующей системы применения СОЖ представляет собой весьма сложную техническую задачу и оправдана при выполнении следующих условий: повышение производительности металлорежущего оборудования на 10-15 %; снижение потерь от брака, вызываемого невыполнением технических требований к СОЖ, в 8-10 раз; снижение расхода основных и вспомогательных материалов и энергозатрат в 2-3 раза; ликвидация выброса в окружающую среду вредных веществ, отходов обработки и аэрозолей; снижение численности обслуживающего персонала до одного-двух человек в смену и переход на сервисное обслуживание наладки и ремонта системы применения СОЖ; исключение ручного труда при обслуживании этой системы.

Если перечисленные условия, определяющие целесообразность создания высокоэффективной безотходной централизованной или централизованно-децентрализованной (групповой) системы применения СОЖ, не удовлетворяются, упрощают систему, исключая отдельные операции (см. рис. 2.1.8), а в простейшем случае ограничиваются децентрализованными (индивидуальными) системами. При этом неизменными элементами любой системы применения СОЖ являются устройства для подачи СОЖ в зону обработки и очистки ее от механических примесей.

Техника подачи СОЖ в зону обработки заготовок резанием предопределяется выбором соответствующего способа подачи. Первоначальным критерием этого выбора является эффективность действия СОЖ, обеспечиваемая в условиях выполнения данной технологической операции тем или иным способом подачи СОЖ (табл. 2.1.29). Окончательный вариант способа и техники подачи СОЖ определяются на основе экономических сопоставлений. По данным табл. 2.1.29 можно скомпоновать комбинированные способы, обеспечивающие еще более высокую эффективность СОЖ: высокоэффективны, например, комбинации из способов 1 и 7, 1 и 8, 2 и 10.

Очистка СОЖ от механических примесей обеспечивает улучшение качества обработанных поверхностей деталей, повышение стойкости режущих инструментов, возможность повышения производительности обработки заготовок резанием, способствует стабилизации свойств СОЖ и продлению срока ее использования, а тем самым сокращению расходов на эксплуатацию СОЖ. Очиститель выбирают с помощью технологических регламентов чистоты СОЖ, которые устанавливают связь между заданными параметрами качества обработанной резанием поверхности детали (высотным и шаговым параметрами шероховатости, точностью геометрической формы, свойствами поверхностного слоя) и параметрами качества очистки СОЖ - тонкостью (минимальный размер частиц, полностью задерживаемых очистителем) и степенью очистки (процент твердых примесей, задержанных очистителем). При этом учитывается и производительность очистителя. На рис. 2.1.9 приведена классификация современных очистителей СОЖ: цифрами отмечены очистители, для которых в табл. 2.1.30 приведены значения обеспечиваемой ими тонкости очистки. При необходимости, особенно в групповых и централизованных системах применения СОЖ, используют комбинации из нескольких очистителей.

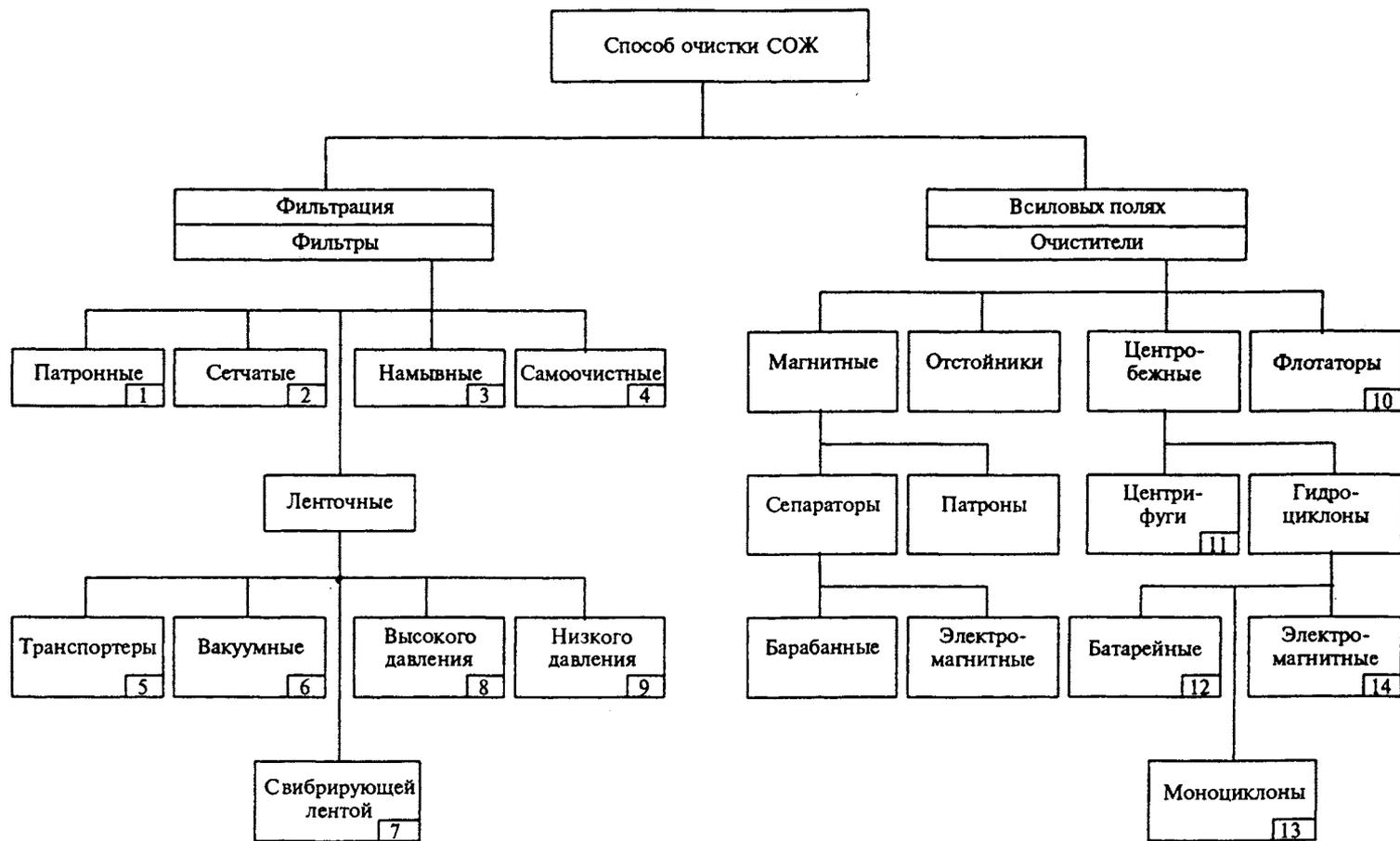


Рис. 2.1.9. Очистители, применяемые для очистки СОЖ

## 2.1.29. Способы подачи СОЖ и их эффективность

Но- мер спо- соба	Подача СОЖ	Вид обработки		Действие СОЖ				
		Лезвий- ная	Шли- фован- ие	Смазоч- ное	Охлаж- даю- щее	Моющее по отношению		
						к инструменту		к заго- товке
						лезвий- ному	абразив- ному	
1	Свободно падающей струей (поливом)	+	+	Н	У	Х-У	Н	Х
2	Под давлением через сопловой насадок (напорной струей)	+	+	У-Н	Х	В	У	В
3	В распыленном состоянии	+	+	Н	У-Н	У	Н	Н
4	Через каналы в инструменте с выходом в зону резания	+	+	В-Х	У	У	Н	У-Н
5	То же, без выхода в зону резания	+	-	Нет	У	Нет	-	Нет
6	Контактное смачивание	+	+	В-Х	Н	Н	Н	У
7	Струйно-напорная врезонная	-	+	Х	В	-	В	Х-В
8	Гидроаэродинамическая	-	+	Х	В	-	В	Х-В
9	С ультразвуковыми колебаниями	-	+	Х	У	-	В	У
10	Через поры круга	-	+	В-Х	Н	-	Н	Н
11	В среде СОЖ	+	+	В	Х	У	У	У

Обозначения: «+», «-» - соответственно способ применяется или не применяется; Эффективность действия СОЖ: Н - незначительная; У - удовлетворительная; Х - хорошая; В - высокая.

## 2.1.30. Тонкость очистки очистителей

№ очистителя (см. рис. 2.1.9)	Тонкость очистки, мкм	№ очистителя (см. рис. 2.1.9)	Тонкость очистки, мкм
1	0,1-10	8	10-40
2	40-500	9	10-40
3	2-5	10	5-10
4	5	11	0,5-2
5	25	12	3-10
6	10-15	13	5-15
7	25		

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абразивная** и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. А.Н. Резникова. М.: Машиностроение, 1977, 390 с.

2. **Ардамацкий А.Л.** Алмазная обработка оптических деталей. Л.: Машиностроение, 1978, 232 с.

3. **Безъязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Константинов А.В.** и др. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 1992, 183 с.

4. **Бердичевский Е.Г.** Смазочно-охлаждающие технологические средства для

обработки материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1984, 224 с.

5. Даниелян А.М., Бобрик П.И., Гуревич Я.Л., Егоров И.С. Обработка резанием жаропрочных сталей сплавов и тугоплавких металлов. М.: Машиностроение, 1965, 308 с.

6. Иткин М.Э., Шевелев О.Л. Выбор наилучшей режимов резания при работе на токарных станках. Казань, 1971, 182 с.

7. Качество машин. Справочник в 2-х томах / Под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 1995, т. 1, 856 с.

8. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1970.- 184 с.

9. Макаров А.Д. Экспериментальные методы решения задач оптимизации процесса резания металлов. Уфа, 1983, 97 с.

10. Молчанов Г.И. Повышение эффективности обработки на станках с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1979, 240 с.

11. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др., Под общ. ред. А.А. Пана. М.: Машиностроение, 1988, 736 с.

12. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник в 2-х томах, т. 1 / А.Д. Локтев, И.Ф. Гушин, В.А. Батуев и др. М.: Машиностроение, 1991, 640 с.

13. Перерозин М.А. Справочник по алмазной обработке стекла. М.: Машиностроение, 1987, 224 с.

14. Петруха П.Т., Чубаров А.Д. и др. Обработка резанием высокопрочных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей. М.: Машиностроение, 1980, 168 с.

15. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов: Учебное пособие / М.: Высшая школа, 1974, 587 с.

16. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов. Справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жариков, Н.Д. Юдина и др., Под общ. ред. В.А. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1990, 400 с.

17. Режимы резания металлов: Справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др. / М.: НИИТавтопром, 1995, 456 с.

18. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. 2 изд. М.: Машиностроение, 1986, 240 с.

19. Рогов В.В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей. Киев: Наук. думка, 1985, 246 с.

20. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. М.: Машиностроение, 1986, 352 с.

21. Силин С.С. Метод подobia при резании материалов. М.: Машиностроение, 1980, 152 с.

22. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др. Под общ. ред. И.А. Ординарцева. М.: Машиностроение, 1987, 846 с.

23. Справочник технолога-машиностроителя. В двух томах / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мецержикова. 4 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986, 496 с.

24. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Киев: Знание, 1987, 176 с.

25. Суворов А.А. Обработка деталей из вольфрама и его сплавов. М.: Машиностроение, 1978, 134 с.

26. Трёмбовицкий А.Н., Муковоз Ю.А. Алмазная обработка неметаллических материалов. Киев: Знание, 1980, 20 с.

27. Хрульков В.А., Тародей В.А. Механическая обработка деталей из керамики и сталей. Саратов: Изд-во Саратов. унив-та, 1975, 185 с.

28. Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке: Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1977, 189 с.

29. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс: Справочник. М.: Машиностроение, 1987, 152 с.

## Глава 2.2

### ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА

#### 2.2.1. ТОЧЕНИЕ

Точением обрабатываются наружные и внутренние цилиндрические, конические, сферические, фасонные поверхности тел вращения, а также их плоские торцовые поверхности. Число операций и переходов, их последовательность определяется размером и качеством обрабатываемых деталей. Осредненные данные по качеству обработки деталей в процессе точения, получаемые на токарных станках, приведены в табл. 2.2.1.

Процесс точения в производстве реализуют на токарных станках, которые в зависимости от типа производства могут быть универсальными, оснащенными системами ЧПУ или иметь жесткое кулачковое управление. Повышение производительности токарных станков достигается как установкой нескольких инструментов (револьверные головки или суппорты), работающих как последовательно, так и параллельно, так и увеличением количества шпинделей на станке, позволяющих

одновременно обрабатывать несколько поверхностей деталей. Многоцелевые станки, оснащенные дополнительными шпинделями, производят фрезерование, сверление различных боковых и торцовых поверхностей. Закрепление заготовок на станке осуществляется с помощью приспособлений, которые могут создавать либо асимметричные усилия

закрепления, либо осесимметричные. Первые (кулачковые патроны, цанги, кулачковые оправки) имеют большое усилие закрепления и предназначены для черновых и получистовых операций. Чистовые операции осуществляются при осесимметричном закреплении деталей, что увеличивает виброустойчивость и качество обработки.

### 2.2.1. Возможности точения, растачивания и подрезки торца

Вид операции	Точение			Растачивание			Подрезка торца		
	Квалитет точности	Параметр шероховатости, мкм		Квалитет точности	Параметр шероховатости, мкм		Квалитет точности	Параметр шероховатости, мкм	
		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra
Черновая	12-14	60-200	-	11-13	40-80	-	12-13	32-160	-
Получистовая	10-12	40-80	-	9-11	12-40	-		-	-
Чистовая	8-10	-	0,8-2,5	7-8	-	0,8-2,03	9-11	8-32	-
Тонкая	6-7	-	0,32-1,25	5-6	-	0,2-0,8	6-8	-	0,32-1,60

Наружные поверхности деталей, у которых длина больше диаметра в 6 раз, устанавливаются на токарных станках в центрах. Центровые отверстия в деталях делаются трех типов в зависимости от типа детали, а для валков диаметром менее 4 мм рекомендуется применять наружные центровые конусы.

Полые детали (цилиндры, втулки) устанавливаются на токарных станках на оправках жестких (конусных, цилиндрических и шлицевых) или разжимных (цанговых, роликовых, пружинчатых и с тонкостенно-деформированной стенкой).

При обработке нежестких деталей, у которых длина больше диаметра в 12 раз и более, применяют дополнительные опоры-люнеты, которые могут двигаться вместе с суппортом, либо устанавливаться неподвижно на станине станка.

Основным видом режущего инструмента, с помощью которого обтачиваются детали, являются резцы, которые для этого вида операций подразделяются на проходные, расточные, подрезные и отрезные.

**Проходные резцы** служат для обтачивания наружных поверхностей тел вращения и делятся на прямые и отогнутые. Отогнутые правые и левые проходные резцы имеют более широкое распространение вследствие их повышенной жесткости и возможности вести не только обтачивание поперуху, но и подрезку торцов и снятие фасок. Проходные резцы по своей конструкции выпускаются с напайными пластинами по ГОСТ 18877 с углом в плане  $\phi=45^\circ$ , по ГОСТ 18878 с углом в плане  $\phi$ , равным 45, 60 и 75° (последние выполняются с  $\phi_1$ , равным 15 и 25°), по ГОСТ 18879 - резцы

токарные, проходные упорные прямые и изогнутые с  $\phi=90^\circ$ . Широкое применение получили токарные резцы с механическим креплением сменных многогранных пластин. По ГОСТ 26476 определены основные четыре схемы крепления сменных многогранных пластин, предназначенные для различных видов державок, а ГОСТ 26613 определяет основные требования к резцам с механическим креплением этих пластин. Наиболее надежное крепление пластин обеспечивается при креплении их клином-прихватом, который одновременно поджимает пластину и к штифту, центрирующему пластинку, и к ее опорным поверхностям. Такие резцы выпускаются с тремя видами пластин: трехгранными с  $\phi=92^\circ$ , четырехгранными  $\phi=45^\circ$  и шестигранными с  $\phi=45^\circ$ . Для контурного и фасонного точения применяются параллелограмные пластины, размеры которых определяются ГОСТ 20872.

**Расточные резцы** работают в более сложных условиях, чем проходные из-за пониженной жесткости и сложности стружкообразования. Для обработки отверстий диаметром 3..8 мм применяют цельные резцы из твердого сплава со стальным хвостовиком; для сквозных отверстий - по ГОСТ 18062, а глухих - по ГОСТ 18063. Данные резцы имеют либо квадратный, либо цилиндрический хвостовик и выпускаются трех типов для координатно-расточных станков, для токарных автоматов и для токарных станков. В ряде случаев применяют двухсторонние резцы и резцовые расточные головки, имеющие более высокую производительность, но меньшую универсальность.

При высокой жесткости расточных резцов, повышенной виброустойчивости и обеспечении нормального выхода стружки отношение диаметра оправки резца и растачиваемого отверстия составляет 0,8-0,5, а диаметра резца и оправки колеблется в пределах 0,3-0,2. Широкое применение нашли расточные резцы с механическим креплением режущих пластин: трехгранной формы с  $\varphi=90^\circ$ , квадратными пластинами с  $\varphi$ , равным 75 и  $45^\circ$  и с ромбическими пластинами с  $\varphi=95^\circ$  (ГОСТ 26612).

**Подрезные резцы** предназначены для обработки плоскостей, перпендикулярных оси вращения и подрезки торцов напроход с помощью поперечной подачи. Подрезные резцы также выпускаются с напайными пластинами (ГОСТ 18893) изогнутого типа для повышенных динамических нагрузок и прямого типа.

Подрезные резцы с механическим креплением пластин выпускаются трехгранной формы с  $\varphi=90^\circ$ , а отогнутые - с положительным и отрицательным передними углами и пластинами квадратной формы с  $\varphi=75^\circ$ .

**Отрезные резцы** служат для отрезки заготовок и деталей на токарных станках. Эти резцы выполняют с головкой, ширина которой меньше ширины тела резца, но имеет большей жесткости оттянутую форму. Длина головки выбирается из расчета определяемого диаметра детали, но обычно не более 130...150 мм. Согласно ГОСТ 18884 отрезные резцы выпускаются в четырех исполнениях. В первом исполнении пластину, имеющую скосы, припаивают в угловой паз державки, что увеличивает площадь ее прилегания к державке, прочность соединения; уменьшаются сколы и выкрашивания пластинок.

Во втором исполнении пластинки имеют плоскую поверхность соединения, что делает их более технологичными, но уменьшает их динамическую прочность.

Третье и четвертое исполнение отличаются от указанных выше наличием оттянутой головки, повышающей прочность резцов. Это достигается и с помощью заточки на определенных резцах небольших углов ( $1-3^\circ$ ) в плане и задних углов на вспомогательных режущих кромках, что требует их качественной заточки и точной установки на станке. Для полной обработки одного из торцов детали при ее отрезке без центрального стержня главную режущую кромку затачивают под углом не  $90^\circ$ , а  $\varphi=75...80^\circ$ . Для того, чтобы облегчить врезание отрезного резца, условия схода стружки и возможность его увода, режущую кромку затачивают симметрично с углами в плане  $\varphi=60...80^\circ$  или с двумя симметричными

фасками с обеих сторон размером  $b=1...1,5$  мм под углом  $45^\circ$ .

Для токарных станков с ЧПУ и робототехнических комплексов необходимо было изменить конструкцию резцов. Широкое распространение получает блочная конструкция резцов, при которой режущая пластина крепится в резцовой подставке, устанавливаемой в державке. Резцовая подставка имеет сложную конфигурацию замка для ее крепления в державке, который обеспечивает возможность быстрой автоматической ее смены и высокую точность закрепления на станке как в радиальном направлении, так и по высоте. Эти подставки имеют V-образные пазы с углом  $90^\circ$ , которые позволяют эффективно применять автооператоры для замены режущих пластин. Крепление реализуется винтовым механизмом, требующим небольших смещений - лишь на один или полтора поворота, и небольшие моменты затяжки. Основные виды крепления пластины с отверстием - винтом, клин-прихватом и качающимся рычагом. Крепление винтом нашло наибольшее применение при чистовом точении и растачивании, обладает хорошим стружкоотводом и обеспечивает хороший доступ к поверхности обработки; не рекомендуется при черновой обработке. Применение клин-прихвата несколько усложняет конструкцию крепления, но более эффективно при черновой обработке.

Качающийся рычаг обеспечивает наиболее эффективное крепление при черновой обработке, обеспечивая хороший стружкоотвод, быструю смену для широкой номенклатуры пластинок.

Пластины без отверстия крепятся прихватом, что применяют при чистовой обработке. При токарной обработке используют свыше 60 типов режущих пластин различной геометрической формы. Выбор типа пластин определяется в первую очередь видом поверхности обрабатываемой детали, характером точения, необходимостью стружколопания, виброустойчивостью и энергоемкостью процесса резания. Размеры пластин находят, исходя из глубины резания и главного угла в плане, с тем чтобы обеспечить необходимую эффективную длину режущей кромки. В зависимости от усилий обработки длина пластинки превышает ширину резания в 2-4 раза. Для повышения прочности режущего инструмента, производительности и качества поверхностей необходимо выбирать пластины с большим радиусом при вершине; его отграничением является виброустойчивость технологической системы. По Чебышеву зависимость между высотой профиля шероховатости  $R$ , радиусом при вершине  $r$  и подачей  $S$  имеет

следующий вид:

$$R = S^2 / 8r.$$

Хотя практические результаты могут отличаться от расчетных в 2-3 раза, все же между ними при черновой и получистовой обработке существует тесная корреляционная связь. Особенно это касается круглых пластин, для которых уменьшение параметра шероховатости практически пропорционально диаметру пластины.

В качестве материалов режущей части токарных резцов применяют быстрорежущие стали и твердые сплавы.

1. Быстрорежущие стали нормальной производительности Р6М5, Р6М3, Р6М5 и повышенной производительности Р9К5, Р9К10, Р10К5Ф5, Р18К5Ф2 и др. используют в основном для фасонных резцов и резцов, работающих при черновом и получистовом точении, при котором возникают значительные динамические нагрузки. Твердость этих сталей 62...65 HRC; красностойкость достигает 650°С. Высокая работоспособность быстрорежущих сталей тесно связана с их карбидной однородностью, с тщательным соблюдением режимов заточки режущих поверхностей; скорости точения не превышают 1-1,5 м/с.

2. Твердые сплавы нашли наиболее широкое применение при токарной обработке. Главными их достоинствами являются высокая твердость (82...92 HRA) и слабое пластическое деформирование (модуль упругости 500-700 ГПа). Высокое временное сопротивление при сжатии до 6 ГПа, и низкая окисляемость до температур 873...1073 К позволяет увеличить скорость резания в 2-5 раз по сравнению с резцами из быстрорежущей стали.

К недостаткам твердых сплавов следует отнести относительно небольшую прочность при изгибе (1,00...2,5 ГПа) и ударную вязкость. Твердые сплавы различают в зависимости от состава карбидной основы: 1) карбидов вольфрама и кобальта; 2) карбидов титана, вольфрама и кобальта; 3) карбидов титана, вольфрама, тантала и кобальта; 4) карбидов и карбонитридов титана и кобальта.

В зависимости от вида точения и обрабатываемого материала твердые сплавы делятся согласно международным стандартам на три основные группы Р, М, К, (табл. 2.2.2).

Минералокерамические пластины для токарных резцов изготавливают на основе корунда ( $Al_2O_3$ ). Имея высокую температуростойкость до 1500°С, минералокерамические резцы обрабатывают стальные и чугунные заготовки со скоростью 5...10 м/с, однако их низкая прочность (временное сопротивление

при изгибе  $\sigma_{из} = 0,37$  ГПа) позволяет применять их только для чистовой обработки. Для повышения прочности ( $\sigma_{из} = 0,6...0,7$  ГПа) в минералокерамику вводят карбиды вольфрама, титана и молибдена. Неперетачиваемые многогранные и круглые пластины из керметов В3, ВОК-60 и ВОК-63 выпускают нормальной и повышенной точности для финишной обработки.

Сверхтвердые материалы нашли применение в виде неперетачиваемых круглых пластин диаметром 8...9,5 мм и высотой 3-5 мм, изготовляемых из поликристаллов алмаза и кубического нитрида бора (КНБ). Стойкость этих пластин в 5-20 раз выше твердосплавных, что позволяет повысить не только скорости резания, но и размерную точность обрабатываемых деталей. На основе КНБ, температуростойкость которого для инструментальных материалов 1800°С, для точения применяют следующие поликристаллические материалы: киборит, исмит, эльбор Р, гексанит Р, композит 05, ПТНБ, белбор.

Будучи инертными по отношению к железу и многим его сплавам, пластины на основе КНБ нашли широкое применение при обработке закаленных углеродистых и легированных сталей, а в последнее время - при точении специальных сплавов и твердых наплавов. Поликристаллические алмазные пластины по износостойкости приближаются к монокристаллам алмаза и поэтому являются самым твердым инструментальным материалом. Однако, низкая температуростойкость пластин (650°С) и химическое сродство к углероду позволяет наиболее успешно их применять при точении медных, алюминиевых сплавов, пластмасс и особенно высокопрочных композиционных полимерных материалов.

Одновременно с пластинами из сверхтвердых материалов выпускаются двухслойные пластины для токарных резцов. Верхний поликристаллический сверхтвердый слой толщиной 0,5-1 мм спекается с твердосплавной подложкой при высоких статических давлениях и температурах. Двухслойные пластины диаметром 10-15 мм и высотой 2-4 мм, выпускаемые как с алмазоносным слоем, так и с КНБ, имеют оптимальные упругопластические свойства твердого сплава и износостойкость сверхтвердых материалов.

Применение резцов из сверхтвердых материалов при обработке высокопрочных закаленных сплавов в 3-5 раз повышает производительность точения по сравнению с твердосплавным инструментом при одновре-

## 2.2.2. Области применения твердых сплавов

Обозначение по ИСО	Обозначение в России	Обрабатываемый материал. Тип снимаемой стружки	Вид обработки. Условия применения
P01	T30K4	Нелегированная углеродистая сталь. Сливная стружка	Чистовое и прецизионное точение
P10	T15K6	Углеродистая сталь. Сливная стружка	Чистовое и получистовое точение в том числе и фасонных поверхностей
P20	T14K8	Углеродистая сталь, ковкий чугун, цветные металлы. Сливная стружка	Чистовое и получистовое точение
P25	ТГ20K9	Сталь нелегированная, низко- и среднелегированная	Прерывистое точение
P30	T5K10, ТГ10K8-Б	Сталь, стальные отливки, коррозионно-стойкая сталь	Получистовое и чистовое точение, нарезание резьбы
P40	T5K10	Сталь, стальные отливки, коррозионно-стойкая сталь	Чистовое и получистовое точение
P50	ТГ7K12, T14K8	Сталь, стальные отливки	Черновое и прерывистое точение, отрезка; ударные нагрузки
M10	BK3, BK3-M	Коррозионно-стойкая сталь	Финишное точение, чистовое точение
M20	BK3-M, BK6-OM	Сталь повышенной обрабатываемости резанием. Легированный чугун	Чистовое точение
M30	BK6-M, BK10-OM	Марганцовистая сталь, коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса	Получистовое и чистовое точение
M40	BK8, BK10-OM, BK15-XOM	Коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса	Получистовое и чистовое точение, в том числе по корке
K01	BK6-OM, BK3	Чугун, бронза, латунь	Финишное и чистовое точение
K10	BK3, BK3-M, BK6-OM	Высокопрочный чугун, ковкий чугун	Финишное и чистовое точение
K20	BK6-OM, BK6-M	Жаропрочные и титановые сплавы, пластмасса, резина, дерево	Получистовое и чистовое точение
K30	BK6, BK8, BK10-OM	Жаропрочные и титановые сплавы	Черновое и получистовое точение, прерывистая обработка

менном повышении стойкости инструмента в 5-7 раз. Повышение производительности процесса точения высокопрочных материалов достигается вследствие совершенствования геометрических параметров режущей части, изменения физических свойств материала обрабатываемой поверхности и изменения кинематической схемы взаимодействия реза с заготовкой. С этой целью применяют резы с укороченной передней поверхностью, с зачищающей режущей кромкой, а также лопаточные и пустотелые резы.

Изменение физических свойств материала в зоне резания достигается опережающим пластическим деформированием, применением различных методов нагрева (плазменный, индукционный, лазерный, электроконтактный, инфракрасный, электролитический) или охлаждения (воздухом, эмульсией, воздушно-эмульсионными смесями).

Изменение кинематической схемы взаимодействия достигается применением круглых, вращающихся резцов (ротационное резание), резцов с режущей кромкой в виде винтовой линии (винтовые резы), а также наложением вибрации на резец (от низкочастотных до ультразвуковых).

Все эти методы позволяют увеличить стойкость резцов и повысить производительность труда, однако эффективность их использования связана с целым рядом как технологических, так и экономических ограничений.

Износ резцов, как правило, происходит по задней поверхности, поэтому в нормативах принят этот критерий для оценки затупления резцов: 0,8...1,4 мм при черновом точении, 0,5...1 мм при полусточивом, 0,2...0,5 мм при чистовом. Высокие показатели повышения производительности и качества детали достигаются при сверхскоростном точении (20...100 м/с), однако его применение ограничивается техническими возможностями станков.

При точении вязких материалов образующаяся сливная стружка является причиной снижения производительности обработки, особенно в автоматизированном производстве. В этом случае осуществляют стружколоманье либо с применением специальных накладок на режущую пластину, либо кинематическими методами.

Режимы резания при токарной обработке назначают с учетом материала и геометрических параметров режущей части резца, его конструкции, СОТС, периода стойкости, глубины резания, подачи, скорости резания, усилий и мощности резания, а также основного времени. Разрабатываемые методики,

алгоритмы и программы для ЭВМ позволяют при расчетах учесть все необходимые ограничения, накладываемые технологической системой и качеством детали, а также провести комплексную оптимизацию как режимов резания, так и геометрических параметров режущего инструмента. В качестве критериев оптимизации принимаются шпунное время и стоимость, причем оба их необходимо рассматривать совместно, так как затраты времени соответствуют слагаемым стоимости.

Оптимизация токарной обработки на 20-80% повышает ее производительность и снижает себестоимость изделия, делая ее наиболее эффективной для станков с ЧПУ и многоцелевых станков.

## 2.2.2. ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Фрезерование является высокопроизводительным и универсальным способом механической обработки резанием металлических, композиционных и пластмассовых материалов на черновых (обдирочных), полусточивых и чистовых операциях технологического процесса. Способом фрезерования можно получить 8-11 квалитет точности и поверхность с параметром шероховатости  $Ra=3,2...12,5$  мкм.

Наиболее широко фрезерование применяется при выполнении следующих операций технологического процесса механической обработки резанием.

Наружные плоские поверхности фрезеруют цилиндрической (рис. 2.2.1, а), торцовой (рис. 2.2.1, б) или концевой фрезой (рис. 2.2.1, в). Процесс фрезерования фасонных поверхностей большой протяженности по направлению формообразующей кривой и с малым изменением высоты фасонного профиля по содержанию и закономерностям близок к фрезерованию цилиндрической фрезой. В этом случае фасонная форма профиля зуба фрезы методом прямого копирования воспроизводит фасонную поверхность на детали.

Фрезерование внутренних (замкнутых) фасонных поверхностей (рис. 2.2.1, в) осуществляется концевой фрезой на вертикально-фрезерном станке с числовым программным управлением (ЧПУ), обеспечивающем движение подачи обрабатываемого тела по программе в двух направлениях. Сама поверхность в вертикальной секущей плоскости может быть прямолинейной или криволинейной.

Фрезерование прямолинейной канавки или паза с прямоугольным (рис. 2.2.1, г, е) или фасонным (рис. 2.2.1, д, ж) профилем в секущей плоскости, нормальной к оси канавки или паза, используют при обработке полукрытых пазов типа ласточкин хвост, Т-образных пазов и других пазов, канавок различных профилей. Отличие только в профиле формообразующей кривой на фрезе.

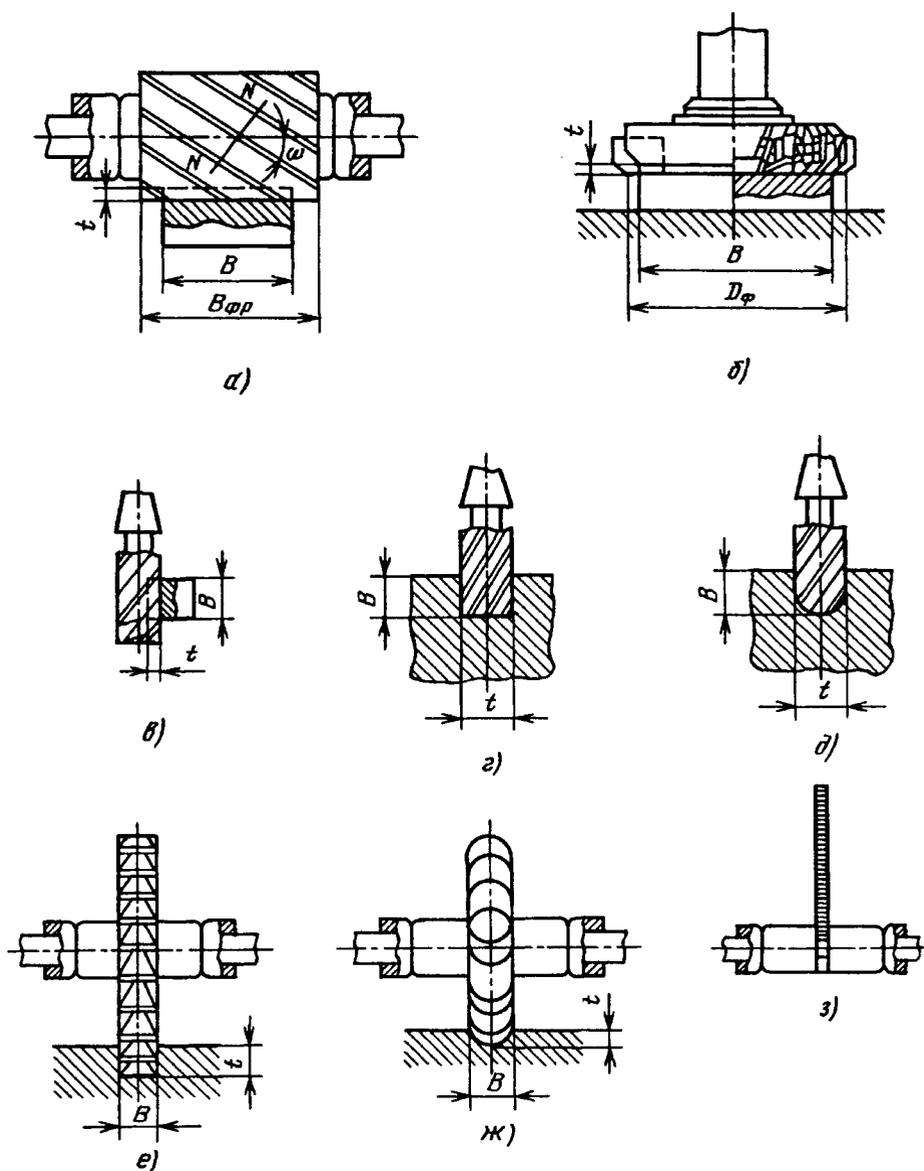


Рис. 2.2.1. Схемы фрезерования и основные виды фрез:

*а* - цилиндрическая; *б* - торцовая; *в* - и *г* - концевые; *д* - концевая фасонная; *е* - дисковая; *ж* - дисковая фасонная; *з* - отрезная

Фрезерование криволинейной канавки или паза с прямоугольным (рис. 2.2.1, *в*) или фасонным (рис. 2.2.1, *д*) профилем в секущей плоскости, нормальной к оси канавки или паза, осуществляется на станке с ЧПУ с подачей детали в соответствии с программой в двух направлениях. Если канавка или паз фрезеруется на поверхности цилиндрической детали, то деталь подается в направлении

своей оси и поворачивается вокруг оси. По существу эти способы следует отнести к методу прямого копирования. Поэтому к этому методу следует отнести нарезание прямозубых и косозубых зубчатых колес модульными дисковыми или концевыми фрезами. По методу, представленному на рис. 2.2.1, *ж*, можно фрезеровать как вогнутый, так и выпуклый профиль. Дисковыми отрезными фрезами разре-

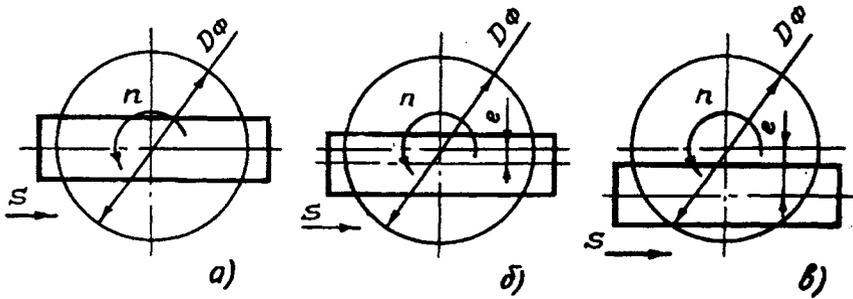


Рис. 2.2.2. Схемы торцевого фрезерования:

а - симметричное; б - асимметричное с эксцентриситетом; в - асимметричное одностороннее

зают прокат или заготовки другого сечения на части (рис. 2.2.1, з).

При торцевом фрезеровании возможны следующие схемы фрезерования: симметричное (рис. 2.2.2, а), асимметричное с эксцентриситетом (рис. 2.2.2, б), асимметричное одностороннее (рис. 2.2.2, в). Вторая и третья схемы торцевого фрезерования могут быть со смещением оси детали относительно оси фрезы как в направлении выхода зуба фрезы из процесса резания (рис. 2.2.2, б, в), так и в направлении входа.

При фрезеровании цилиндрической фрезой возможны следующие схемы фрезерования: встречное и попутное. При встречном фрезеровании зуб фрезы перемещается навстречу направлению движения подачи детали (рис. 2.2.3, а). При попутном фрезеровании в момент выхода зуба фрезы из процесса резания направление его движения совпадает с направлением движения подачи детали (рис. 2.2.3, б).

**Торцевое фрезерование.** Скорость резания  $v$  (м/с) - окружная скорость перемещения вершины зуба фрезы. Величина  $v$  определяется частотой вращения  $n$  (мин<sup>-1</sup>) и диаметром расположения вершин зубьев фрезы  $D_\phi$  (рис. 2.2.4).

Подача при фрезеровании определяется тремя связанными между собой величинами: подача на зуб фрезы  $S_z$  (мм) - подача за время поворота фрезы на центральный угол  $\psi_\Pi$ ; подача на оборот  $S_o$  (мм) - подача за время поворота фрезы на один оборот; минутная подача  $S_M$  (мм) - подача за 1 мин.

$$S_z = S_o / z; S_o = S_M / n; S_z = S_M / (n \cdot z).$$

Глубина фрезерования  $t$  (мм) - расстояние от обработанной до обрабатываемой поверхности, измеренное в направлении, параллельном оси фрезы. При черновой обра-

ботке литых или кованных заготовок глубина фрезерования может иметь переменное значение.

Ширина фрезерования  $B$  (мм) - размер обрабатываемого тела, измеренного в торцевой плоскости фрезы в направлении, перпендикулярном подаче.

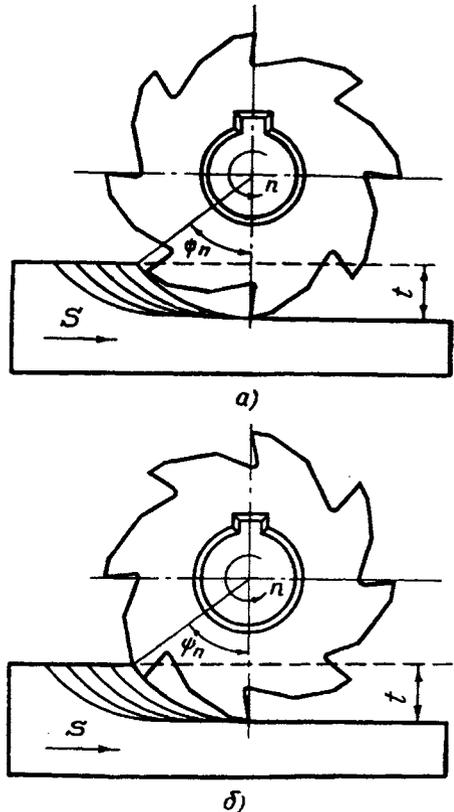


Рис. 2.2.3. Схемы фрезерования плоскостей цилиндрической фрезой:

а - встречное фрезерование;  
б - попутное фрезерование

Процесс резания при торцовом фрезеровании - процесс отделения с поверхности обрабатываемого тела объема металла размерами  $t$  по высоте и  $B$  по ширине. Процесс резания отдельным зубом - процесс отделения от обрабатываемого тела определенного объема металла с переменным по времени фрезерования сечением  $a_i \cdot b_i$  и длиной, равной длине траектории перемещения зуба по обрабатываемому телу. Процесс отделения снимаемого объема отдельным зубом происходит путем превращения его в стружку за счет высокоскоростного пластического формирования в зоне стружкообразования.

При торцовом фрезеровании каждый зуб внедряется в обрабатываемое тело относительно предшествующего в направлении подачи на расстояние  $S_z$ . Любая точка активной части режущей кромки описывает на поверхности обрабатываемого тела трахоиду. В любой точке контакта при измерении в направлении подачи две соседние трахоиды смещены относительно друг друга на величину  $S_z$ . В связи с тем, что скорость резания

$v$  значительно выше скорости подачи  $S_m$ , при практических расчетах трахоиду можно с незначительным допущением заменить дугой окружности. Длина траектории перемещения фрезы по обрабатываемому телу  $AB$  определяется углом входа зуба фрезы  $\psi_n$  и углом выхода  $\psi_k$  или углом полного контакта  $\psi_{\Pi}$ .

Важной характеристикой, определяющей работу отдельного зуба фрезы, является мгновенный угол контакта  $\psi_i$  - угол между радиусом, проведенным нормально к направлению подачи, и радиусом, проведенным в вершину рассматриваемого зуба фрезы. Углы  $\psi_i$ ,  $\psi_{\Pi}$ ,  $\psi_{\Pi}$ ,  $\psi_n$ ,  $\psi_k$  измеряются в торцовой плоскости - плоскости, проведенной через вершины зубьев фрезы нормально к оси фрезы.

В ходе перемещения зуба фрезы по обрабатываемому телу, величина мгновенного угла контакта  $\psi_i$ , определяющего положение точки  $D$ , изменяется от  $\psi_n$  в момент врезания до  $\pi/2$  в момент пересечения зубом линии, проведенной через ось фрезы, параллельно направлению подачи, и далее от  $\pi/2$  до  $\psi_k$  в момент выхода зуба фрезы из процесса резания.

**Цилиндрическое фрезерование.** Скорость резания и подача при цилиндрическом фрезеровании характеризуется теми же параметрами, что и при торцовом - значениями  $v$  (м/с),  $S_z$  (мм),  $S_0$  (мм),  $S_m$  (мм).

Глубина фрезерования  $t$  (мм) - расстояние от обработанной до обрабатываемой поверхности, измеренное в направлении, перпендикулярном вектору подачи в точке врезания зуба в обрабатываемое тело.

Ширина фрезерования  $B$  (мм) - размер линии контакта образующего цилиндра фрезы с обрабатываемым телом в направлении, параллельном оси фрезы.

При цилиндрическом фрезеровании прямозубой фрезой каждый зуб входит в контакт с обрабатываемым телом относительно предшествующего по направлению подачи на расстояние  $S_z$ . Любая точка активной части режущей кромки описывает на поверхности обрабатываемого тела трахоиду. В сечении, параллельном обработанной поверхности и расположенном на любом расстоянии от нее, две соседние трахоиды смещены относительно друг друга на величину  $S_z$ . В расчетах с некоторым упущением трахоиду можно заменить дугой окружности. Длина траектории перемещения зуба по обрабатываемому телу  $AB$  определяется полным углом контакта  $\psi_{\Pi}$ , зависящим от глубины фрезерования  $t$  и диаметра фрезы  $D_{\Phi}$ :

$$\psi_{\Pi} = \arccos \left( 1 - \frac{2t}{D_{\Phi}} \right). \quad (2.2.1)$$

Важная характеристика, определяющая работу отдельного зуба фрезы - мгновенный угол контакта  $\psi_i$ , являющийся углом между радиусом, проведенным в точку начала контакта и точку положения лезвия зуба фрезы в рассматриваемый момент (точки  $A$  и  $D$  на рис. 2.2.4). Величины углов  $\psi_i$ ,  $\psi_{\Pi}$ ,  $\psi_{\Pi}$ , измеряются в торцовой секущей плоскости.

Сила, действующая на фрезу, в целом является результирующей сил, действующих на отдельные зубья, находящиеся в рассматриваемый момент в процессе резания. Величина результирующей силы непрерывно изменяется вследствие изменения суммарной площади сечения срезаемого слоя  $F_c$  и изменения основных характеристик процесса резания для каждого отдельного зуба по длине реза.

На величину силы, действующей на зуб фрезы, влияют те же факторы, что и при установленном резании. Так, сила резания увеличивается с возрастанием глубины резания  $t$ , подачи на зуб  $S_z$ , а также с уменьшением главного угла в плане  $\varphi$  и уменьшается с ростом скорости резания  $v$  и переднего угла  $\gamma$ .

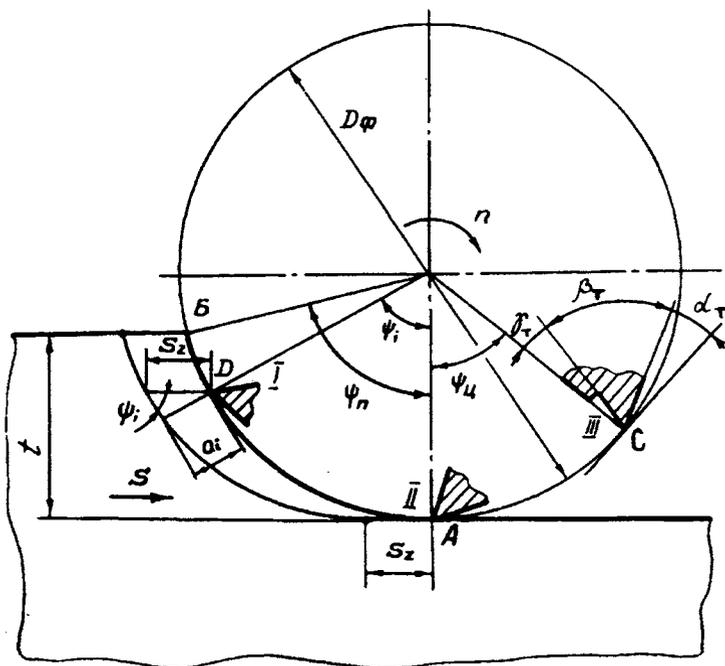


Рис. 2.2.4. Схема фрезерования, геометрия режущего зуба и параметры срезаемого слоя при фрезеровании цилиндрической фрезой

При торцовом и цилиндрическом фрезеровании с винтовыми зубьями результирующая сила резания может быть разложена на тангенциальную  $P_z$ , осевую  $P_x$  и радиальную  $P_y$  составляющие. Путем выбора геометрии режущих кромок добиваются различного соотношения  $P_y / P_x$ . Так, с увеличением главного угла в плане при торцовом фрезеровании и уменьшением угла наклона режущего лезвия при цилиндрическом фрезеровании с винтовым зубом отношение  $P_y / P_x$

растет и это создает неблагоприятную радиальную нагрузку на шпиндель, увеличивая вероятность возникновения вибрации в связи с пониженной жесткостью шпинделя фрезерного станка в радиальном направлении.

Для определения мощности, необходимой для осуществления главного движения (вращения фрезы), нужно знать величину суммарной составляющей силы резания  $P_{zc}$

(Н):

$$P_{zc} = 0,32 \frac{tBS}{D\phi n} K_s, \quad (2.2.2)$$

где  $K_s$  - удельная сила резания при фрезеровании, Па.

Величина  $K_s$  в формуле (2.2.2) представляет силу, необходимую для снятия срезаемого слоя поперечным сечением 1 мм<sup>2</sup>, т.е. является удельной силой резания.

Удельная сила резания  $K_s$  зависит главным образом от свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров режущего инструмента, прежде всего переднего угла, а также от средней толщины срезаемого слоя:

$$K_s = 0,62 K_{sT} a_{cp}^{-0,3} \left( 1 - \frac{\gamma_T + \gamma_{T'}}{100} \right), \quad (2.2.3)$$

где  $K_{sT}$  - удельная сила резания при средней толщине срезаемого слоя  $a_{cp} = 0,2$  мм и величине переднего радиального угла  $\gamma_T = -7^\circ$ , Па;

$a_{cp}$  - средняя толщина срезаемого слоя, мм.

Величина  $K_{sT}$  является характеристикой обрабатываемого материала и для некоторых групп обрабатываемых материалов приведена в табл. 2.2.3.

## 2.2.3. Классификация обрабатываемых материалов по группам обрабатываемости

Обрабатываемые материалы	Номер группы	Твердость НВ	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ , Па	Удельная сила резания при фрезеровании $K_{ST}$ , Па
Углеродистые стали	1	250	570	21	2800
	2	251-350	580-700	21	3400
Легированные стали	3	250	580	21	3000
	4	251-350	600-750	21	3600
Аустенитные и коррозионно-стойкие стали	5	250	550-850	21	3800
Закаленные стали	6	40-60 HRC		21	6700
Алюминиевые сплавы	7	30-100	150-680	7	1300
Сплавы на основе меди	8	30-100	200-550	9	2500

Средняя величина срезаемого слоя по длине реза вычисляется делением заштрихованной площади (рис. 2.2.5) на длину дуги, описываемой зубом фрезы:

$$a_{\text{ср}} = \frac{S_z B}{\psi_{\text{п}} D_{\text{ф}}} \cdot \frac{360}{\pi} \cdot \sin \varphi. \quad (2.2.4)$$

Рассчитав среднюю толщину среза  $a_{\text{ср}}$  и удельную силу резания  $K_S$  для конкретных условий обработки, по формуле (2.2.2) можно определить тангенциальную силу  $P_{zс}$ .

Для торцового фрезерования с некоторым допущением можно определить силу

$P_{xyс}$ :  $P_{xyс}$  - сила, действующая нормально к режущей кромке (при  $\lambda=0$ ) в плоскости, проходящей через ось фрезы:

$$P_{xyс} = \varepsilon P_{zс}, \quad (2.2.5)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент, показывающий какую долю от тангенциальной силы  $P_{zс}$  составляет сила  $P_{xyс}$ ;  $\varepsilon \approx 0,3 \dots 0,35$ .

Силы

$$P_{yс} = P_{xyс} \sin \varphi;$$

$$P_{xс} = P_{xyс} \cos \varphi. \quad (2.2.6)$$

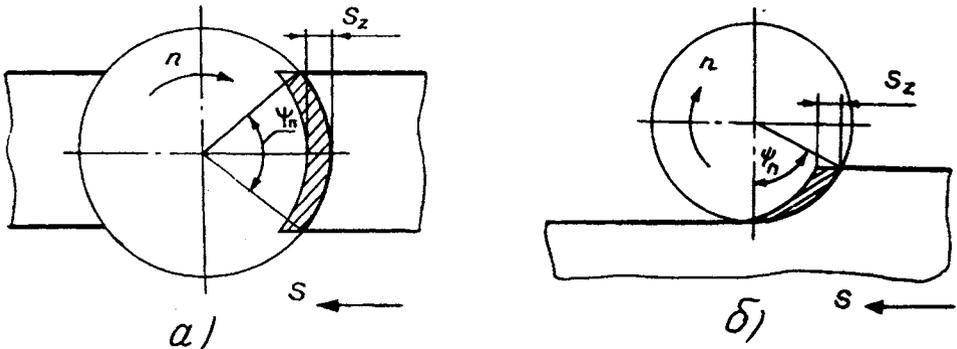


Рис. 2.2.5. Вид срезаемого слоя:  
а - при торцовом; б - при цилиндрическом фрезеровании

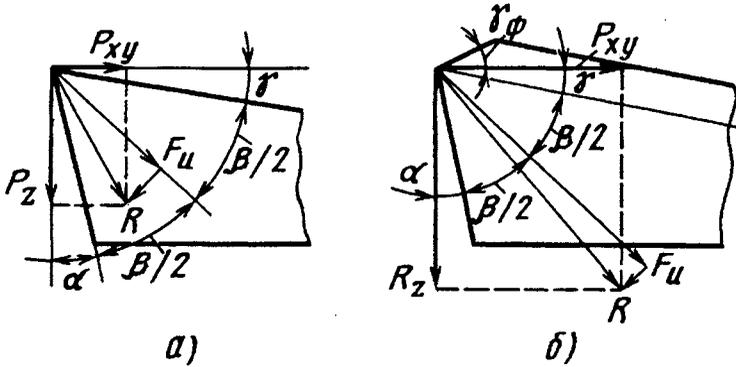


Рис. 2.2.6. Силы, действующие на зуб в главной секущей плоскости:

*a* - при отсутствии фаски на передней поверхности; *б* - при наличии отрицательной фаски на передней поверхности

**Мощность**, необходимая для привода главного движения при фрезеровании (кВт),

$$N = \frac{tBS_M}{61200} \quad (2.2.7)$$

Силы, действующие при резании, могут в определенных условиях вызывать сколы режущей кромки инструмента. При этом силой, приводящей к микросколам, является сила, действующая в направлении минимального сечения (перпендикулярно биссектрисе угла заострения  $\beta$ ). На рис. 2.2.6,*a* эта сила обозначена как  $F_{и}$ . Путем создания отрицательной фаски на передней поверхности за счет увеличения соотношения  $P_{xy}/P_z$  можно добиться уменьшения силы  $F_{и}$  (рис. 2.2.6, *б*). Многолетняя практика создания таких фасок, особенно при обработке высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, а также титана и его сплавов подтверждает эффективность такого способа снижения эффективности микросколов режущей кромки. Наилучший результат этот способ дает при черновом фрезеровании, когда фаска имеет размеры 0,3-0,4 мм и заточка под углом  $-30^\circ$ , а толщина срезаемого слоя приблизительно в 2 раза превышает размеры фаски.

Процесс фрезерования является прерывистым процессом, что в значительной степени влияет на интенсивность износа зуба фрезы. Существенным фактором, определяющим интенсивность износа, являются условия врезания и выхода фрезы из обрабатываемой заготовки.

При торцовом фрезеровании в условиях ударного нагружения величина превышения

сил в момент врезания по сравнению с установившемся резанием, связана с динамическими свойствами технологической системы, механическими характеристиками обрабатываемого материала и геометрическими характеристиками условий врезания режущего клина в обрабатываемый материал.

В зависимости от геометрии инструмента и положения фрезы относительно боковой поверхности заготовки, в которую врезается фреза, начальный контакт зуба фрезы с материалом заготовки может проходить по точкам  $S$ ,  $T$ ,  $U$  и  $V$ , по линиям  $ST$ ,  $SV$ ,  $TU$  и  $UV$ , а также по всей поверхности  $STUV$  (рис. 2.2.7).

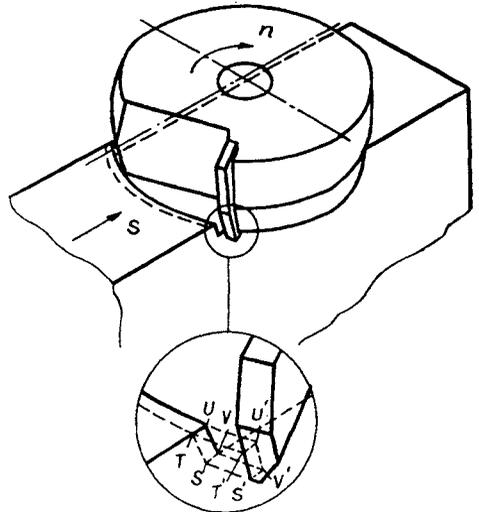


Рис. 2.2.7. Варианты начального контакта зуба фрезы с материалом обрабатываемого тела

С точки зрения темпа нарастания нагрузки условия врезания ухудшаются по перечисленному выше ряду вариантов врезания. С другой стороны, изменение условий врезания по перечисленному выше ряду приводит к уменьшению момента сопротивления изгибающим нагрузкам, что увеличит вероятность микро- и макросколов.

Конкретные рекомендации по выбору условий врезания зависят от ряда факторов и, прежде всего, от механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Движение по перечисленному выше ряду является предпочтительным при обработке высокопрочных обрабатываемых материалов инструментальными материалами, имеющими повышенную хрупкость. Движение по ряду в обратном направлении является предпочтительным при обработке материалов, имеющих пониженные механические свойства инструментальными материалами и характеризующимися повышенной прочностью.

Те или иные условия врезания можно обеспечить, меняя геометрию инструмента (передний угол в торцовой секущей плоскости  $\gamma_T$  и передний угол в осевой секущей плоскости  $\gamma_O$ ), а также расположение фрезы относительно обрабатываемой заготовки (угол  $\psi_H$ ). Кроме того, на условия врезания влияет угол между боковой поверхностью заготовки, в которую врезается фреза, и направлением подачи.

Величина ударной нагрузки при выходе определяется свойствами обрабатываемого материала, размерами площадки износа по задней поверхности, толщиной срезаемого слоя при выходе и углом  $\psi_B$  ( $\psi_B = 90 - \psi_K$ ) между боковой поверхностью заготовки и

вектором скорости резания в момент выхода (рис. 2.2.8). Два последних параметра зависят от положения фрезы относительно обрабатываемой заготовки, причем угол  $\psi_B$  однозначно определяется взаиморасположением фрезы и заготовки.

При определенных значениях угла  $\psi_B$  при выходе инструмента в обрабатываемом материале образуется опережающая трещина с последующим отрывом стружки (рис. 2.2.8). Значения величины  $\psi_B$ , при которых образуется опережающая трещина, главным образом зависит от свойств обрабатываемого материала и скорости резания. При этом резко снимается нагрузка на передней поверхности, что приводит к резкому возрастанию напряжения от сил, действующих на задней поверхности. Такое нагружение фактически является ударной нагрузкой.

Описанное выше ударное нагружение режущего клина при врезании и выходе фрезерного инструмента является причиной микросколов и выкрашиваний режущей кромки, а также образования через определенный период трещин на передней и задней поверхностях. Такие трещины расположены параллельно режущей кромке. Образование трещин, расположенных параллельно режущей кромке, может быть следствием пластического деформирования режущего клина.

Описанные выше явления характерны для фрезерования, так как в связи с малой длиной контакта имеют место высокие значения температуры и нормальных напряжений на участке передней поверхности, прилегающем к режущей кромке. Трещины в конечном счете ведут к сколу режущей кромки и выходу инструмента из строя.

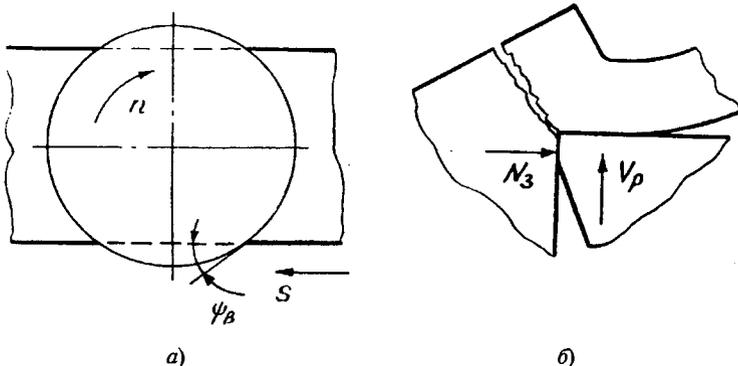


Рис. 2.2.8. Влияние относительного расположения фрезы и заготовки на характер выхода зуба фрезы: а - угол выхода зуба фрезы из обрабатываемой заготовки; б - характер нагружения режущего клина в момент выхода зуба фрезы

Скол режущей кромки может происходить и в результате нормального износа передней и задней поверхностей. При высоких скоростях резания, когда протекает интенсивное образование лунки, с ростом ее в направлении к режущей кромке через определенный период резания происходит скол по перемычке.

При цилиндрическом фрезеровании против подачи, когда взаимодействие между зубом фрезы и обрабатываемым телом начинается с нулевой толщины среза, имеет место скольжение зуба инструмента по обработанной поверхности. Сам же процесс резания начинается с того момента, когда толщина срезаемого слоя  $a_i$  становится соизмеримой с радиусом скругления режущей кромки  $\rho$ . В период скольжения зуба фрезы по поверхности, наклепанной в процессе врезания предыдущими зубьями, протекает интенсивный процесс трения и изнашивания задней поверхности инструмента. Поэтому износ по задней поверхности принимают обычно в качестве критерия износа зуба фрезы.

Периодические, происходящие с очень высокой скоростью, нагрев инструмента во время рабочего хода и охлаждение во время холостого, приводят к появлению термических напряжений, уровень которых при определенных условиях может превысить предел прочности режущего материала. В этом случае могут возникать так называемые гребенчатые трещины, расположенные перпендикулярно к режущей кромке. Такие трещины, совместно с другими негативными факторами, интен-

фицируют микро- и макросколы и снижают работоспособность инструмента.

Устанавливающиеся во время рабочего хода адгезионное взаимодействие обрабатываемого и инструментального материалов может вызвать налипание на передней поверхности контактной зоны части или всей стружки. Такое явление наиболее часто проявляется при обработке вязких материалов, например, сталей аустенитного класса. При врезании взаимодействие этих налипших объемов с контактными поверхностями и режущей кромкой может приводить к микро- и макросколам. Это явление в значительной степени может быть устранено путем уменьшения толщины среза на выходе инструмента (за счет смещения фрезы), а также установкой на боковой поверхности заготовки пластины из чугуна, что способствует устранению налипших объемов с режущей пластины.

Описанные выше особенности фрезерной обработки значительно снижают работоспособность инструмента (прежде всего твердосплавного). На рис. 2.2.9 приведены зависимости, позволяющие сравнить установившееся (прямая 1) и прерывистое резание (прямая 2), совершаемые в одинаковых условиях. По оси абсцисс отмечена длина пути резания  $L$ , в которую не входит длина пути холостого хода. Подтверждением решающей роли входа - выхода является прямая 3, положение которой свидетельствует о большой интенсивности износа при увеличении числа входов - выходов.

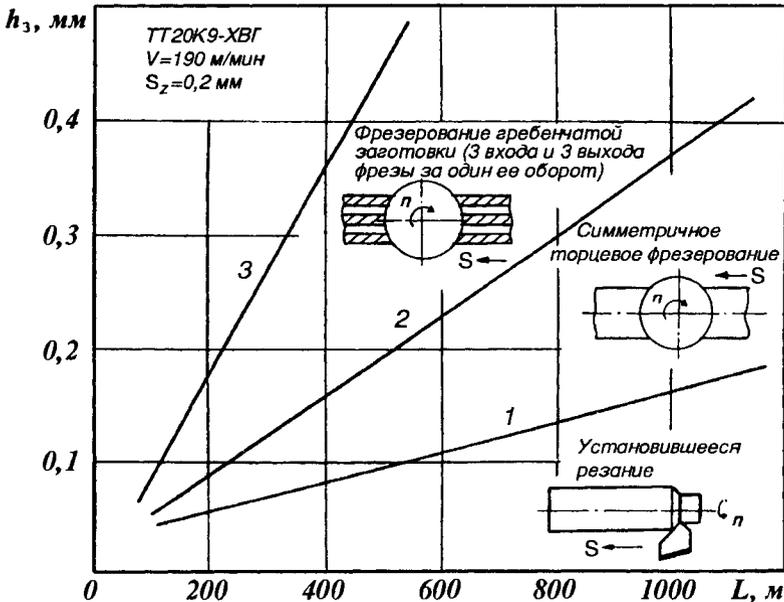


Рис. 2.2.9. Износ инструмента по задней поверхности в условиях установившегося резания (прямая 1) и прерывистого резания (прямые 2 и 3)



### 2.2.5. Области применения материалов режущей части фрез

Вид обработки	Материал режущей части инструмента	Номер группы обрабатываемости материала				
		1, 2	3, 4	5	6	7, 8
Фрезерование торцовой фрезой	Твердый сплав	T15K6, TT20K9, T5K10	T15K6, TT20K9, T5K10	TT20K9, BK10-OM, BK8, BK6	BK6-OM, BK10-OM	BK6-M, BK6, BK8
Фрезерование концевой фрезой	Твердый сплав	T15K6, TT20K9, T5K10	T15K6, TT20K9, T5K10	BK6-M, BK6, BK8, BK10-OM	BK6-OM, BK10-OM	BK6-M, BK6, BK8
	Быстрорежущая сталь	P18, P6M5K5, P6M5, P6M3	P18, P6M5K5, P6M5, P6M3	P18, P9M4K8, P9K5, P6M5K5, P6M5	Не обрабатывается	P6M5K5, P6M5, P6M3
Фрезерование дисковой фрезой	Твердый сплав	T15K6, TT20K9, T5K10	T15K6, TT20K9, T5K10	TT20K9, BK10-OM, BK8, BK6-M	BK6-OM, BK10-OM	BK6-M, BK6, BK8
	Быстрорежущая сталь	P18, P6M5K5, P6M5, P6M3	P18, P6M5K5, P6M5, P6M3	P18, P6M5K5, P6M5	Не обрабатывается	P6M5K5, P6M5, P6M3

## 2.2.6. Рекомендуются геометрические параметры фрез

Вид обработки	Материал режущей части	Номер группы обрабатываемости	Главный угол в плане $\varphi^\circ$	Передний радиальный угол $\gamma_T^\circ$	Передний осевой угол $\gamma_0^\circ$	Задний осевой угол $\alpha_0^\circ$	Задний радиальный угол $\alpha_T^\circ$	Угол наклона режущего лезвия $\omega^\circ$	Радиус при вершине резца $r$ , мм
Фрезерование торцовой фрезой	Твердый сплав	1, 2, 3, 4	45-90	-5-0	0-5	6-10	7-12	-	0,2; 0,4
		5	45-90	0-5	0-5	6-10	7-12	-	0,8; 1,2
		6	45-90	-5-10	0-5	6-10	7-12	-	0,8; 1,2
		7,8	45-90	5-10	0-5	6-10	7-12	-	0,8; 1,2
Фрезерование дисковой фрезой	Твердый сплав	1, 2, 3, 4	-	-5-5	0-5	6-10	10-15	5-10	0,2; 0,4
		5	-	0-10	0-5	6-10	7-10	5-10	0,8; 1,2
		6	-	-5-0	0-5	6-10	8-12	5-10	0,8; 1,2
		7, 8	-	5-10	0-5	6-10	10-15	5-10	0,8; 1,2
	Быстро-режущая сталь	1, 2, 3, 4	-	10-15	0-5	6-10	10-15	5-10	0,2; 0,4
		5	-	15-20	0-5	6-10	8-12	5-10	0,8; 1,2
		6	-	10-15	0-5	6-10	7-10	5-10	0,8; 1,2
		7, 8	-	15-20	0-5	6-10	15-20	5-10	0,8; 1,2
Фрезерование концевой фрезой	Твердый сплав	1, 2, 3, 4	88-90	0-5	0-5	6-10	12-7	25-35	0,2; 0,4
		5	88-90	0-5	0-5	6-10	10-15	25-35	0,8; 1,2
		6	88-90	-5-0	0-5	6-10	7-12	25-35	0,8; 1,2
		7, 8	88-90	5-10	0-5	6-10	10-15	25-35	0,8; 1,2
	Быстро-режущая сталь	1, 2, 3, 4	88-90	15-20	0-5	6-10	15-20	25-35	0,2; 0,4
		5	88-90	10-15	0-5	6-10	12-15	25-35	0,8; 1,2
		6	88-90	5-10	0-5	6-10	10-15	25-35	0,8; 1,2
		7, 8	88-90	10-15	0-5	6-10	15-20	25-35	0,8; 1,2

Так как фреза имеет два передних угла - радиальный и осевой, возможны следующие сочетания:

1) радиальный и осевой углы отрицательны. Это дает возможность применять пластины без заднего угла и использовать все режущие кромки. При этом режущая кромка имеет максимальную прочность и минимальные выкрашивания. Эта геометрия целесообразна при обработке материалов высокой твердости 2-4 групп. Однако при образовании сливных стружек и большой длине рабочего хода возникает проблема с их отводом;

2) радиальный и осевой углы положительны. В этом случае силы резания минимальны и упрощен отвод стружки; целесообразно использовать для заготовок и станков малой жесткости для обработки вязких материалов (1-5 группы);

3) осевой угол положительный, а радиальный - отрицательный. Такая геометрия имеет ряд преимуществ для черного фрезерования.

Величина передних углов вместе с положением фрезы относительно обрабатываемой заготовки определяют характер врезания. Следует исключить наиболее неблагоприятный вариант, когда первоначальный контакт происходит на вершине режущей пластины.

Задние углы - главный и вспомогательный, как и при точении, должны иметь большие значения при обработке более вязких материалов более прочным инструментом.

При фрезеровании концевой, цилиндрической и дисковой фрезой важное значение имеет угол наклона режущей кромки  $\omega$ . Этот угол, обеспечивая постепенное врезание и снижая ударную нагрузку, создает более спокойные условия работы. Однако при фрезеровании концевой фрезой чрезмерное увеличение этого угла ведет к возрастанию осевой составляющей силы резания, которая стремится вытащить фрезу из патрона. При дисковом фрезеровании оптимальная величина этого угла связана с глубиной и шириной фрезеруемого паза, так как существует опасность забивания стружкой пространства между фрезой и заготовкой.

Величину радиуса при вершине назначают из тех же условий, что и при точении; чем больше радиус, тем ниже параметры шероховатости обработанной поверхности.

Подача на зуб при торцовом фрезеровании определяется из следующих соображений: полное использование мощности станка; обеспечение прочности режущей пластины; требуемых параметров шероховатости поверхности:

$$S_z = \frac{1,34 \cdot 10^5 \cdot N_{эл} D_{ф}}{t v_{п} z K_s}, \quad (2.2.8)$$

где  $N_{эл}$  - мощность электродвигателя главного движения, кВт;  $D_{ф}$  - диаметр фрезы, мм (табл. 2.2.7);  $v_{п}$  - скорость резания, назначенная предварительно, м/мин; для групп обрабатываемости 1, 2, 3, 7 и 8  $v_{п} = 200$  м/мин; для групп обрабатываемости 4, 5, 6  $v_{п} = 120$  м/мин;  $K_s$  - удельная сила резания при фрезеровании, Па (табл. 2.2.3).

Подача с учетом прочности твердосплавной пластины

$$S_z = \frac{0,15 \sigma_B H^2}{t K_s}, \quad (2.2.9)$$

где  $\sigma_B$  - временное сопротивление твердого сплава при изгибе, Н/мм<sup>2</sup>.

Подача с учетом параметров шероховатости поверхности

$$S_z = \frac{0,016}{z} \sqrt{Rz D_{ф}}, \quad (2.2.10)$$

где  $Rz$  - параметр шероховатости поверхности, мкм.

В качестве рабочей выбирается минимальная подача, рассчитанная по формулам (2.2.8)-(2.2.10).

Подача на зуб для фрезерования концевой фрезой определяется прочностью фрезы и требуемыми параметрами шероховатости поверхности.

### 2.2.7. Рекомендуемый диаметр торцовых фрез

Ширина фрезерования $B$ , мм	Диаметр фрезы $D_{ф}$ , мм	
	рекомендуемый	допустимый
До 40	50; 63	40; 80
40-60	80; 100	63; 125
60-80	100; 125	80; 160
80-100	125; 160	100; 200
100-140	160; 200	125; 250
140-160	200; 250	160
160-200	250	200

Подача с учетом прочности фрезы:

$$S_z = S_{zT} D_{\phi}^x (t \times B)^y k_1 k_2 k_3 k_4, \quad (2.2.11)$$

где  $S_{zT}$  - табличный коэффициент (табл. 2.2.8);  $x$ ,  $y$  - показатели степени (табл. 2.2.8);  $t$  - глубина фрезерования, мм (табл. 2.2.9);  $B$  - ширина фрезерования, мм (табл. 2.2.9);  $k_1$  - коэффициент, учитывающий форму обрабатываемой поверхности (табл. 2.2.10);  $k_2$  - коэффициент, учитывающий число зубьев фрезы (табл. 2.2.11);  $k_3$  - коэффициент, учитывающий вылет фрезы (табл. 2.2.12);  $k_4$  - коэффициент вида инструментального материала; для твердого сплава  $k_4 = 0,8$ ; для быстрорежущей стали  $k_4 = 1,0$ .

### 2.2.8. Коэффициенты для расчета подачи

Группа обрабатываемости	$S_{zT}$	$x$	$y$
1	0,0100	1,25	-0,47
2	0,0078	1,25	-0,47
3	0,0062	1,25	-0,47
4	0,0055	1,25	-0,47
5	0,0060	1,15	-0,40
6	0,0040	1,25	-0,47
7	0,011	1,2	-0,45
8	0,011	1,2	-0,45

### 2.2.9. Предельные значения $t \times B$ , мм

Диаметр фрезы $D_{\phi}$ , мм	Материал и группа обрабатываемого материала		
	1, 2, 3, 4, 5, 6	7, 8	
	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Быстрорежущая сталь
3	5	-	5
4	10	-	10
5	15	-	20
6	35	-	45
8	65	40	100
10	80	50	115
12	100	65	140
16	140	100	200
20	200	140	300
25	300	200	400
32	400	300	600
32-63	600	400	1000

### 2.2.10. Значения коэффициента $k_1$

Форма обрабатываемой поверхности	$k_1$		
	Плоскость	Уступ	Паз
$k_1$	1,1	1,0	0,8

### 2.2.11. Значения коэффициента $k_2$

Число зубьев фрезы	$k_2$					
	2	3	4	5	6	8
$k_2$	1,8	1,4	1,15	1,0	0,9	0,75

2.2.12. Значения коэффициента  $k_3$ 

Отношение вылета фрезы к ее диаметру ( $L_\phi / D_\phi$ )		2	3	4	5	6
$k_3$	$D_\phi \leq 8$ мм	1,25	1,0	0,85	0,75	0,7
	$D_\phi > 8$ мм	1,0	1,0	0,9	0,85	0,8

Подачу с учетом параметров шероховатости поверхности определяют по формуле (2.2.10). В качестве рабочей выбирают минимальную подачу, рассчитанную по формулам (2.2.10) и (2.2.11). Подача  $S_z$  должна быть не менее 0,02 мм для быстрорежущей стали и не менее 0,03 мм для твердого сплава при диаметре фрезы более 8 мм. При диаметре менее 8 мм подача  $S_z$  должна быть не менее 0,01 мм.

При обработке криволинейных поверхностей подачу следует уменьшить на 20...30 %.

При выборе диаметра фрезы следует соблюдать условие  $D_\phi \geq 1,2 \cdot B$ . В любом случае диаметр необходимо выбирать максимально возможным.

Для дисковых фрез подачу определяют для твердосплавного и быстрорежущего инструментальных материалов по различным формулам.

Подача для твердосплавных фрез:

$$S_z = 2,9 \cdot 10^5 (\text{НВ})^{-2,6} r^{-0,43} k_5 k_6, \quad (2.2.12)$$

где НВ - твердость материала по Бринеллю;  $k_5$  - коэффициент, учитывающий отношение вылета оправки  $L_0$  к ее диаметру  $D_0$  (табл. 2.2.13);  $k_6$  - коэффициент, учитывающий форму обрабатываемой поверхности. При обработке плоскостей и уступов  $k_6 = 1,35$ ; пазов  $k_6 = 1,0$ .

Подача для дисковой фрезы из быстрорежущей стали

$$S_z = S_{zT} B^{-0,21} (r / D_\phi)^{-0,53} k_5 k_6 k_7 k_8, \quad (2.2.13)$$

где  $S_{zT}$  - табличный коэффициент (табл. 2.2.14);  $D_\phi$  - диаметр фрезы, мм (табл. 2.2.15-2.2.17);  $k_7$  - коэффициент, учитывающий диаметр фрезы (табл. 2.2.18);  $k_8$  - коэффициент, учитывающий число зубьев фрезы (табл. 2.2.19).

2.2.13. Значение коэффициента  $k_5$ 

Отношение вылета оправки к ее диаметру ( $L_0 / D_0$ )	До 3	4	5	7
$k_5$	1,0	0,8	0,65	0,5

2.2.14. Значения  $S_{zT}$ 

Группа обрабатываемости	1	2	3	4	5	6	7	8
$S_{zT}$	0,056	0,051	0,040	0,033	0,045	0,025	0,051	-

### 2.2.15. Рекомендуемые значения диаметра для трехсторонних быстрорежущих фрез со вставными ножами

Ширина фрезерования $B$ , мм	$D_{\phi}$ , мм, при глубине фрезерования $t$ , мм						
	5	8	15	20	30	45	60
10	50	63	80	100	125	180	200
16	-	63	80	100	125	180	200
25	-	-	80	100	125	180	200
28	-	-	-	100	125	180	200
32	-	-	-	-	125	180	200
36	-	-	-	-	160	180	200
40	-	-	-	-	160	180	200

### 2.2.16. Рекомендуемые значения диаметра для трехсторонних твердосплавных фрез со вставными ножами

Ширина фрезерования $B$ , мм	$D_{\phi}$ , мм, при глубине фрезерования $t$ , мм						
	5	10	15	20	25	30	35
14-22	100	100	100	100	-	-	-
12-25	125	125	125	125	125	125	125
14-36	160	160	160	160	160	160	160
12-32	-	180	180	180	180	180	180
12-40	-	200	200	200	200	200	200
14-36	-	-	-	224	224, 250	224, 250	224, 250
14-40	-	-	-	315	315	315	315

### 2.2.17. Рекомендуемые значения диаметра для двухсторонних твердосплавных фрез со вставными ножами

Ширина фрезерования $B$ , мм	$D_{\phi}$ , мм, при глубине фрезерования $t$ , мм						
	5	10	20	30	50	75	100
15	100	100; 125	100; 125	125	-	-	-
18	-	125	125; 160	125; 160	-	-	-
20	-	-	160; 180; 200	160; 180; 200	200	-	-
22	-	-	-	200; 224; 250	200; 224; 250	224; 250	-
25	-	-	-	-	250; 315	250; 315	315
30	-	-	-	-	-	315	315

Рассчитанная подача  $S_z$  не должна превышать 0,12 мм.

2.2.18. Значения коэффициента  $k_7$ 

Диаметр фрезы $D_f$ , мм	50	80	100	125	160	200	250
$k_7$	0,75	0,9	1,0	1,6	1,85	2,0	2,3

2.2.19. Значения коэффициента  $k_8$ 

Число зубьев фрезы $z$	10	12	14	16	18	20	22	24	25
$k_8$	1,4	1,3	1,15	1,1	1,0	0,95	0,85	0,8	0,75

## 2.2.20. Коэффициенты для расчета скорости резания

Группа обрабаты- ваемости	Рекомендованные марки твердых сплавов	Коэффициенты			
		$v_T$	$x$	$y$	$z$
1	T15K6	500	-0,15	-0,14	-0,30
	TT20K9	470	-0,15	-0,14	-0,30
	T5K10	450	-0,17	-0,42	-0,19
2	T15K6	470	-0,15	-0,16	-0,35
	TT20K9	440	-0,15	-0,16	-0,35
	T5K10	420	-0,19	-0,32	-0,29
3	T15K6	440	-0,15	-0,16	-0,35
	TT20K9	410	-0,15	-0,16	-0,35
	T5K10	395	-0,19	-0,32	-0,29
4	T15K6	380	-0,16	-0,17	-0,37
	TT20K9	350	-0,16	-0,17	-0,37
	T5K10	330	-0,21	-0,39	-0,32
5	TT20K9	300	-0,15	-0,12	-0,34
	BK8	275	-0,15	-0,23	-0,29
	BK10-OM	250	-0,15	-0,23	-0,29
6	BK6-M	210	-0,23	-0,39	-0,32
	BK8	170	-0,23	-0,39	-0,32
7	BK8	560	-0,34	-0,10	-0,20
	BK6	670	-0,34	-0,10	-0,20
	BK6-M	670	-0,34	-0,10	-0,20
8	BK8	560	-0,34	-0,10	-0,20
	BK6	670	-0,34	-0,10	-0,20
	BK6-M	670	-0,34	-0,10	-0,20

2.2.21. Рекомендуемый  $T$  период стойкости фрез

Фрезы	Период стойкости в зависимости от времени простоя станка, связанного с заменой фрезы, мин	
	До 5	Св. 5
Торцовые, дисковые двух- и трехсторонние	45	110
Концевые	30	45
Дисковые, прорезные, пазовые, фасонные	30	75

Скорость резания при торцовом фрезеровании

$$v = v_T S_z^x t^y T^z k_g, \quad (2.2.14)$$

где  $v_T$  - табличный коэффициент (табл. 2.2.20);  $x$ ,  $y$  - показатели степени (табл. 2.2.20);  $T$  - стойкость фрезы, мин (табл. 2.2.21);  $k_g$  - коэффициент, учитывающий состояние обрабатываемой поверхности: без корки  $k_g=1,0$ , по корке  $k_g=0,8$ .

Скорость резания с учетом мощности привода

$$v = \frac{1,34 \cdot 10^5 N_{эл} D_\Phi}{t B S_z z k_s}. \quad (2.2.15)$$

В качестве окончательной выбирается минимальная скорость резания, рассчитанная по формулам (2.2.14) и (2.2.15).

Частота вращения шпинделя станка ( $\text{мин}^{-1}$ )

$$n = \frac{1000v}{\pi D_\Phi}. \quad (2.2.16)$$

Скорость подачи (минутная подача, мм)

$$S_M = S_z n z. \quad (2.2.17)$$

Скорость резания при обработке концевой фрезой

$$v = v_T S_z^x \left( t / D_\Phi \right)^y T^z k_1 k_9 k_{10} k_{11} k_{12}, \quad (2.2.18)$$

где  $v_T$  - табличный коэффициент (табл. 2.2.22);  $x$ ,  $y$ ,  $z$  - показатели степени (табл. 2.2.22);  $k_{10}$  - коэффициент, учитывающий наличие или отсутствие охлаждения: при охлаждении  $k_{10}=1,0$ ; без охлаждения  $k_{10}=0,8$ ;  $k_{11}$  - коэффициент, учитывающий число зубьев фрезы (табл. 2.2.23);  $k_{12}$  - коэффициент, учитывающий диаметр фрезы (табл. 2.2.24).

## 2.2.22. Коэффициенты для расчета скорости резания

Группа обрабатываемости	Быстрорежущие фрезы				Твердосплавные фрезы			
	$v_T$	$x$	$y$	$z$	$v_T$	$x$	$y$	$z$
1	75,8	-0,23	-0,39	-0,41	500	-0,31	-0,25	-0,41
2	58,3	-0,23	-0,39	-0,41	350	-0,31	-0,25	-0,41
3	46,8	-0,23	-0,39	-0,41	200	-0,31	-0,25	-0,41
4	32,1	-0,23	-0,39	-0,41	150	-0,31	-0,25	-0,41
5	40,8	-0,23	-0,39	-0,41	105	-0,31	-0,25	-0,41
6	-	-	-	-	46,3	-0,4	-0,25	-0,5
7	147	-0,20	-0,46	-0,36	800	-0,3	-0,25	-0,5
8	147	-0,20	-0,46	-0,36	800	-0,3	-0,25	-0,5

2.2.23. Значения коэффициента  $k_{11}$ 

Число зубьев фрезы $z$	2-4	5,6	8
$k_{11}$	1,0	0,95	0,9

2.2.24. Значения коэффициента  $k_{12}$ 

Диаметр фрезы $D_f$ , мм	10-12	16-40	50-63
$k_{12}$	0,9	1,0	1,1

## 2.2.25. Коэффициенты для расчета скорости резания

Группа обрабатываемости	Быстрорежущие фрезы				Твердосплавные фрезы			
	$v_T$	$x$	$y$	$z$	$v_T$	$x$	$y$	$z$
1	24,4	-0,34	-0,31	-0,2	145,9	-0,37	-0,3	-0,34
2	18,8	-0,34	-0,31	-0,2	121,6	-0,37	-0,3	-0,34
3	16,9	-0,34	-0,31	-0,2	109,4	-0,37	-0,3	-0,34
4	11,3	-0,34	-0,31	-0,2	87,6	-0,37	-0,3	-0,34
5	15,7	-0,34	-0,31	-0,2	97,1	-0,37	-0,3	-0,34
6	-	-	-	-	62,1	-0,37	-0,3	-0,34
7	69,4	-0,34	-0,31	-0,2	422,6	-0,37	-0,3	-0,34
8	69,4	-0,34	-0,31	-0,2	422,6	-0,37	-0,3	-0,34

2.2.26. Значения коэффициента  $k_{13}$ 

Ширина фрезерования $B$ , мм	2,0	10	20	30	40
$k_{13}$	1,25	1,1	1,0	0,95	0,9

2.2.27. Значения коэффициента  $k_{14}$ 

Диаметр фрезы $D_f$ , мм	50-80	100-160	160-200	200-315
$k_{14}$	0,95	1,0	0,95	0,9

2.2.28. Значения коэффициента  $k_{15}$ 

Марка инструментального материала	P18, P6M3, P6M5, P6M5K5, T5K10	ТТ20К9	Т15К6	ВК6-М, ВК6, ВК8, ВК10-ОМ
$k_{15}$	1,0	1,3	1,5	0,8

Скорость резания при дисковом фрезеровании

$$v = v_T S_z^x (t / D_f)^y T^z k_1 k_5 k_{10} k_{13} k_{14} k_{15}, \quad (2.2.19)$$

где  $v_T$  - табличный коэффициент (табл. 2.2.25);  $x, y, z$  - показатели степени (табл. 2.2.25);  $k_{13}$  - коэффициент, учитывающий ширину фрезерования (табл. 2.2.26);  $k_{14}$  - коэффициент, учитывающий диаметр фрезы (табл. 2.2.27);  $k_{15}$  - коэффициент, учитывающий марку инструментального материала (табл. 2.2.28).

## 2.2.3. СВЕРЛЕНИЕ

Сверление, рассверливание, зенкерование и развертывание предназначены для образования и обработки цилиндрических отверстий различной степени точности и разных параметров шероховатости обработанных поверхностей. Зенкерование и развертывание используют также для обработки конических поверхностей.

*Сверление* - основной метод получения отверстий в сплошном материале. Сверлением можно получать сквозные и глухие отверстия, а также обрабатывать предварительно образованные отверстия. Сверление и рассверливание обеспечивают достижение точности в пределах 9-13 квалитета допуска размера и параметр шероховатости поверхности  $R_a$  в пределах 2,5...8 мкм (табл. 2.2.29).

Просверленные отверстия имеют отклонения от правильной цилиндрической формы: в поперечном сечении имеют форму овала, а в продольном - небольшую конусность. При сверлении отверстие получается большего диаметра, чем диаметр сверла вследствие «разбивки» отверстия. «Разбивка» отверстия происходит из-за неточности изготовления сверл и радиального биения шпинделей сверлильных станков.

### 2.2.29. Точность и качество поверхности обработки сверлением и рассверливанием (Ra=2,5...8 мкм; глубина дефектного поверхностного слоя 70-15 мкм)

Квалитет допуска размера	Технологические допуски на размер при номинальных диаметрах отверстий, мм					
	Св. 3 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80
13	-	-	270	330	390	460
12	-	-	180	210	250	300
11	75	90	110	130	160	190
10	48	58	70	84	100	120
9	30	36	43	52	62	74

Способ воздействия на обрабатываемый материал - механический, путем пластической деформации металла и его последующего разрушения с образованием стружки. Процесс сверления осуществляется в условиях косоугольного несвободного резания одной или двумя режущими кромками.

Процесс резания при сверлении осуществляется в более сложных условиях, чем при лезвийной обработке наружных цилиндрических поверхностей. Это объясняется тем, что образование отверстия осуществляется путем вырезания и удаления стружки из сплошного материала. Вследствие этого процесс резания при сверлении сопровождается следующими явлениями:

а) срезание стружки, ее формирование и удаление осуществляется в закрытом пространстве;

б) вывод стружки из отверстия происходит путем создания пространства между стенками образуемого отверстия и поверхностью рабочей части сверла;

в) при отводе стружки по канавкам сверла, (как правило, в сторону хвостовика) она дополнительно деформируется и происходит трение ее о поверхности канавок и отверстия;

г) в результате деформации и трения имеет место большое тепловыделение;

д) кинематический задний угол уменьшается, а при сверлении с большими подачами и малом диаметре весьма существенно, что может привести к касанию образованной поверхности отверстия о заднюю поверхность сверла при одноплоскостной ее форме.

С целью устранения указанного отрицательного явления используют следующие мероприятия: увеличивают задний угол; уменьшают длину задней поверхности; придают задней поверхности форму, в поперечном сечении которой образуется ломаная или кривая линии.

Кинематическая схема обработки состоит из формообразующих движений, воспроизводящих механизм геометрического образова-

ния цилиндрической поверхности, которая в данном случае определяется двумя структурными элементами - окружностью и прямой линией. Вследствие этого необходимы два движения: вращательное, траектория которого воспроизводит окружность, и прямолинейное, поступательное, воспроизводящее прямую линию. На рис. 2.2.10 приведены принципиальные кинематические схемы обработки на станках с вертикальной, горизонтальной и наклонной осью шпинделя. Вращательное движение всегда выполняется с большой скоростью и является главным движением резания. Поступательное прямолинейное движение осуществляется с небольшой скоростью и служит движением подачи. Главное движение и движение подачи могут осуществляться инструментом и заготовкой.

Чаще всего и главное движение, и движение подачи выполняется инструментом. Однако, когда требуется обеспечить более высокую точность положения оси отверстия, вращательное движение сообщается заготовке.

Вращательное движение характеризуется скоростью резания, которая при известной частоте вращения детали или инструмента в минуту определяется по выражению

$$v = \frac{\pi D n}{1000}$$

Скорость поступательного движения характеризуется минутной подачей  $S_M$ . Кроме минутной подачи различают подачу на оборот:  $S_O = S_M / n$ , и подачу на зуб инструмента:  $S_z = S_O / z$ , где  $z=2$ . Траекторией относительного движения любой точки рабочей части инструмента является винтовая линия с параметром  $S / (2\pi)$ , а поверхностью резания - конвольютная винтовая поверхность.

Площадь (мм<sup>2</sup>) среза при сверлении (рис. 2.2.11)

$$F = tS = \frac{D}{2} S$$

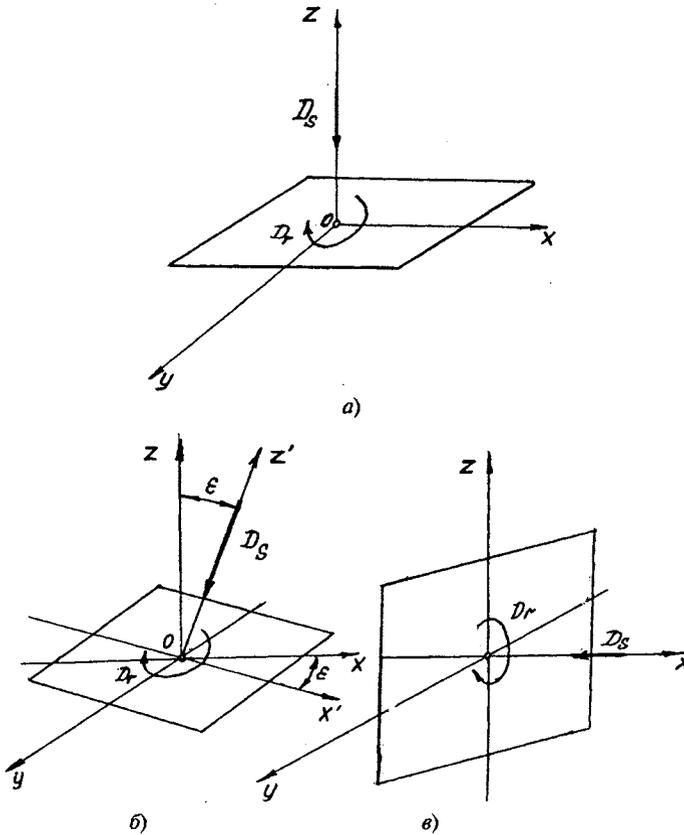


Рис. 2.2.10. Кинематическая схема при сверлении, зенковании и развертывании:  
 а - с вертикальной осью шпинделя; б - с наклонной осью шпинделя;  
 в - с горизонтальной осью шпинделя

При этом за глубину резания  $t$  принимают половину диаметра сверла. Размеры срезаемого слоя - толщину  $a$  и ширину  $b$ , на основании рис. 2.2.11 можно определить следующим образом:

$$a = \frac{S}{2} \sin \varphi; \quad b = \frac{D - l_{\text{п}}}{2 \sin \varphi},$$

где  $\varphi$  - половина двойного угла в плане  $2\varphi$ ;  
 $l_{\text{п}}$  - ширина перемычки сверла.

Существуют несколько вариантов инструмента для сверления. На рис. 2.2.12 показаны две разновидности инструмента - лопаточное и однокромочное сверла. Лопаточное сверло имеет недостаточную жесткость, а основными недостатками однокромочного сверла являются ограниченность пространства для размещения стружки и необходимость применения направляющих втулок. Наибольшее распространение получили винтовые сверла (рис. 2.2.13). Их рабочая часть состоит из двух

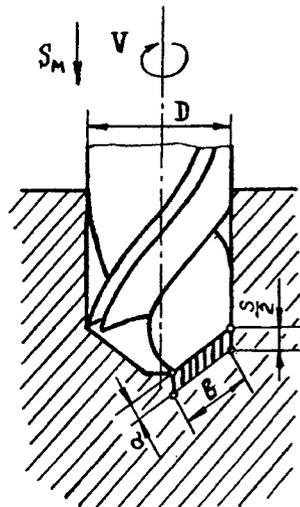


Рис. 2.2.11. Размеры срезаемого слоя при сверлении

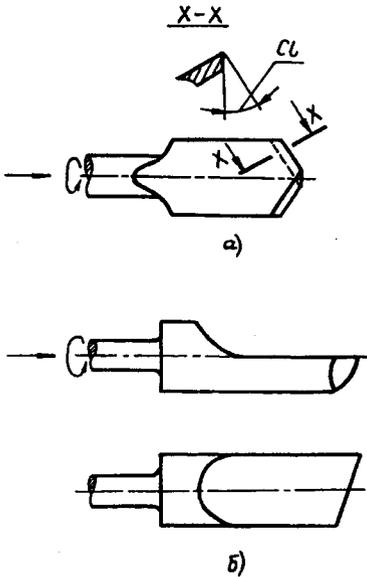


Рис. 2.2.12. Лопаточное плоское (а) и однокромочное (б) сверла

основных частей: режущей и направляющей. Режущую часть составляют режущие кромки сверла. Направляющая часть сверла состоит из двух направляющих фасок, центрирующих сверло в обрабатываемом отверстии, и двух винтовых стружечных канавок для свободного удаления стружки из зоны обработки.

Главные режущие кромки винтового сверла перекрещиваются между собой под углом  $2\varphi$ , который называется двойным углом в плане. Двойной угол в плане образуется проекциями главных режущих кромок на плоскость, проходящую через ось сверла, параллельно его главным режущим кромкам. Угол  $2\varphi$  зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и колеблется в пределах  $90...140^\circ$ . У стандартных сверл величина двойного угла в плане равна  $120^\circ$ .

Для исключения возможности защемления сверла в отверстии направляющую часть выполняют с обратной конусностью, составляющей  $0,04...0,1$  мм на 100 мм длины сверла. Вследствие этого, вспомогательные режущие кромки образуют с плоскостью, параллельной оси сверла, вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$ :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{D - D_1}{2L},$$

где  $D$  и  $D_1$  - диаметры сверла в начале и в конце направляющей части;  $L$  - длина направляющей части. Величина угла обычно не превышает  $10^\circ$ .

Угол  $\psi$  называется углом наклона перемычки и образуется проекциями главной режущей кромки и перемычки на плоскость, перпендикулярную оси сверла. Величина данного угла колеблется в пределах  $50...55^\circ$ .

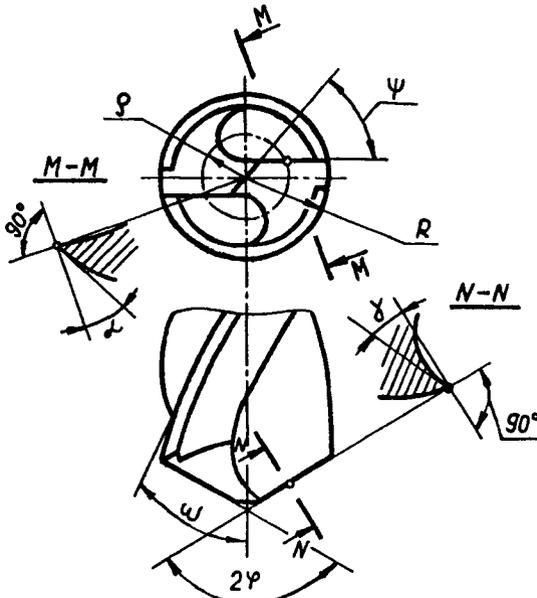


Рис. 2.2.13. Геометрические параметры винтового сверла

Угол  $\omega$ , образованный касательной к винтовой линии канавки сверла и его осью, называется углом наклона винтовой канавки. Для различных обрабатываемых материалов в зависимости от физико-механических свойств угол  $\omega$  колеблется в диапазоне 15...45°. Меньшее значение угла принимают при высокой твердости обрабатываемого материала. Этот угол переменный по длине сверла: по мере приближения к перемычке величина угла монотонно уменьшается.

Передний угол сверла  $\gamma$  измеряется в плоскости, нормальной к главной режущей кромке. Передним углом сверла называют угол, образованный плоскостью, касательной к передней поверхности, и плоскостью, проходящей через главную режущую кромку параллельно оси сверла. На чертежах сверл величину переднего угла не проставляют, так как форму и положение передней поверхности определяют шаг  $H$  и угол наклона винтовой канавки.

Угол  $\alpha$  называется задним углом сверла, и, в отличие от резцов, его задают не в нормальной плоскости  $NN$ , а в плоскости  $MM$ , касательной к образующей цилиндра, проходящего через заданную точку главной режущей кромки. Учитывая это, задним углом называют угол между плоскостью, касательной к задней поверхности, и плоскостью, перпендикулярной оси сверла. При заточке сверла по конической поверхности методом Уошборна задний угол в различных точках главной режущей кромки переменный. В отличие от переднего угла по мере приближения к перемычке задний угол увеличивается; задний угол на чертеже сверла задают в периферийной точке главной режущей кромки, так как в этой точке он легко измеряется. Для сверл диаметром до 15 мм в периферийной точке  $\alpha = 11...14^\circ$ , а для сверл диаметром 15...80 мм  $\alpha = 8...11^\circ$ .

Отличие кинематических углов  $\gamma_k$ ,  $\alpha_k$  и  $\lambda_k$  сверла от углов заточки  $\gamma$ ,  $\alpha$  и  $\lambda$  обусловлено не только сложным относительным движением инструмента, но и тем, что точки главной режущей кромки расположены на расстоянии  $r_0$  выше осевой плоскости, параллельной главной режущей кромки. Причем, из-за значительной протяженности главной режущей кромки и переменности вдоль нее углов заточки, кинематические углы сверла  $\gamma_k$  и  $\alpha_k$  в крайних точках режущей кромки отличаются соответственно друг от друга на значительную величину. Эпюры изменения рабочих переднего и заднего углов сверла вдоль главной режущей кромки пока-

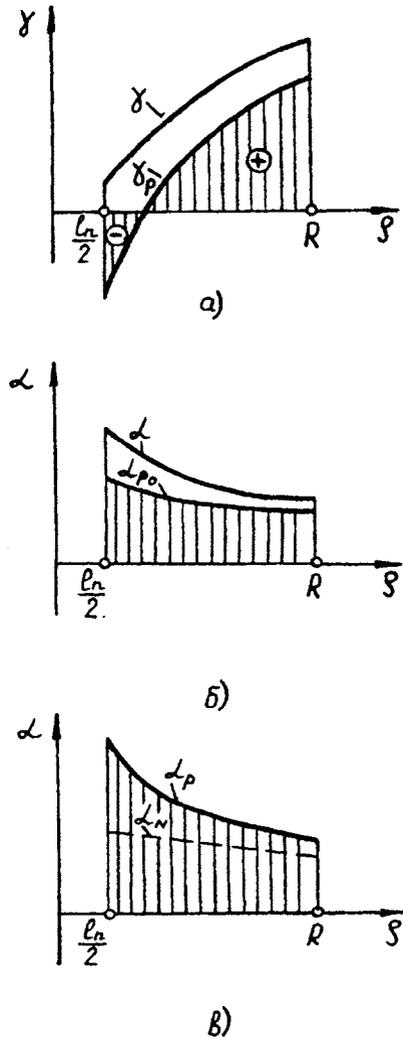


Рис. 2.2.14. Эпюры изменения рабочих углов сверла вдоль главной режущей кромки: а - переднего  $\gamma$ ; б и в - заднего  $\alpha$

заны на рис. 2.2.14. Различные точки главной режущей кромки работают в различных условиях; при этом по мере приближения к перемычке условия резания ухудшаются.

Инструмент при сверлении испытывает значительные динамические нагрузки, вызываемые силами резания в результате значительных деформаций обрабатываемого материала при стружкообразовании, а также трения между стружкой, сверлом и стенками отверстия. Силы резания, приложенные к главным режущим кромкам сверла, можно разложить на три взаимно перпендикулярные составляющие, действующие в важных с точ-

ки зрения эксплуатации направлениях (рис. 2.2.15):

- 1) вдоль оси сверла - осевые силы  $P_x$ ;
- 2) касательные к окружности сверла в направлении скорости резания - касательные силы  $P_z$ ;
- 3) по радиусу сверла - радиальные силы  $P_y$ .

Сила резания, которая действует на перемычке, также может быть разложена на три составляющие. Однако, кроме составляющей  $P_{xп}$  они на силовые характеристики при сверлении влияния не оказывают. Вспомогательные режущие кромки в срезании стружки участия практически не принимают, но из-за равенства вспомогательного заднего угла на фасках нулю между ними и стенками отверстия возникает трение. Касательная составляющая силы, учитывающая трение, обозначается  $P_{zф}$ . Сумму проекций действующих сил на ось  $X$ , совпадающую с осью сверла,

$\sum X = 2P_x + 2P_{xп} = P_o$  - называют осевой силой при сверлении. Данная сила противодействует движению подачи и при больших вылетах сверла вызывает его изгиб. По величине осевой силы рассчитывают на прочность механизм подачи сверлильного станка. Моментом вращения при сверлении называют сумму моментов сил, действующих относительно оси  $X$ :  $\sum M_x = 2P_{zф}R + 2P_z \frac{R}{2} = M$ .

Крутящий момент, развиваемый станком для осуществления процесса сверления, должен быть больше момента вращения  $M_{ст} > M$ .

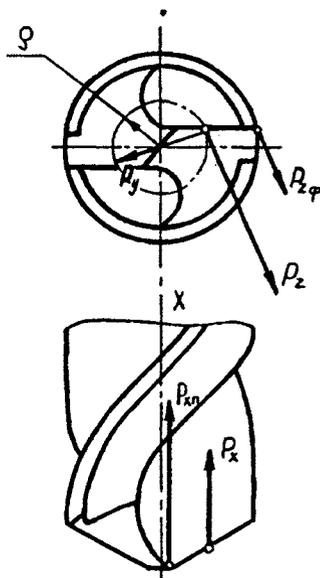


Рис. 2.2.15. Силы, действующие на режущие кромки винтового сверла

Осевая сила может быть определена по следующей эмпирической формуле:

$$P_o = C_p D^{n_p} t^{x_p} S^{y_p} H B^{z_p}.$$

Подобная формула используется и для определения момента вращения

$$M_B = C_M D^{n_M} t^{x_M} S^{y_M} H B^{z_M}.$$

В табл. 2.2.30 и 2.2.31 приведены значения коэффициентов и показателей степеней.

### 2.2.30. Значения коэффициентов $C_p$ и $C_M$

Обрабатываемый материал	Вид обработки	$C_p$	$C_M$
Стали, 155...265 НВ	Сверление	1,5	0,8
	Рассверливание	0,62	1,83
Стали, 265...340 НВ	Сверление	1,8	0,96
	Рассверливание	0,74	2,2
Чугуны, 140...240 НВ	Сверление	2,6	1,0
	Рассверливание	0,92	3,16

### 2.2.31. Значения показателей степени в уравнениях

Обрабатываемый материал	Вид обработки	$n_p$	$x_p$	$y_p$	$z_p$	$n_M$	$x_M$	$y_M$	$z_M$
Сталь	Сверление	1,0	0	0,7	0,75	2	0	0,8	0,7
	Рассверливание	0	1,3	0,7	0,75	1	0,9	0,8	0,7
Чугун	Сверление	1	0	0,8	0,6	1,9	0	0,8	0,6
	Рассверливание	0	1,2	0,4	0,6	1,0	0,75	0,8	0,6

Эффективную мощность станка определяют по крутящему моменту резания:  $N_э = Mn / 974$ .

По величине момента врезания рассчитывают на прочность и жесткость детали механизма главного движения станка и шпиндель. Так как под действием этого момента происходит скручивание сверла, его величина учитывается и при расчете инструмента на прочность.

Направляемые навстречу друг другу и действующие на обоих главных режущих кромках сверла силы  $P_y$  должны уравновесиваться. Однако, из-за разности длин главных режущих кромок и неодинаковой величины углов в плане, возникающих при заточке сверла, силы  $P_y$  становятся неравными. В результате этого появляется сила  $\Delta P_y$ , направленная в сторону большей силы  $P_y$  и вызывающая "разбивание" отверстия (увеличение диаметра отверстия по сравнению с диаметром сверла). Так как при увеличении диаметра обрабатываемого отверстия сверло перестает своими фасками центрироваться по стенкам отверстия, то сверло «уводит» от его геометрической оси. Эти явления присущи процессу сверления двухлезвийными винтовыми сверлами.

Особенностью сверления является низкая жесткость сверла в направлении действия радиальной составляющей силы резания  $P_y$ . Низкая жесткость сверл обуславливается наличием канавок для отвода стружки и значительной их длиной. Большая длина сверл вызвана необходимостью крепления инструмента за пределы обработанного отверстия, что связано с удлинением крепежной части и с увеличением общей длины сверла. В технологической системе сверло является наиболее слабым и определяющим жесткость элементом, что следует учитывать при назначении режимов резания. В связи с указанным особенно большие трудности возникают при сверлении глубоких отверстий, для обработки которых следует применять специальные сверла.

При глубоком сверлении должны обеспечиваться следующие технические требования: прямолинейность оси отверстия, соосность с наружной поверхностью детали, низкие параметры шероховатости поверхности и получение стружки, легко удаляемой из отверстия. Отверстия длиной 5-7 диаметров

сверлят удлиненными спиральными сверлами. Для улучшения удаления стружки и охлаждения сверла их изготавливают с отверстиями для подвода смазочно-охлаждающей жидкости. Для ломания стружки на передней поверхности делают стружколомающие канавки или уступы. Тенденция к разделению рабочей части на режущую и транспортирующую позволила создать так называемые шнековые сверла. Шнековые сверла имеют: винтовые канавки треугольного профиля (в продольном сечении) с углом наклона  $60^\circ$ ; спинку зуба, переходящую непосредственно в ленточки; постоянную толщину сердцевины; постоянные углы заточки вдоль главных режущих лезвий; трапецеидальную заточку передних и плоскую или винтовую задних поверхностей. Сверла изготавливают диаметром 3...30 мм и применяют при скоростях резания 8-35 м/мин и подачах на оборот 0,06...0,22 мм. Достижимая точность обработки 11-13 качества, параметр шероховатости поверхности  $Rz=12...15$  мкм.

Для глубокого сверления применяют также сверла одностороннего резания, которые делят на две группы: сверла с внутренним подводом СОЖ и наружным отводом стружки и сверла с наружным подводом СОЖ и внутренним отводом стружки.

К сверлам для глубокого сверления относятся и эжекторные сверла, которые по конструкции подобны второй группе сверл, но используют дополнительно эффект подсоса. При сверлении отверстий большого диаметра (от 30 мм и выше) применяют головки кольцевого сверления, образующие в заготовке кольцевую канавку и сердечник, который вынимается из отверстия после сверления. Для обеспечения формы стружки, удобной для удаления из зоны резания, головки работают по групповой схеме резания.

Рекомендации по назначению режимов резания при обработке сверлами из быстрорежущей стали приведены в табл. 2.2.32.

**Зенкерование** - метод обработки отверстий, предварительно полученных сверлением, штамповкой или литьем. Цель зенкерования - получение более точных по размеру и форме отверстий, образованных поверхностями вращения.

**Развертывание** - метод чистовой и отделочной обработки отверстий после сверления и зенкерования с целью получения точных по размеру и форме их поверхностей с низкими параметрами шероховатости.

Точность и качество обработки зенкерованием и развертыванием представлены в табл. 2.2.33.

## 2.2.32. Режимы резания при обработке сверлами из быстрорежущих сталей

Обрабатываемый материал	Твердость НВ	Скорость резания $v$ , м/мин, для сверл диаметром, мм		Поддача $S_0$ , мм								Охлаждение
				Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>								
				Диаметр сверла $d$ , мм								
До 4	Св. 4	1	1,55	2,5	4	6	9	13,5	20			
Сталь конструкционная высокой обрабатываемости резанием (автоматная)	До 179	25	38	$\frac{0,03}{8000}$	$\frac{0,05}{5100}$	$\frac{0,07}{3200}$	$\frac{0,12}{3000}$	$\frac{0,18}{2000}$	$\frac{0,27}{1300}$	$\frac{0,4}{900}$	$\frac{0,5}{600}$	Масло для резания
	До 229	21	32	$\frac{0,025}{6700}$	$\frac{0,04}{4300}$	$\frac{0,06}{2700}$	$\frac{0,1}{2500}$	$\frac{0,15}{1700}$	$\frac{0,22}{1100}$	$\frac{0,24}{750}$	$\frac{0,4}{500}$	
Сталь конструкционная углеродистая нелегированная	До 229	19	28	$\frac{0,025}{6000}$	$\frac{0,04}{3900}$	$\frac{0,06}{2400}$	$\frac{0,1}{2200}$	$\frac{0,15}{1500}$	$\frac{0,22}{1000}$	$\frac{0,34}{650}$	$\frac{0,4}{450}$	Эмульсия для сверления
	До 269	16	24	$\frac{0,02}{5100}$	$\frac{0,03}{3300}$	$\frac{0,05}{2000}$	$\frac{0,08}{1900}$	$\frac{0,12}{1300}$	$\frac{0,18}{850}$	$\frac{0,27}{550}$	$\frac{0,3}{400}$	
	До 321	13	20	$\frac{0,015}{4100}$	$\frac{0,02}{2700}$	$\frac{0,04}{1650}$	$\frac{0,06}{1600}$	$\frac{0,09}{1000}$	$\frac{0,13}{700}$	$\frac{0,2}{500}$	$\frac{0,25}{300}$	
Сталь конструкционная легированная	До 179	19	28	$\frac{0,02}{6000}$	$\frac{0,03}{3900}$	$\frac{0,05}{2400}$	$\frac{0,08}{2200}$	$\frac{0,12}{1500}$	$\frac{0,18}{1000}$	$\frac{0,27}{650}$	$\frac{0,3}{450}$	Эмульсия для сверления или масло для резания
	До 229	16	24	$\frac{0,015}{5100}$	$\frac{0,02}{3300}$	$\frac{0,04}{2000}$	$\frac{0,06}{1900}$	$\frac{0,09}{1300}$	$\frac{0,13}{850}$	$\frac{0,2}{550}$	$\frac{0,25}{400}$	
Сталь конструкционная высоколегированная легкообрабатываемая	До 179	17	25	$\frac{0,015}{5400}$	$\frac{0,02}{3500}$	$\frac{0,04}{2200}$	$\frac{0,06}{2000}$	$\frac{0,09}{1300}$	$\frac{0,13}{900}$	$\frac{0,2}{600}$	$\frac{0,25}{400}$	Масло для резания или эмульсия для сверления
Сталь инструментальная углеродистая	До 229	18	26	$\frac{0,015}{5700}$	$\frac{0,02}{3700}$	$\frac{0,04}{2300}$	$\frac{0,06}{2100}$	$\frac{0,09}{1400}$	$\frac{0,13}{900}$	$\frac{0,2}{600}$	$\frac{0,25}{400}$	Эмульсия для сверления

Сталь инструментальная углеродистая	До 269	15	22	$\frac{0,01}{4800}$	$\frac{0,015}{3100}$	$\frac{0,02}{1900}$	$\frac{0,04}{1750}$	$\frac{0,06}{1150}$	$\frac{0,09}{800}$	$\frac{0,13}{500}$	$\frac{0,17}{350}$	Эмульсия для сверления
Сталь инструментальная легированная	До 229	15	23	$\frac{0,015}{4800}$	$\frac{0,02}{3100}$	$\frac{0,04}{1900}$	$\frac{0,04}{1800}$	$\frac{0,09}{1200}$	$\frac{0,13}{800}$	$\frac{0,2}{550}$	$\frac{0,25}{370}$	Масло для резания или эмульсия для сверления
	До 269	13	20	$\frac{0,01}{4100}$	$\frac{0,015}{2700}$	$\frac{0,02}{1650}$	$\frac{0,04}{1600}$	$\frac{0,06}{1000}$	$\frac{0,09}{700}$	$\frac{0,13}{500}$	$\frac{0,17}{300}$	
Сталь инструментальная быстрорежущая	До 229	13	20	$\frac{0,015}{4100}$	$\frac{0,02}{2700}$	$\frac{0,04}{1650}$	$\frac{0,06}{1600}$	$\frac{0,09}{1000}$	$\frac{0,13}{700}$	$\frac{0,2}{500}$	$\frac{0,25}{300}$	Масло для резания или эмульсия для сверления
	До 269	11	17	$\frac{0,01}{3500}$	$\frac{0,015}{2250}$	$\frac{0,02}{1400}$	$\frac{0,04}{1350}$	$\frac{0,06}{900}$	$\frac{0,09}{600}$	$\frac{0,13}{400}$	$\frac{0,17}{270}$	
Сталь коррозионно-стойкая легкообрабатываемая	До 149	8	12	$\frac{0,01}{2500}$	$\frac{0,015}{1650}$	$\frac{0,02}{1000}$	$\frac{0,04}{950}$	$\frac{0,06}{650}$	$\frac{0,09}{425}$	$\frac{0,13}{280}$	$\frac{0,17}{190}$	Сернистое масло или эмульсия для сверления
Чугун серый	До 210	14	20	$\frac{0,045}{4400}$	$\frac{0,07}{3500}$	$\frac{0,11}{2200}$	$\frac{0,18}{1600}$	$\frac{0,27}{1000}$	$\frac{0,4}{700}$	$\frac{0,6}{500}$	$\frac{0,75}{300}$	Без охлаждения или сжатый воздух
	До 250	11	16	$\frac{0,035}{3500}$	$\frac{0,05}{2200}$	$\frac{0,09}{1400}$	$\frac{0,14}{1300}$	$\frac{0,21}{850}$	$\frac{0,3}{550}$	$\frac{0,48}{380}$	$\frac{0,6}{250}$	
	До 250	9	13	$\frac{0,025}{2850}$	$\frac{0,04}{1850}$	$\frac{0,06}{1150}$	$\frac{0,1}{1050}$	$\frac{0,15}{700}$	$\frac{0,22}{450}$	$\frac{0,34}{300}$	$\frac{0,4}{200}$	
Чугун ковкий	До 210	11	16	$\frac{0,025}{3500}$	$\frac{0,04}{2250}$	$\frac{0,06}{1400}$	$\frac{0,1}{1300}$	$\frac{0,15}{850}$	$\frac{0,22}{550}$	$\frac{0,34}{380}$	$\frac{0,4}{250}$	-
	До 250	8	12	$\frac{0,02}{2500}$	$\frac{0,03}{1650}$	$\frac{0,05}{1000}$	$\frac{0,08}{950}$	$\frac{0,12}{650}$	$\frac{0,18}{425}$	$\frac{0,27}{280}$	$\frac{0,3}{190}$	

(Примечания к табл. см. на с. 197)

2.2.33. Точность и качество поверхности после зенкерования и развертывания

Вид обработки	Параметр шероховатости поверхности Ra, мкм	Глубина дефектного поверхностного слоя, мкм	Квалитет допуска размера	Технологические допуски, мкм, при номинальных диаметрах отверстий, мм						
				Св. 3 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 120
Зенкерование черновое	25-6,3	50-20	13	-	-	270	330	390	460	540
			12	-	-	180	210	250	300	350
Зенкерование однократное литого или прошитого отверстия	25-0,4	50-20	13	-	-	270	330	390	460	540
			12	-	-	180	210	250	300	350
			11	-	-	110	130	160	190	220
			10	-	-	70	84	100	120	140
Зенкерование чистовое после черного или сверления	25-0,4	50-20	9	-	-	43	52	62	74	87
			8	-	-	27	33	39	46	57
Развертывание	12,5-0,8	25-15	11	75	90	110	130	160	190	220
			10	48	58	70	84	100	120	140
Развертывание точное	6,3-0,4	15-5	9	30	36	43	52	62	74	87
			8	18	22	27	33	39	46	57
			7	12	15	18	21	25	30	35
Развертывание тонкое	3,2-0,1	10-5	6	8	9	11	13	16	19	22
			5	5	6	8	9	11	13	15

Продолжение табл. 2.2.32

## Примечания:

1. Таблица составлена для сверл нормальной длины (ГОСТ 10902 и ГОСТ 10903) при сверлении отверстий глубиной до  $3d$ . Для сверл длинной и удлиненной серий (ГОСТ 886, ГОСТ 2092, ГОСТ 12121 и ГОСТ 12122) табличные значения подач умножать на коэффициент 0,77.

2. При сверлении глубоких отверстий глубиной не более  $3d$  необходимы промежуточные выводы сверла из просверливаемого отверстия для удаления стружки; промежуточные выводы рекомендуется делать после достижения сверлом глубины отверстия  $4d$ ,  $5d$ ,  $6d$  и т.д.; минутную подачу сверла  $S_m$ , мм, рекомендуется уменьшать на 30% при глубине сверления от  $3d$  до  $6d$  и на 40% - при глубине сверления от  $6d$  до  $8d$ .

3. При сверлении чугуна сверла рекомендуется затачивать с двумя углами при вершине сверла (90 и 118°) и с подточкой сердцевины (ГОСТ 4010).

4. При отсутствии на станке указанных в таблице значений  $S_o$  и  $n$  выбирать ближайшие фактические значения ( $S_f$ ,  $n_f$ ) таким образом, чтобы было соблюдено соотношение  $n_s \approx S_f n_f$ .

5. Для промежуточных диаметров сверл, не указанных в таблице, рекомендуется выбирать и промежуточные значения  $n$  и  $S_o$ .

6. Для других случаев, не указанных в таблице (например, при сверлении легких сплавов, труднообрабатываемых сталей и сплавов, пластмасс, бетона и т.д.), применение сверл будет неэффективно (в данном случае потребуются спиральные сверла специальных конструкций).

Обычно применяют зенкеры с тремя винтовыми зубьями, хотя стандартом предусмотрена возможность использования зенкоров с числом зубьев от трех до восьми. Это объясняется тем, что через три точки можно провести одну окружность, которая и является определяющей точность размера и формы обработанной поверхности. Увеличение числа зубьев у зенкоров по сравнению со сверлами обеспечивает увеличение поперечного сечения сердечника и жесткость зенкера, что обеспечивает повышение точности положения оси обработанного отверстия.

При зенкерованием осуществляется косоугольное резание, однако в более благоприятных условиях, чем при сверлении.

В процессе тонкого развертывания наряду с резанием проводится тонкое пластическое деформирование, которое позволяет получить высокое качество и низкие параметры шероховатости обработанного поверхностного слоя.

Зенкерование и развертывание имеют общие кинематические схемы обработки со сверлением (см. рис. 2.2.10).

Зенкеры и развертки имеют режущую и калибрующую части. Режущая часть расположена на заборном конусе, а калибрующая на цилиндрической части.

Для определения стойкости сверл, зенкоров и разверток используется следующее уравнение:

$$T = \left( \frac{C_v D^n}{v T^{m_t} S^y H B^2} \right)^{1/m}$$

а скорость резания

$$v = \frac{C_v D^n}{T^{m_t} S^y H B^2}$$

Значения коэффициентов и показателей приведены соответственно в табл. 2.2.34.

2.2.34. Значения коэффициента  $C_v$  при обработке инструментами из сталей Р9 и Р18, конструкционных сталей и чугунов

Обрабатываемый материал	Вид обработки			
	Сверление		Зенкерование	Развертывание
	$D < 10$ мм	$D > 10$ мм		
Конструкционные стали:				
155...265 НВ	360	874	1800	1310
265...340 НВ	306	743	1535	1110
Чугуны,				
140...240 НВ	4000	11400	15400	14500

Примечание. При обработке чугунов сверлами с пластинами из твердых сплавов ВК6 и ВК8 коэффициент  $C_v = 33400$ , а при обработке зенкерами из тех же материалов  $C_v = 87000$ .

## 2.2.4. ПРОТЯГИВАНИЕ

*Протягивание* - технологический метод обработки резанием и холодным пластическим деформированием, производимый специальными многозубыми инструментами - протяжками и прошивками.

Протяжки имеют форму стержня или полосы, снабженных зубьями, последовательно расположенными вдоль их оси. Протяжками обрабатывают внутреннее и наружные поверхности различной формы (круглые, плоские, фасонные) (рис. 2.2.16). При обработке внутренних поверхностей в заготовке предварительно образуется отверстие. Отверстие может быть получено при изготовлении заготовки или сверлением. Внутренним протягиванием можно получить отверстия круглого, квадратного и шестигранного поперечного сечения, а также отверстия со шпоночным пазом, шлицевые, фасонные сложного профиля. Наружным протягиванием получают плоские и фасонные линейчатые поверхности любого профиля, а также пазы и уступы.

К преимуществам протягивания следует отнести простоту кинематической схемы обработки, включающей одно прямолинейное движение. Движение подачи отсутствует. Подача зубьев в глубину обрабатываемого поверхностного слоя достигается превышением каждого последующего зуба относительно предыдущего. Величина превышения последующего зуба относительно предыдущего называется *подъемом на зуб*. Простота кинематической схемы обработки обусловлена тем, что образующая линия формируемой поверхности воспроизведена на рабочем профиле зубьев протяжки, а траектория прямолинейного движения воспроизводит направляющую линию, которая является прямой линией. Сле-

довательно, это движение является главным движением резания. Несмотря на низкие скорости резания при протягивании, связанные с трудностью реверса больших масс при возвратно-поступательном движении, скорость относительного перемещения протяжки превышает скорость относительного перемещения других инструментов, определяемую минутной подачей. Вследствие этого протягивание по сравнению с другими методами обработки является наиболее производительным (табл. 2.2.35).

Кроме указанного протягивание обладает следующими достоинствами: 1) простотой устройства и обслуживания станков; 2) возможностью автоматизации процесса; 3) сокращением технологического цикла за счет возможности замены протягиванием нескольких других последовательных операций (зенкерование, развертывание и т.п.); 4) возможностью обрабатывать сложные поверхности с высокой точностью и низкими параметрами шероховатости.

Различают три основных метода протягивания: свободное, координатное и протягивание тел вращения.

При свободном протягивании обеспечивается лишь нужный размер, макрогеометрия и параметры шероховатости обрабатываемой поверхности. Координатное протягивание характеризуется тем, что достигаются с необходимой точностью не только размеры, параметры шероховатости и форма обработанной протяжкой поверхности, но и обеспечивается точное положение ее относительно других поверхностей детали. Поэтому при координатном протягивании положение детали относительно протяжки строго фиксируется с помощью специальных приспособлений.

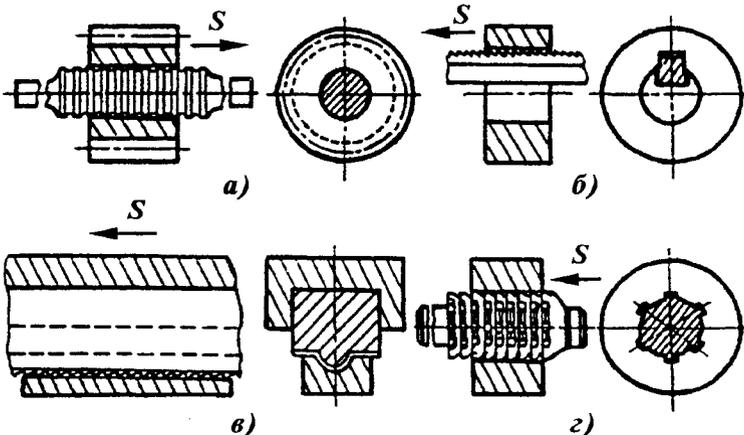


Рис. 2.2.16. Принципиальные схемы протягивания:

а - круглого отверстия; б - шпоночного паза;  
в - наружной поверхности; з - шлицевого отверстия

## 2.2.35. Показатели эффективности процессов обработки резанием

Показатель	Токарная	Сверление	Развертывание	Фрезерование	Протягивание
Производительность $P \cdot 10^{-7}$ , м <sup>3</sup> /с	20	5	0,30	30	35
Съем металла до полного износа инструмента $C \cdot 10^{-3}$ , м <sup>3</sup>	5	5	0,1	10	100
Энергоемкость $E \cdot 10^9$ , Дж/м <sup>3</sup>	7	5	20	3	15
Среднее арифметическое отклонение профиля Ra, мкм	3,2	6,3	0,63	3,2	1,25
Квалитет допуска размера	10	11	7	10	8

Метод протягивания тел вращения может быть применен для обработки наружных и внутренних поверхностей. Точность профиля обработанных поверхностей обеспечивается калибрующими зубьями протяжек, а точность размера (диаметра) - установкой протяжек относительно оси вращения обрабатываемых деталей.

Для протягивания применяют три схемы обработки: профильную, генераторную, групповую.

Протягиванием можно обрабатывать все металлы и неметаллы с высокой производительностью и качеством обработки (табл. 2.2.36).

Как и все режущие инструменты, протяжка состоит из рабочей (режущей, калибрующей, выглаживающей), установочно-крепёжной частей, а также соединительной части, которая соединяет их между собой. Наиболее полно все элементы представлены в протяжках для внутреннего протягивания (рис. 2.2.17).

Передний хвостовик 1 служит для соединения с патроном и передачи усилия от станка протяжке. Шейка 2 связывает передний хвостовик с рабочей частью. Направляющий конус 3 облегчает ввод протяжки в обрабатываемое отверстие. Передняя направляющая часть 4 обеспечивает направление протяжки по обрабатываемому отверстию, устраняет перекосы и неравномерность нагрузки по периметру первых режущих зубьев.

Рабочая часть служит для удаления припуска и формирования заданных параметров качества поверхности обработанного отверстия. Рабочая часть состоит из режущей, переходной, чистой, калибрующей и выглаживающей частей. Режущая часть 4 служит для удаления основной доли припуска. Пере-

ходная часть 5 необходима для постепенного уменьшения сил резания при переходе от черновой к чистой части. Чистовая режущая часть 6 обеспечивает формирование размеров, форм и необходимых параметров шероховатости обрабатываемой поверхности. Калибрующая часть 7 служит для уточнения размера, формы и снижения параметров шероховатости отверстия. Выглаживающая часть 8 используется для снижения параметров шероховатости и повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя.

Задняя направляющая часть 9 обеспечивает направление протяжки в отверстию по мере выхода из отверстия чистовых режущих, калибрующих зубьев и выглаживающих элементов. Задний хвостовик применяют в протяжках, работающих в автоматизированном цикле, и служит для захвата протяжки патроном с последующим ее отводом в исходное положение.

В отличие от протяжки у прошивки отсутствуют хвостовики и шейка (рис. 2.2.17, б).

Шпоночная протяжка (рис. 2.2.17, в) имеет те же части, что и протяжки для обработки отверстий, за исключением шейки и направляющего конуса. Протяжки для наружного протягивания обычно крепятся к ползунам винтами и поэтому у них отсутствуют хвостовики, направляющие и шейка.

Шагом зубьев протяжки называется расстояние между режущими кромками двух соседних зубьев. Геометрия режущей части определяется в сечении, перпендикулярном главной режущей кромки.

У протяжек различают передний угол  $\gamma$ , задний угол  $\alpha$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi$ , и угол наклона  $\omega$ , а также элементы протяжки - переднюю 10 и заднюю 11 поверхности, главную 12 и вспомогательные 13 режу-

## 2.2.36. Точность и качество поверхности при протягивании отверстий

Вид обработки	Параметр шероховатости поверхности Ra, мкм	Глубина дефектного поверхностного слоя, мкм	Квалитет допуска размера	Технологические допуски, мкм, на размер, при номинальных диаметрах отверстий, мм							
				Св. 3 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 120	Св. 120 до 180
Черновое протягивание литого или прошитого отверстия	12,5-0,8	25-10	11	-	-	-	-	160	190	220	250
			10	-	-	-	-	100	120	140	160
Чистовое протягивание после чернового или сверления	6,3-0,2	10-5	9	-	-	43	52	62	74	87	100
			8	-	-	27	33	39	46	57	63
			7	-	-	18	21	25	30	35	40
			6	-	-	11	13	16	19	22	25

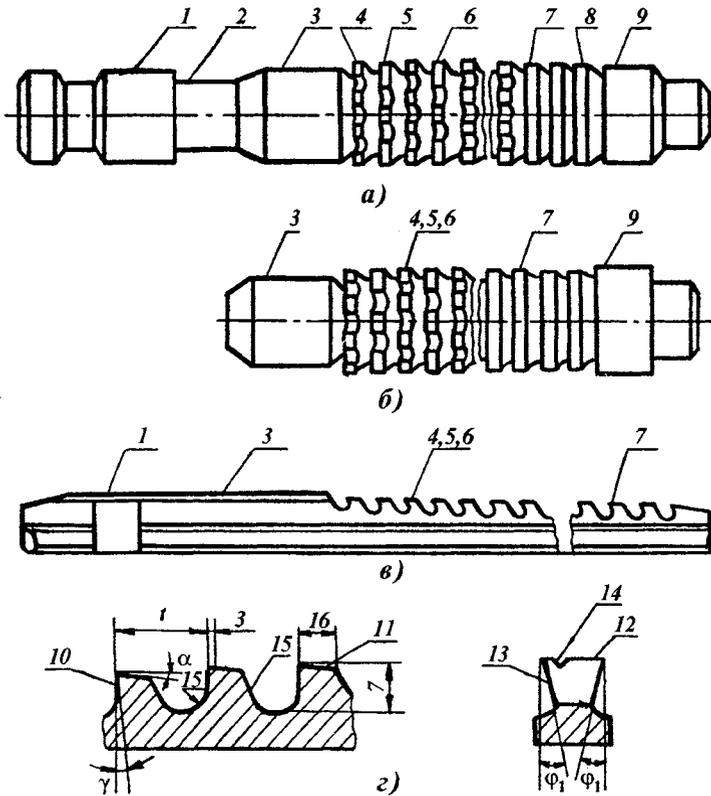


Рис. 2.2.17. Основные элементы протяжек и прошивков:  
 а - круглая протяжка; б - круглая прошивка;  
 в - шпоночная протяжка; г - геометрия зуба протяжки

шие кромки, стружколомательные канавки 14. Между зубьями расположены стружечные канавки, используемые для формирования и размещения стружки. Элементами стружечной канавки являются: закругленная одним или двумя радиусами впадина 2, спинка зуба 15, ширина пера 16 и ленточка с углом  $\alpha=0$ . Форма режущей части и стружечной канавки определяют форму профиля зубьев протяжек. При этом необходимо учитывать форму передней поверхности и группу заточки, которые также определяют форму профиля зубьев протяжки.

Основные параметры процесса протягивания определяются на основе результатов экспериментальных исследований и обобщения производственного опыта. Рекомендуется следующая методика определения параметров процесса протягивания и протяжек. Вначале определяют группу обрабатываемости материала детали по табл. 2.2.37 и группу качества обрабатываемой поверхности по табл. 2.2.38. Полученные данные являются основой для

назначения скорости протягивания (табл. 2.2.39) и выбора марки смазочно-охлаждающей жидкости (табл. 2.2.40, 2.2.41). Затем проводится расчет характеристик протяжек. По табл. 2.2.42 назначают припуск под протягивание, выбирают схему удаления этого припуска резанием и устанавливают необходимость применения других воздействий.

Важнейшим параметром процесса протягивания и протяжки, определяющим производительность и качество обработки и стойкость инструмента, является величина подъема на зуб. Подъем на зуб чистовой части протяжки должен быть минимальным, как правило равным 0,02 мм, обеспечивающим качество и точность обработанной поверхности. Подъем на зуб черновой части должен быть максимальным для достижения наивысшей производительности. Однако при этом необходимо учитывать ограничивающие факторы (табл. 2.2.43).

Как правило, величина подъема на зуб определяется из условия размещения стружки в стружечной канавке:

## 2.2.37. Группы обрабатываемости материалов

Материал	Марка	Твердость НВ	Группа обрабатываемости
<b>Стали</b>			
Углеродистые	20, 35, 40, 50	До 255	1
		255-285	2
		285-321	3
		321-364	4
Хромистые	30Х, 40Х, 50Х	До 255	1
		255-302	2
Хромоникелевые	12ХН3А, 45ХН	До 241	1
		241-269	2
		269-302	3
		302-321	4
		321-364	5
Хромомолибденовые	30ХМА, 35ХМ	До 229	2
		229-269	3
		269-321	4
		321-340	5
Хромоалюминиевые с вольфрамом или молибденом	38ХМЮА, 38ХЮ	До 269	3
		269-302	4
		302-340	5
Хромомарганцевые с титаном	30ХГТ, 40ХГТ	229-269	2
		269-302	3
		302-321	4
		321-340	5
Шарикоподшипниковые	ШХ15	До 229	4
Быстрорежущие	P18, P6M5	207-255	5
<b>Чугуны</b>			
Серый	СЧ 15, СЧ 28	До 197	6
		197-269	7
Ковкий ферритный	КЧ 33-8, КЧ 35-10	До 163	6
Ковкий перлитный	КЧ 45-6	До 217	6
Ковкий антифрикционный	АЧК-2	160-229	6
<b>Бронзы</b>			
Безоловянистые	БрАЖЦ-10-3-1,5	65-140	8
		140-200	9
Оловянистые	БрОЦСЧ-4-2,5	До 70	8

Продолжение табл. 2.2.37.

Латунь	ЛКС 80-3-3	До 130	8
		130-200	9
Алюминиевые сплавы	АЛЗ, АЛ13, АК8	До 160	9
		50-100	10

**2.2.38. Группы качества протягиваемых поверхностей**

Группа качества	Технические требования	
	Шероховатость поверхности Ra, мкм, не более	Квалитет допуска размера
1	1,25	До 7
2	2,5	7-8
3	5,0	9-10
4	10,0	11

**2.2.39. Скорости резания при протягивании (в м/мин)**

Группа качества	Группа обрабатываемости									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8	8	6	5	3	9	9	9	6	4
2	9	9	8	6	4	12	12	12	8	6
3	13	12	9	8	4	15	15	15	9	9
4	15	13	12	-	-	15	15	15	13	12

Примечание. Поправочные коэффициенты на марку инструментального материала: Р6М5К5, Р6Ф2К8М5 - 2; Р9К10 - 1,8; Р18, Р12Ф5М - 1,6; Р6М5, Р12Ф3 - 1,0; ХВГ - 0,7.

**2.2.40. Смазочно-охлаждающие жидкости и коэффициент наработки**

№ п/п	Наименование и состав	Коэффициент наработки
1	3-10%-ная эмульсия Укринол-1	1,0
2	5%-ная эмульсия СДМУ-2	1,3
3	5%-ная эмульсия ЭТ-2	0,8
4	10%-ная эмульсия ЭТ-2	0,8
5	МР-99 (10-20%), ИС-12 (90-80%)	1,4
6	ОСМ-3	1,0
7	Масло «И-20»	0,9
8	Сульфифрезол	1,0
9	МР-2У	-
10	МР-3	1,2
11	Укринол-14	1,3
12	МР-4	-

## 2.2.41. Применяемость смазочно-охлаждающих жидкостей

Обрабатываемый материал	Рекомендуемые СОЖ (см. табл. 2.2.40)
Серые и ковкие чугуны	6, 7, 8
Антифрикционные чугуны	8
Конструкционные углеродистые и легированные стали	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8
Титановые сплавы	9, 12
Инструментальные легированные и быстрорежущие стали	5, 6, 7, 10, 11
Жаропрочные сплавы и коррозионно-стойкие стали	5, 10
Цветные металлы и сплавы, алюминиевые сплавы	1, 2, 3, 4, 9

## 2.2.42. Припуски на протягивание отверстий (в мм)

Диаметр отверстия, мм	Отношение длины к диаметру отверстия			
	До 1	1-2	2-3	Св. 3
10-18	0,7	0,8	0,8	0,9
18-30	0,8	0,9	1,0	1,1
30-50	1,1	1,2	1,3	1,4
50-80	1,2	1,3	1,4	1,5
80-120	1,5	1,6	1,7	1,8

Примечание. Предварительная обработка отверстий выполнена сверлением или зенкерованием.

$$a_1 = \frac{k_1 h^2}{kl_d},$$

где  $k_1$  - коэффициент, характеризующий объем и форму стружечной канавки;  $h$  - глубина стружечной канавки, мм;  $k$  - коэффициент стружкостойкости;  $l_d$  - длина обрабатываемой поверхности, мм.

Лимитирующим фактором величины подъема на зуб является также сила резания. Допустимая сила резания ограничивается мощностью привода станка и прочностью протяжки в наиболее опасном сечении:

$$P_z = S\sigma_p,$$

где  $P_z$  - допустимая сила резания, Н;  $S$  - площадь опасного сечения протяжки, мм<sup>2</sup>;  $\sigma_p$  - допустимое напряжение при растяжении, МПа.

Сила резания зависит от числа одновременно работающих зубьев и, следовательно, можно уменьшать силу путем увеличения шага зубьев. Однако при этом увеличивается

длина протяжки и ухудшается плавность ее работы. Для обеспечения плавности работы протяжки требуется, чтобы одновременно участвовало в работе не менее трех зубьев. Для увеличения числа одновременно работающих зубьев применяют обработку деталей пакетом.

Подъем на зуб ограничивается также склонностью обрабатываемых материалов к вырывам и сколам, что особенно часто наблюдается при обработке пластичных материалов. Величины подъема на зуб устанавливаются по табл. 2.2.43.

Ограничивающим фактором величины подъема на зуб является требование обеспечения равной стойкости черновых и чистовых зубьев. Для определения средней наработки зубьев протяжки используется следующая зависимость:

$$T = \frac{C_T}{v^n d^y},$$

где  $T$  - средняя наработка зубьев протяжки, м;  $v$  - скорость резания;  $C_T$  - коэффициент, характеризующий изменение условий протягивания;  $d$  - диаметр протягивания.

Значения коэффициента  $C_T$  и показателей степени  $n$  и  $y$  приведены в табл. 2.2.44.

Из полученных значений величины подъема на зуб в зависимости от указанных выше ограничивающих факторов выбирается наименьшее, по которому и осуществляется расчет протяжки.

При существенной разнице между силами протягивания на черновой и чистовой частях протяжки (>60%) дополнительно вводятся три-пять переходных зубьев, которые обеспечивают плавный переход от черного протягивания к чистовому.

Наряду с режущими зубьями часто применяют деформирующие элементы, которые осуществляют холодное пластическое деформирование.

Обработка поверхностей деталей протягиванием осуществляется в несколько этапов, сопровождаемых значительными упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, а также различными явлениями на границе контакта инструмента с деталью, главным из которых является процесс трения. При этом часто применяются комбинированные методы протягивания, включающие в себя резание и поверхностное пластическое деформирование (ППД) в различных сочетаниях. Поэтому резание и ППД целесообразно описать едиными теоретическими законами, применение которых позво-

ляет эффективно управлять процессом обработки, т.е. резание и ППД представляются единым процессом пластической деформации, различающимся величиной прикладываемого напряжения. Исходя из этого, характеристики способа воздействия разделяются на две группы: характеристики очага деформации и физико-химические характеристики контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Характеристики очага деформации включают в себя степень и знак деформации, вид напряженно-деформированного состояния, температуру и скорость деформации, размеры очага, а также фазовые превращения в материале детали. Контактные характеристики делятся на три подгруппы: физические, химические и электрические (рис. 2.2.18-2.2.20). Под физическими понимают явления, связанные с избытком в поверхностном слое свободной энергии, а также с появлением поверхностного натяжения из-за некомпенсированности молекулярных сил сцепления. Химические явления определяются изменением химического состава поверхностного слоя путем концентрирования в нем поверхностно-активных веществ, что понижает свободную поверхностную энергию. Электрические явления характеризуются распределением в поверхностных слоях электрических зарядов и возникновением скачков потенциалов на поверхностях раздела фаз.

2.2.43. Рекомендуемые величины подъема черновых зубьев на сторону (в мм)

Группа обрабатываемости	Группа качества	Скорость резания, м/мин			
		До 3	3-6	6-10	10-15
1	1	0,18	0,14	0,12	0,10
	2	0,23	0,19	0,15	0,12
2	1	0,14	0,12	0,10	0,08
	2	0,18	0,15	0,12	0,10
3	1	0,12	0,10	0,08	0,06
	2	0,15	0,12	0,10	0,08
6	1	0,16	0,13	0,10	0,08
	2	0,20	0,17	0,14	0,12
7,8	1	0,14	0,11	0,09	0,07
	2	0,18	0,15	0,12	0,10
9	1	0,12	0,10	0,08	0,06
	2	0,16	0,13	0,10	0,08
10	1	0,15	0,12	0,10	0,08
	2	0,20	0,17	0,14	0,12

## 2.2.44. Значения коэффициентов для расчета средней наработки

Группа обрабатываемости	Подъем на зуб, мм	$C_T$	$n$	$y$
1	До 0,025	62	0,54	0,31
	» 0,15	235	0,67	0,27
	0,16-0,4	110	1,0	0,67
2	До 0,025	51	0,54	0,31
	» 0,15	158	0,67	0,27
	0,16-0,4	75	0,67	0,67
3	До 0,025	42	0,54	0,31
	» 0,15	115	0,67	0,27
	0,16-0,4	53	0,67	0,67
4	До 0,025	25	0,67	0,40
	» 0,15	58	0,79	0,36
5	До 0,025	12,3	0,67	0,40
	» 0,15	21,7	0,79	0,36
6	До 0,025	136	0,49	0,13
	» 0,15	231	0,61	0,23
	0,16-0,4	147	0,61	0,47
7	До 0,025	84	0,49	0,13
	» 0,15	133	0,61	0,23
	0,16-0,4	86	0,61	0,47
8	До 0,025	431	0,49	0,13
	» 0,15	704	0,61	0,23
	0,16-0,4	443	0,61	0,47
9	До 0,025	220	0,49	0,13
	» 0,15	339	0,61	0,23
	0,16-0,4	214	0,61	0,47
10	До 0,025	128	0,33	0,21
	» 0,15	331	0,52	0,18

Для количественного определения достигаемого качества поверхности при деформирующем протягивании целесообразно применять критерий, называемый степенью использования запаса пластичности:

$$\psi = \frac{1}{v} \int_0^{L_3} \frac{\xi_i dx}{\varepsilon_p(K)},$$

где  $v$  - скорость протягивания;  $L_3$  - длина очага деформации;  $\xi_i$  - интенсивность скоростей деформации сдвига;  $\varepsilon_p$  - предельная деформация материала до разрушения;  $K$  - показатель напряженного состояния.

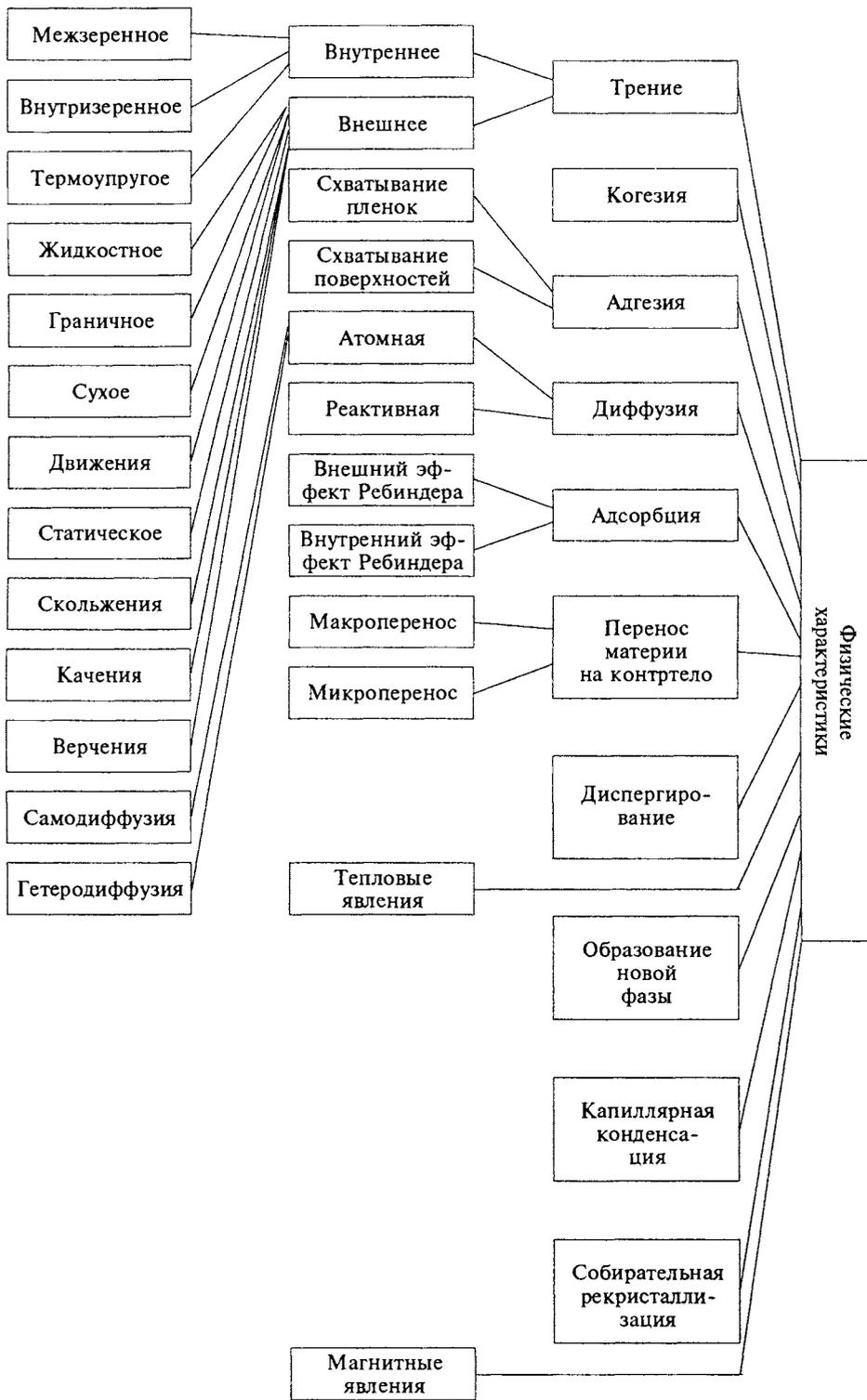
Порядок определения входящих в этот критерий величин следующий. Вначале определяют компоненты скорости перемещения частицы среды в передней и задней внеконтактных и в контактной зоне деформации:

$$u_{x1} = -\frac{2s_1v}{l_1}; \quad u_{y1} = \frac{s_1vy^2}{l_1^2h_0};$$

$$u_{x2} = \frac{2vtg\alpha}{h_0^2} \left( x - \frac{s_1h_0}{l_1tg\alpha} - l_1 \right) y; \quad u_{y2} = -\frac{vtg\alpha y^2}{h_0^2};$$

$$u_{x3} = \frac{2vtg\alpha}{h_0^2 l_3} \left( l_2 - \frac{s_1h_0}{l_1tg\alpha} \right) (l_1 + l_2 + l_3 - x) y;$$

Рис. 2.2.18. Физические контактные характеристики



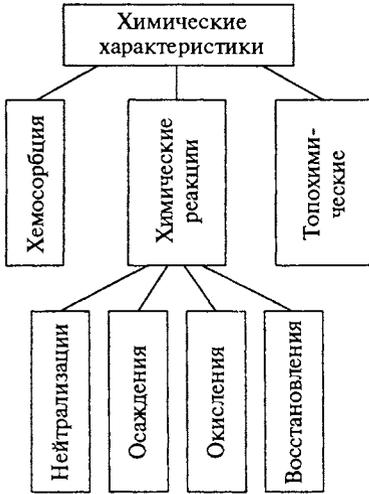


Рис. 2.2.19. Химические контактные характеристики



Рис. 2.2.20. Электрические контактные характеристики

$$u_{y3} = \frac{vtg\alpha}{h_0^2 l_3} \left( l_2 - \frac{s_1 h_0}{l_1 tg\alpha} \right) y^2,$$

где  $\alpha$  - угол заборного конуса деформирующего элемента;  $s_1$  - перемещение частицы металла;  $h_0$  - глубина пластически деформированного слоя;  $l_1, l_2, l_3$  - соответственно длины передней внеконтактной, контактной и задней внеконтактной зоны.

Далее определяют компоненты тензора скоростей деформации:

$$\xi_{xj} = \frac{\partial u_{xj}}{\partial x}; \quad \xi_{yj} = \frac{\partial u_{yj}}{\partial y}; \quad \eta_{xyj} = \frac{\partial u_{xj}}{\partial y} + \frac{\partial u_{yj}}{\partial x},$$

где  $j$  - номер зоны очага деформации.

Интенсивность скоростей деформации

$$\xi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\xi_{xj}^2 + \eta_{xyj}^2}.$$

Степень деформации:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{i(j-1)} + \frac{1}{v} \int_{L_{j-1}}^L \xi_{ij} dx.$$

Интенсивность напряжений определяется по кривой упрочнения

$$\sigma_i = \sigma_0 + A \varepsilon_i^n,$$

где  $A$  и  $n$  - коэффициенты.

Среднее нормальное напряжение в первой и третьей зонах

$$\sigma_{1;3} = -\frac{2\sigma_i}{3\xi_{ij}} \xi_{yj};$$

во второй зоне

$$\sigma_2 = -\frac{2B\xi_x x^n}{2\xi_{ij}} - \frac{vtg\alpha x^2}{h_0^2} + \frac{2vtg\alpha x}{h_0^2} \left( \frac{s_1 h_0}{l_1 tg\alpha} + l_1 \right) + \frac{2B\xi_x l_1^n}{3\xi_{ij}} + \frac{vtg\alpha l_1^2}{h_0^2} - \frac{vtg\alpha l_1}{h_0^2} \left( \frac{s_1 h_0}{l_1 tg\alpha} + l_1 \right) - \frac{2\sigma_i}{3\xi_{ij}} \xi_y,$$

где  $B = A \left( \frac{1}{v\sqrt{3}} \sqrt{4\xi_{xj} + \eta_{xyj}^2} \right)^n$ .

После этого находят показатель напряженного состояния  $K = \sigma / \sigma_i$ , а по диаграмме пластичности - предельную накопленную деформацию. В некоторых случаях диаграмму пластичности можно аппроксимировать:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 e^{-c_1 k}.$$

Найденный с помощью данной методики критерий  $\psi$  удобен тем, что с его помощью можно количественно определить качество обработанной поверхности, а также последующую обрабатываемость резанием. Типовые графики зависимости степени упрочнения и параметров шероховатости обработанной поверхности, а также силы резания по упрочненному деформирующим протягиванием слою от степени использования запаса пластичности выглядят следующим образом (рис. 2.2.21).

Для комплексной оценки выбора физико-химических контактных характеристик целесообразно использовать коэффициент трения, который может быть определен по усовершенствованному выражению И.В. Крагельского:

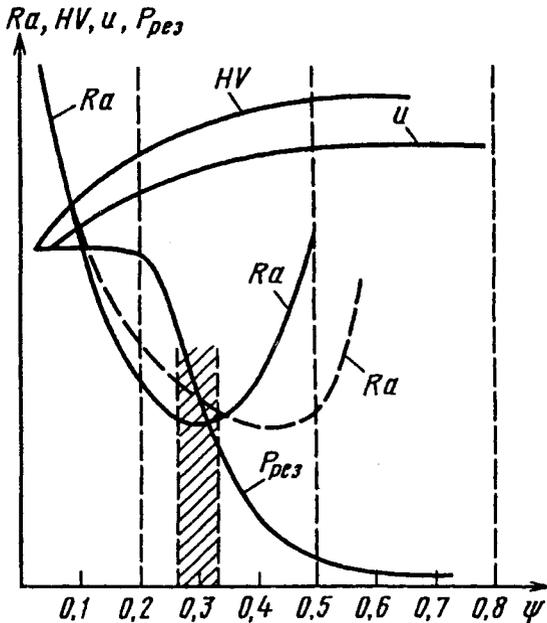


Рис. 2.2.21. Зависимость степени использования запаса пластичности  $\psi$  и параметров качества  $Ra$ ,  $HV$ ,  $P_{рез}$ ,  $u$  при обработке отверстия деформирующим элементом

$$f = \frac{\tau_0}{c(\sigma_0 + Ae_i^m)} + \beta + 0,55K_{vf}^n \Delta^{1/2} \left[ \frac{2P_c}{c(\sigma_0 + Ae_i^m)} \right]^{1/2v}$$

инструмента с деталью.

Максимумы коэффициента трения наблюдаются в начале зоны контакта обрабатываемого материала с заборным конусом и на цилиндрической ленточке деформирующего элемента. После резкого снижения коэффициента трения на расстоянии 0,4...0,6 мм от начала зоны контакта его значение при приближении к цилиндрической ленточке остается примерно постоянным, а затем при переходе заборного конуса в ленточку вновь возрастает. Максимум  $f$  в начале зоны контакта объясняется, с одной стороны, значительной величиной касательных напряжений, возникающих при переходе частиц металла из передней высококонтактной зоны в зону контакта и, с другой стороны, тем, что предел текучести материала в этой зоне минимален, так как процесс упрочнения еще не развит. Уровень нормальных напряжений в этом месте контакта также невелик. Затем касательные напряжения резко падают, а их последующее монотонное возрастание компенсируется ростом нормальных напряжений и происходящим процессом упрочнения металла. Второй максимум связан с тем, что в зоне цилиндрической ленточки действуют максимальные по величине касательные напряжения, а нормальные напряжения в этой зоне снижаются до величины, соответствующей началу зоны контакта материала с заборным конусом.

где  $c$  - коэффициент, зависящий от упрочнения материала;  $\beta$  - коэффициент упрочнения молекулярной связи;  $\Delta$  - безразмерный комплекс, характеризующий шероховатость поверхности;  $v$  - параметр степенной аппроксимации кривой опорной поверхности;  $\tau_0$  - сдвиговое сопротивление;  $n$  - число циклов, приводящих к разрушению деформируемого объема;  $P_c$  - отношение действующей нагрузки  $N$  к контурной площади контакта  $A_c$ .

Кроме этого, коэффициент трения может быть определен на основании метода делительных сеток.

Определение коэффициента трения по результатам исследований очага деформации методом делительных сеток с использованием единых параметров повышает адекватность получаемых результатов. Кроме того, оба метода позволяют определить характер изменения коэффициента трения по длине контакта

Для оценки эффективности того или иного процесса протягивания может быть использован такой критерий, как мощность деформации, учитывающий усилия деформирования и скорость осуществления воздействия. Для процесса обработки деталей деформирующим элементом с конической заборной частью мощность, затрачиваемая на деформацию объема металла:

$$N_{ди} = \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^h \sigma_j(\varepsilon_j) \xi_j dld\varphi dh.$$

Мощность, затрачиваемая на преодоление трения на контактных поверхностях инструмента и детали:

$$N_{трj} = \int_0^l \int_0^{2\pi} v_{ск} \mu \sigma_T R dl d\varphi,$$

где  $l$  - длина контакта инструмента с деталью;  $h$  - глубина распространения деформации;  $v_{ск}$  - скорость скольжения;  $\mu$  - коэффициент трения по Зибелю (Прандтлю);  $\sigma_T$  - предел текучести обрабатываемого материала;  $R$  - радиус инструмента.

Мощность процесса протягивания при произвольном числе циклов деформирования  $M$ :

$$N_{ди} = \sum_{j=1}^M \left[ \iiint \sigma_j(\varepsilon_j) \xi_j dv + N_{трj} \right].$$

Данная методика позволяет определить параметры процесса протягивания и конструкции протяжек, обеспечивающие получение заданного качества поверхности, максимальной стойкости инструмента и минимальной энергоемкости.

### 2.2.5. ОБРАБОТКА РЕЗЬБОВЫХ И ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Наружную и внутреннюю резьбы на заготовках получают тремя способами:

1) резьбовыми резцами, гребенками, метчиками, круглыми плашками, резбонарезными головками, резьбовыми фрезами и шлифовальными кругами, когда в процессе обработки осуществляется вырезание слоев металла по профилю впадины резьбы;

2) выдавливающими сборными плашками для наружных резьб и бесстружечными метчиками для внутренних резьб, когда инструмент и заготовка работают по принципу

пары скольжения без зазора при наличии больших сил трения;

3) резьбокатными плоскими и сегментными плашками, роликами и головками аксиального, тангенциального и радиального типа, когда инструмент осуществляет силовое качение по поверхности заготовки, характеризующееся значительно меньшими силами трения, чем при выдавливании резьбы. Второй и третий способы основаны на образовании профиля резьбы за счет пластического деформирования металла.

Способ получения резьбы может быть выбран по табл. 2.2.45 и 2.2.46 с учетом типа производства, требуемой производительности и качества обработки.

Диаметры заготовок под нарезание наружных и внутренних метрических резьб соответственно определяются ГОСТ 19258 и ГОСТ 19257. В единичном, мелкосерийном и серийном производствах для нарезания наружных и внутренних резьб на универсальных токарно-винторезных станках с ручным и числовым программным управлением (ЧПУ), револьверных полуавтоматах и автоматах и специальных станках применяют:

1. **Резьбовые резцы и гребенки.** В современном производстве рекомендуется широко использовать резцы с пластинами из твердого сплава (ГОСТ 18885) и резцы сборные с механическим креплением пластин из твердого сплава и пластин из минералокерамики и СТМ. Следует применять более производительные круглые резьбовые резцы и резьбовые гребенки, изготавливаемые по республиканским стандартам.

### 2.2.45. Относительная производительность различных способов резьбообразования

Способ резьбообразования	Относительная производительность
Нарезание:	
шлифовальным кругом	0,025
резьбовыми фрезами	0,25
круглой плашкой	0,40
самооткрывающейся резьбовой головкой	1,0
Выдавливание (двумя роликами)	3-3,5
Накатывание:	
плоскими плашками	8-10
непрерывное	24-30

### 2.2.46. Параметры шероховатости и точность резьбы при различных способах резьбообразования

Резьбообразующий инструмент		Резьба	
Тип	Рабочая часть	Класс точности	Параметр шероховатости Ra, мкм
Резец	Шлифованная	Грубый Средний	3,2-1,25
	Доведенная на притире	Точный Средний	2,5-0,63
Плашка	Нешлифованная	Грубый	12,5-2,5
	Доведенная на притире	Средний	3,2-1,25
Фреза	Нешлифованная	Грубый	6,3-2,5
	Шлифованная	Средний	3,2-1,25
Резьбонарезная головка	Нешлифованная	Средний грубый	3,2-2,5
	Шлифованная	Точный Средний	2,5-1,25
Метчик	Нешлифованная	Грубый	6,3-3,2
	Шлифованная	Точный Средний	3,2-1,25
Абразивный круг		Точный	1,25-0,32
Плашка и ролик при накатке нешлифованной заготовки	Нешлифованная	Средний Грубый	3,2-1,25
	Шлифованная	Средний	2,5-0,63
Плашка и ролик при накатке шлифованной заготовки	Шлифованная	Точный	1,25-0,32
Метчик-раскатник	Шлифованная	Средний	2,5-0,63

Метрические, трубные и другие резьбы нарезают за несколько проходов по различным схемам резания (рис. 2.2.22):

профильной, когда резьбовому резцу сообщается радиальная подача (рис. 2.2.22, а) и все точки активной длины режущей кромки АВС являются профилирующими;

последовательной (рис. 2.2.22, б), когда срезаемые слои распределяются между зубьями заборной части инструмента с осевой подачей, равной шагу (метчики, круглые плашки, плоские и круглые резьбовые гребенки и др.), у которых профилирующими являются лишь крайние точки А и В режущих кромок;

последовательно-профильной (рис. 2.2.22, в), по которой работают резьбовые резцы с радиально-осевой подачей.

Трапецеидальные и прямоугольные резьбы нарезают по профильной схеме резания, когда профиль черновых резцов отличается, а профиль чистовых резцов совпадает с профилем резьбы (рис. 2.2.22, г).

Число черновых и чистовых переходов при получении резьбы резцами назначают соответственно в пределах 2-7 и 1-4 и увеличивают для инструментов из быстрорежущей стали, а также с возрастанием шага резьбы, прочности обрабатываемого материала, при нарезании внутренних, многозаходных и точных резьб. При нарезании трапецеидальной резьбы по профильной схеме число переходов значительно выше и соответствует 8-17 для черновых и 5-10 для чистовых. Для снижения числа переходов следует применять круговые резьбовые гребенки. Скорости резания выби-

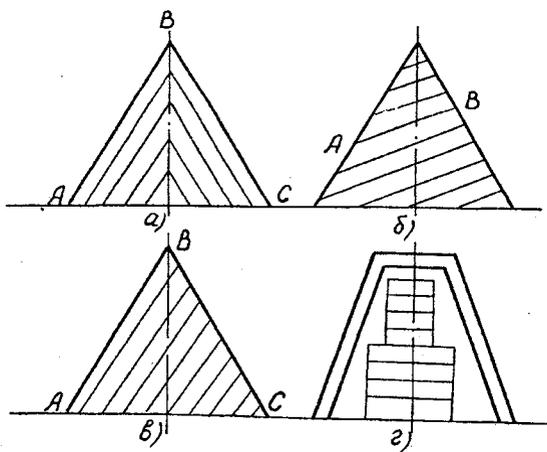


Рис. 2.2.22. Схемы резания при нарезании резьбы

рают в пределах:  $v = 0,03 \dots 0,6$  м/с - для резбовых резцов из быстрорежущих сталей Р6М5К5, Р9М4К8, Р18Ф2 и др.;  $v = 0,25 \dots 2$  м/с - для резцов из твердых сплавов ВК6-ОМ, Т30К4, ВК8, ВК3-М, ВК6 и др. Скорости резания снижаются с увеличением шага резьбы и прочности обрабатываемых материалов. Например, при нарезании резьбы на заготовках из коррозионно-стойких, высокопрочных и жаропрочных сталей с  $\sigma_B \leq 1400$  МПа резами из быстрорежущей стали скорость резания снижается до  $0,03 \dots 0,1$  м/с.

2. **Метчики** подразделяются на ручные, машинно-ручные (ГОСТ 3266, ГОСТ 17931, ГОСТ 6627), машинные (ГОСТ 17933, ГОСТ 8959), гаечные (ГОСТ 1604, ГОСТ 3449, ГОСТ 6951). Специальные метчики-протяжки предназначены для нарезания трапецидальной резьбы.

Эксплуатация метчиков (особенно в условиях автоматизированного производства) должна осуществляться без сколов режущих зубьев заборного конуса и поломок метчиков по поперечному сечению вследствие большой концентрации в канавках крутящих моментов и изгибающих сил, возникающих при несовпадении осей метчика и отверстия.

Для снижения случаев скола режущих кромок необходимо:

выбирать инструментальный материал, обладающий высокой сопротивляемостью хрупкому излому (Р6М5, Р6М5К5, Р9М4К8, Т5К10, Т14К8, ВК8, ВК10-М и др.);

назначать оптимальный угол заострения путем правильного выбора переднего и заднего углов зубьев;

уменьшать толщину среза, приходящуюся на зуб путем удлинения заборной части метчика при уменьшении  $\phi$  при обработке сквозных отверстий

$$a = \frac{P}{z} \operatorname{tg} \phi,$$

где  $P$  - шаг резьбы;  $z$  - число канавок метчика;  $\phi$  - угол заборного конуса;

обеспечивать заточкой величину кинематического падения затылка на ширине пера зубьев заборной части метчиков, нарезающих резьбу в глухих отверстиях, равную  $0,02$  мм, чтобы исключить попадание корневой стружки под заднюю поверхность зубьев и в связи с этим сколы кромок при вывинчивании после реверса.

Для снижения процента поломок метчиков рекомендуется:

1) выбранный критерий затупления (допустимый износ по уголкам зубьев заборного конуса), соответствующий экономической стойкости, уточнять по критическому значению крутящего момента следующим образом:

а) определяется значение критерия затупления, исходя из экономической стойкости (мм)

$$\delta = ckd,$$

где  $d$  - диаметр метчика, мм;  $k$  равно  $1, 0,75$  и  $0,50$  - соответственно для резьб с крупным, средним и мелким шагом;  $c = 0,125$  - для стали;  $c = 0,07$  - для чугуна (для ориентации);

б) коэффициенты  $c$  и  $\delta$  уточняются на основе силовых контрольных опытов из условия, чтобы крутящие моменты не превышали критических уровней:

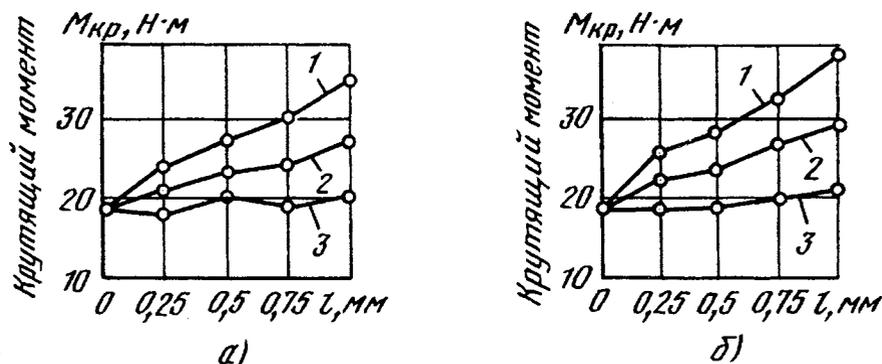


Рис. 2.2.23. Влияние отклонения от соосности и длины хвостовика *l* метчика М12 на максимальный крутящий момент:

*а* - жесткое закрепление; *б* - закрепление в качающемся патроне  
 1 - *l* = 70 мм; 2 - *l* = 140 мм; 3 - *l* = 210 мм

Метчик . . .	М6	М8	М10	М12	М14	М18
$M_{кр}$ , Н·м . .	4,6	11,4	23	40	64	161

2) снизить момент трения от заклинивания зубьев путем:

уменьшения числа калибрующих зубьев до 7-12;

придания зубьям калибрующей и направляющей частей бочкообразной формы, исключающей резание этими зубьями;

увеличения обратной конусности в допустимых по точности среднего диаметра пределах;

расположением зубьев в шахматном порядке;

уменьшением ширины пьезов метчика; применением затылования зубьев по профилю резьбы;

применением у метчиков геометрии обратной закрутки, которая при приложении нагрузки принимает «нормальную геометрию»;

3) максимально снизить смещение и перекос оси отверстия относительно оси метчика путем правильного базирования заготовки при сверлильных (под резьбу) и резбонарезных операциях (спецналадки) и удлинения хвостовика метчика при жестком его закреплении (рис. 2.2.23, *а*) и закреплении в качающемся патроне (рис. 2.2.23, *б*);

4) применять скоростное резбонарезание с температурами резания 500...550 °С, чтобы «уйти» из зоны наростообразования, многократно увеличивающего крутящий момент и параметры шероховатости из-за стесненных условий взаимодействия режущих зубьев метчика с металлом. При такой организации процесса резания резко повышается производительность и качество обработки резбонарезных операций (рис. 2.2.24).

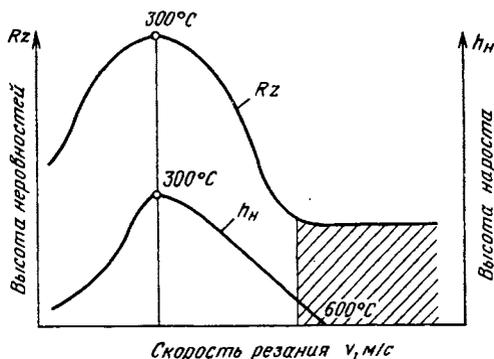


Рис. 2.2.24. Влияние скорости резания (температуры) на высоту нароста  $H_n$  и высоту неровностей (заштрихована рекомендуемая область работы)

При выбранных значениях  $v$ ,  $P$ ,  $d$ ,  $z$  и  $\phi$  по соответствующим формулам и таблицам рассчитывается стойкость метчиков.

3. **Круглые плашки.** Наружные крупные и мелкие метрические и трубные резьбы получают круглыми плашками (ГОСТ 9740, ГОСТ 6228). ГОСТ 19258, ГОСТ 21347 и ГОСТ 21349 регламентируют диаметры заготовок под нарезание метрической, трубной цилиндрической и трубной конической резьбы. Скорости резания

$$v = \frac{cd^{1,2}}{T^{0,5} p^{1,2}}$$

где  $c'$  равно 0,045, 0,15 и 0,20 - соответственно для углеродистых конструкционных сталей ( $\sigma_B = 750$  МПа), латуни и алюминиевых сплавов;  $d$  - диаметр резьбы, мм;  $T$  - стойкость,

мин;  $P$  - шаг резьбы, мм. В зависимости от шага и номинального диаметра резьбы скорости резания изменяются в пределах: 0,04-0,07 м/с - для конструкционной углеродистой и легированной стали, 0,125-0,25 м/с - для латуни и бронзы, 0,15-0,30 м/с - для алюминиевых сплавов.

**4. Резьбовые фрезы.** Короткие наружные и внутренние резьбы с треугольным профилем, расположенные у галтелей, буртиков и т.д., а также доходящие до дна глухих отверстий могут быть выполнены гребенчатыми фрезами с коническим хвостовиком и насадными (ГОСТ 1336). Метод применяется при нарезании резьбы на заготовках из вязких и твердых сталей, когда стойкость других инструментов является низкой.

Ось вращающейся гребенчатой фрезы устанавливают параллельно оси заготовки. Так как продольные канавки параллельны оси фрезы и профиль зубьев совпадает с профилем нарезаемой резьбы, то фрезе сообщается подача, равная шагу резьбы на один оборот заготовки. Длина фрезы на две-три нитки больше длины нарезаемой резьбы. Обработка осуществляется за 1,25 оборота заготовки. Обработка гребенчатыми фрезами осуществляется на станках 563А, 563Б, 563В, 5К63, КТ43, КТ44, КТ45, КТ85 и др. Обработка ведется по встречной схеме фрезерования с критерием износа зубьев не более 0,2 мм, 0,3 мм и 0,6 мм соответственно для фрез с шагом 1,26 мм, 1,5-1,75 мм и более 1,75 мм. Скорость резания выбирают из табл. 2.2.47.

**5. Резьбонарезные головки.** Для повышения производительности при нарезании наружных резьб на токарных и револьверных станках применяют невращающиеся самооткрывающиеся головки с круглыми гребенками (ГОСТ 21761), а на автоматах и сверлильных станках - вращающиеся головки (ГОСТ 21760). Их параметры приведены в табл. 2.2.48. Применение круглых гребенок обеспечивает высокую суммарную стойкость за счет увеличения числа переточек. Геометрические размеры круглых гребенок и кулачков к ним регламентированы ГОСТ 21761 и ГОСТ 21762.

Наружный диаметр заготовки

$$d_3 = d - cP,$$

где  $d$  - номинальный диаметр резьбы, мм;  $P$  - шаг резьбы, мм;  $c$  равно 0,10, 0,15 и 0,20 - соответственно для ковкого чугуна, конструкционной углеродистой и легированной стали, бронзы и твердых латуней.

Для нарезания наружных резьб диаметром 1,7...3,5 мм применяют винторезные регулируемые, самовыключающиеся и самооткрывающиеся головки с круглыми плашками, повышающие производительность и качество нарезаемой резьбы.

При изготовлении точных внутренних резьб нарезание самовыключающимися головками является одним из наиболее высокопроизводительных способов.

Наиболее совершенной является головка конструкции ВНИИ, которая имеет один корпус (хвостовик) и сменную в пяти вариантах переднюю часть с плашками и механизмом выключения для нарезания внутренних цилиндрических резьб диаметром 36...80 мм (табл. 2.2.49). На плашках указывают номер головки, значения диаметра и шага резьбы; их затачивают и устанавливают комплектно. Скорости резания определяют по табл. 2.2.50.

Нарезание резьбовыми головками должно осуществляться с обильным охлаждением эмульсией или сульфозрезолом с подачей СОЖ 8...10 л/мин.

Применение резьбовых головок дает следующие преимущества по сравнению с резьбофрезерованием:

повышается производительность вследствие сокращения машинного и вспомогательного времени (обработка осуществляется за одну установку);

высвобождаются резьбофрезерные станки и производственная площадь;

отпадает операция - ручная калибровка резьбы, которая часто применяется после резьбофрезерования;

снижаются параметры шероховатости поверхности нарезаемой резьбы;

обеспечивается требуемая перпендикулярность оси нарезаемой резьбы к торцу.

2.2.47. Скорости резьбофрезерования  $v$ , м/с

Шаг нарезаемой резьбы, мм	Углеродистые конструкционные стали					Серый чугун		
	Подача на зуб фрезы, мм							
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,06	0,10	0,14
0,80	1,25	0,933	0,916	0,733	0,65	1,2	0,966	0,85
1,75	0,98	0,75	0,65	0,583	0,516	0,966	0,80	0,716
3,50	0,80	0,60	0,53	0,483	0,583	0,80	0,65	0,583

**2.2.48. Типы винторезных головок с круглыми гребенками**

Головки		Диаметр, мм	
Невращающиеся	Вращающиеся	Резьбы	Хвостовика
1К-20			
1К-25	1КА-25	4...10	20
2К-25		6...14	25
2К-30	2КА-30	9...24	30
3К-30	3КА-30		
3К-40	3КА-40	12-42	38...40
4К-45	4КА-45		45
4К-70	4КА-70		70
5К-45	5КА-45	24...60	45
5К-70	5КА-70		70

**2.2.49. Головки ВНИИ для нарезания внутренних резьб**

Номер головки	1	2	3	4	5
Условный шифр головки	36	42	48	60	72
Диаметр нарезаемой резьбы, мм	36...42	42...48	48...60	60...72	72...80

**2.2.50. Скорости резания для резьбонарезных головок**

Материал заготовки	Диаметр резьбы, мм	Скорость резания, м/с	
		Крупный шаг	Мелкий шаг
Сталь 45	6-60	0,115-0,16	0,166-0,283
Сталь 40Х	6-60	0,09-0,125	0,133-0,23
Ковкий чугун	6-60	0,20-0,265	0,283-0,500
Бронзы, твердые латуни	6-60	0,23-0,32	0,333-0,566

**6. Резьбонакатные плашки и ролики.** В крупносерийном и массовом производствах рекомендуется применять высокопроизводительное накатывание наружных и внутренних резьб, когда заготовка прокатывается между двумя параллельно расположенными плоскими плашками (ГОСТ 2248) или вращающимися цилиндрическими роликами (ГОСТ 9539). В соответствии с этими стандартами резьбонакатные инструменты выпускают обычной и повышенной точности. Ролики обычной точности должны обеспечивать на заготовке резьбу 7-го качества и параметр шероховатости поверхности  $Ra=0,2...0,1$  мкм. Технические параметры резьбонакатных автоматов с плоскими плашками для накатывания резьбы диаметром 2...2,5 мм приведены в ГОСТ 6283.

Для получения резьб диаметром до 15 мм и длиной до двух-трех диаметров накатываемой резьбы необходимо применять резьбонакатные станки с инструментом в виде ролика-сегмента, имеющие наибольшую производительность. При отсутствии специальных резьбонакатных станков следует использовать токарные, револьверные, сверлильные, болтонарезные станки и автоматы, применяя резьбонакатные головки.

Наиболее распространенными являются головки ВНГН-2...5, предназначенные для накатывания резьб диаметром 4...52 с шагом 0,7...5 мм. Головки ВНГН-трап.1...4 применяют для накатывания трапециевидных резьб. Отечественные тангенциальные головки ТНГВ, ТНГС-1, ТНГС-2 предназначены

для накатывания резьб соответственно диаметром 3...6, 6...24, 24...52 мм.

Накатывание резьбы применяется для металлов с  $\sigma_B \leq 850$  МПа и твердостью до 37 HRC.

Диаметр заготовки под накатывание треугольных (метрической и трубной) и трапецеидальных резьб:

$$d_3 = \sqrt{0,5(d^2 + d_1^2)} ;$$

$$d_3 = \sqrt{d_1^2 \frac{2hd_2(h + d_2 + H - d)}{Hk}} ,$$

где  $d$ ,  $d_1$  и  $d_2$  - соответственно наружный, внутренний и средний диаметры резьбы, мм;  $h$  - высота профиля резьбы, мм;  $H = 1,866 P$ , мм;  $P$  - шаг резьбы, мм;  $k = 1,02...1,04$  - коэффициент.

Радиальная сила при накатывании мелких метрических резьб круглыми роликами:

$$P_p = \frac{\sigma_T L D d}{1500(D + d)} ,$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести, МПа;  $D$  - средний диаметр роликов, мм;  $d$  - средний диаметр резьбы, мм;  $L$  - длина резьбы на заготовке, мм.

Плашки и ролики изготовляют комплектно и они должны эксплуатироваться совместно (попарно).

Скорости и радиальные подачи накатывания резьбы выбирают по табл. 2.2.51.

При накатывании резьбы рекомендуется использовать жидкости: ОСМ-3 - для углеродистых и легированных сталей; МР-1У или МР-3 - для коррозионно-стойких сталей; МР-2У или ОСМ-3 - для цветных сплавов.

**Внутренние резьбы** получают метчиками-раскатниками (ГОСТ 18839, ГОСТ 18840) на заготовках из металла и сплавов высокой пластичности с шагом до 2 мм (алюминий, медь, латунь, бронза, мягкая сталь и т.д.). Для резьб с шагом более 2 мм требуется предварительная обработка роликовыми раскатниками.

### 2.2.51. Скорости и радиальные подачи при накатывании резьбы

Материал заготовки	Скорость накатывания, м/с		Подача на оборот, мм, при шаге резьбы $P=1...3$ мм
	роliками	гlossкими плашками	
Коррозионно-стойкие стали типа 08X18H10T	0,166-0,333	-	0,015-0,03
Сталь, $\sigma_B = 400...500$ МПа	0,666-1,0	0,5-0,833	0,06-0,20
Сталь, $\sigma_B = 600...800$ МПа	0,333-0,666	0,333-0,50	0,04-0,20
Латунь, легкие сплавы	0,666-1,50	0,625-1,33	0,04-0,30

Диаметр отверстия под резьбу при раскатке

$$d_3 = \sqrt{d_0^2 \left( 0,5 - \frac{2d_0}{3P \tan \alpha} + \frac{d_{cp}}{P \tan \alpha} \right) + d_1^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{2d_1}{3P \tan \alpha} - \frac{d_{cp}}{P \tan \alpha} \right)} ,$$

где  $d_0$  и  $d_{cp}$  - наружный и средний диаметр раскатника, мм;  $d_1$  - номинальный внутренний диаметр резьбы, мм;  $P$  - шаг резьбы, мм;  $\alpha$  - угол профиля резьбы.

Накатывание резьб имеет следующие преимущества по сравнению с резьбонарезанием:

обеспечивает высокую производительность и экономию металла до 25 %;

образует более прочную и износостойкую резьбу за счет упрочнения (наклепа) ме-

талла при пластическом деформировании волокон без их перерезания.

**Обработка фасонных поверхностей.** Фасонные поверхности деталей:

алгебраические, т.е. описываемые математическими уравнениями (линейчатые, нелинейчатые, винтовые);

с числовыми табличными координатами для отдельных точек (профили пера лопаток и т.д.);

конструктивные, обусловленные конструктивной необходимостью;

переходные поверхности (радиусные переходы от хвостовой части к рабочей у лопатки турбины и др.).

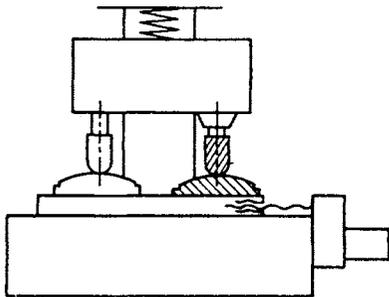
В крупносерийном и массовом производствах для обработки наружных и внутренних фасонных поверхностей на универсальных и агрегатных станках, полуавтоматах, автоматах, автоматических линиях, на гибких модулях с ЧПУ применяют:

призматические и круглые фасонные резцы для заготовок с различной формой образующей;

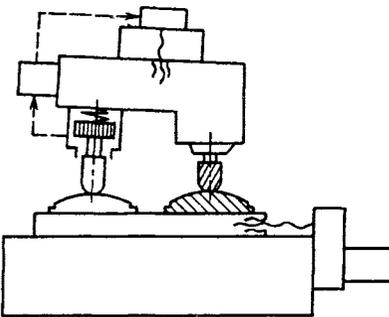
фасонные фрезы;

протяжки для фасонных тел вращения и отверстий; (в трех выше отмеченных случаях форма режущих кромок инструментов совпадает с фасонным профилем заготовок);

способ копирования при прямом (рис. 2.2.25, а) и непрямом (рис. 2.2.25, б) действии копировального ролика (пальца) и копира. В первом случае контакт осуществляется силами тяжести груза, гидравлического давления или сжатия пружины, а во втором - через гидравлическое, пневматическое или электронное управление.



а)



б)

Рис. 2.2.25. Схемы копирования при обработке фрезерованием фасонных поверхностей:  
а - прямое взаимодействие ролика и копира;  
б - не прямое взаимодействие ролика и копира

Наиболее широко применяется гидрокопирование, включая объемное копирование и копирование с передачей движения в масштабе путем сочетания копиров с рычажными механизмами - пантографами. В ряде случаев роль копиров выполняют так называемые построители в виде отдельных механизмов или устройств на основе сложных электрических схем;

метод настроенных кинематических цепей, связывающих вращение обрабатываемой заготовки или режущего инструмента с вспомогательным перемещением заготовки или инструмента.

В единичном, мелкосерийном и серийном производствах обработку заготовок с фасонными поверхностями целесообразно осуществлять на станках с программным управлением. Обоснованный экономический выбор вида автоматизированного оборудования можно производить с помощью рис. 2.2.26. Применяемые схемы установки заготовок с фасонными поверхностями на токарных станках с ЧПУ регламентированы ГОСТ 3.1107.

Реализация обработки фасонных заготовок на токарных, фрезерных и многоцелевых станках с ЧПУ осуществляется в следующей последовательности:

разрабатывается технологический процесс;

рассчитывается управляющая программа на основе расчетно-технологической карты и записи программы (рис. 2.2.27);

проводится контроль управляющей программы на координатографе и вносятся необходимые исправления;

проводится пробная обработка детали на станке с ЧПУ;

осуществляется контроль обработанной детали и вносятся исправления в программу расчета и в технологический процесс;

проводится обработка партии деталей.

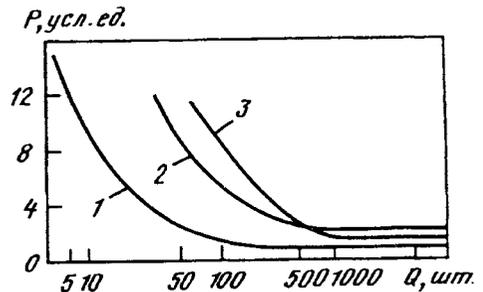


Рис. 2.2.26. Зависимости стоимости единицы продукции от размеров партии и вида оборудования  
1 - автомат с ЧПУ; 2 - автомат с ЦПУ;  
3 - кулачковый автомат

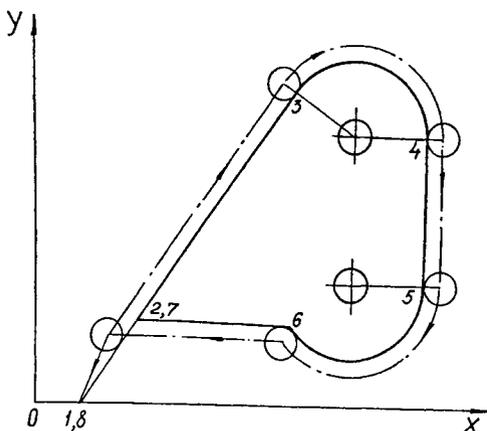


Рис. 2.2.27. Траектория движения фрезы по контуру

При обработке сложных фасонных поверхностей для увеличения стойкости инструмента и повышения качества обработки необходимо станки оснащать системами автоматического управления, обеспечивающими постоянство скорости резания, круговой подачи, сил и температур резания в любой зоне обрабатываемой фасонной поверхности путем автоматического регулирования частоты вращения заготовки или инструмента независимо от причин, которые могут вызвать изменение сил или температур резания (переменный радиус и осевой профиль фасонной поверхности, износ инструмента, переменность припуска и физико-механических свойств материала заготовки и др.). Такие системы повышают стабильность физических критериев оптимизации и надежность технологического процесса в целом, обеспечивая высокую производительность и качество обработки.

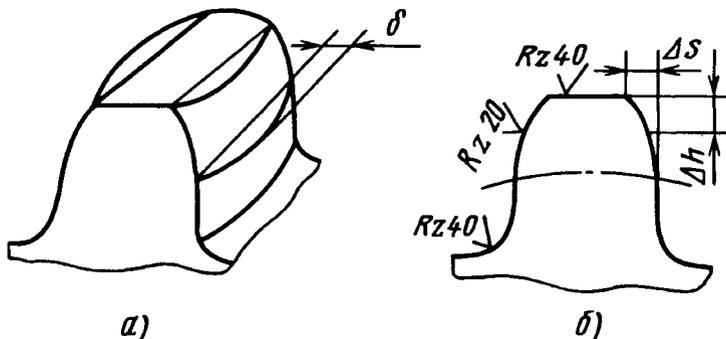


Рис. 2.2.29. Модификации зуба:  
а - бочкообразность; б - фланкирование ( $\Delta s$ ,  $\Delta h$  - параметры фланка)

### 2.2.6. ОБРАБОТКА ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

По функциональному признаку на каждом профиле зубьев выделяют три участка по высоте: вершинный (а), активный (б) и переходный (в) (рис. 2.2.28, а). Аналогично по длине: центральный (II) и боковые, или периферийные (I, III на рис. 2.2.28, б).

Требования к геометрии, свойствам поверхностных и внутренних слоев материала каждого из трех участков различны. Возможны модификации, соответствующие табл. 2.2.52. Наибольшее распространение получили модификации зуба: - бочкообразность  $\delta$  (рис. 2.2.29, а) и фланкирование (рис. 2.2.29, б):

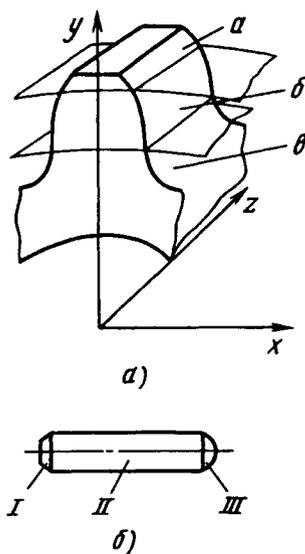


Рис. 2.2.28. Выделяемые участки боковой поверхности зуба по функциональному назначению

## 2.2.52. Модификация зубьев

Модифицируемый профиль							
Левый		Правый			Левый и правый		
Участок, где осуществляется модификация							
Вершинный	Активный	Переходной	Вершинный и активный	Вершинный и переходной	Активный и переходной	Вершинный, активный и переходной	
Центральный и периферийные				Центральный и периферийные			
Объект модификации							
Геометрия	Поверхностные свойства	Внутренние свойства	Геометрия и поверхностные свойства	Геометрия и внутренние свойства	Поверхностные и внутренние свойства	Геометрия, поверхностные и внутренние свойства	
Направление и распространение модификации (оси $x$ , $y$ и $z$ на рис. 2.2.28)							
По оси $x$	По оси $y$	По оси $z$	По осям $x$ и $y$	По осям $x$ и $z$	По осям $y$ и $z$	По осям $x$ , $y$ и $z$	
Расположение относительно номинала							
совпадает	ниже	выше	совпадает и ниже	совпадает и выше	выше и ниже	совпадает ниже и выше	
Закон изменения характеристики модификации							
Линейный				Нелинейный			
Симметричный		Асимметричный		Симметричный		Асимметричный	
Периодический	Апериодический	Периодический	Апериодический	Периодический	Апериодический	Периодический	Апериодический

поверхностных свойств - меньшая шероховатость на активных участках профиля в сравнении с вершинными и переходными участками;

свойств внутренних слоев - более высокая твердость слоев, прилегающих к поверхностям по сравнению с твердостью сердцевины.

Поверхности активных участков зубьев представляют собой одно- или многопараметрические огибающие, имеющие в общем случае двойную кривизну. Для вершинных и переходных участков это требование является не обязательным.

Точность выполнения геометрии активных участков зубьев должна соответствовать одной из 12 степеней. Регламентируются показатели кинематической точности, плавности работы передачи, пятна контакта и бокового зазора. Наиболее точные колеса относятся к 1-й степени точности.

Параметры шероховатости поверхностей зубьев, как правило находятся в пределах от Rz 140 до Ra 0,1 мкм; твердость материала в состоянии поставки до HRC $\geq$ 62. Глубина и степень наклепа, их расположение на зубьях определяются условиями эксплуатации передачи.

Применяются зубчатые колеса, размеры которых составляют от 1...2 мм до 20...30 мм.

В основе методов обработки зубьев зубчатых колес лежат физические и химические эффекты взаимодействия заготовок с полями, средами или твердыми телами.

С помощью полей обеспечивают отдельные свойства внутренних и поверхностных слоев, а с помощью сред и твердых инструментов еще и геометрию зубьев.

Наиболее часто воздействием полей обеспечивают:

термическую обработку для изменения твердости материала;

магнитную обработку для размагничивания;

рентгенографический контроль внутренних слоев материала зубьев.

Воздействие на заготовки средами осуществляется путем контактирования заготовок с жидкостями, газами, сыпучими веществами или их комбинациями, в том числе в совокупности с воздействием полями.

Широкое распространение получили:

химико-термическая обработка для изменения твердости и иных механических свойств материала зубов;

гальваническая обработка для нанесения защитных покрытий;

окунение в смазочные материалы для повышения коэффициента полезного действия передачи и обеспечения требуемого ресурса;

электрохимическое полирование для повышения эксплуатационных свойств передачи;

термоимпульсная обработка для удаления заусенцев;

песко- или дробеструйная обработка для удаления окалины;

гидродробеструйная обработка для создания поверхностного наклепа на активных и переходных участках зубьев.

Твердыми телами проводят черновую, получистовую, чистовую и отделочную механическую обработку зубьев.

При лезвийной механической обработке применяют методы геометрического образования поверхностей, когда образующие профилей зубьев и их направляющие формируются копированием, обкатом, образуются как след или путем касания.

Сочетание методов геометрического образования поверхностей и видов процессов изготовления зубчатых колес позволяют обеспечивать уровни концентрации технологического воздействия согласно табл. 2.2.53.

Указанные уровни могут применяться при изменении геометрии, поверхностных или внутренних свойств зубьев, что может вестись как последовательно, так и параллельно, в любом сочетании. Например, при накатывании зубьев проводится одновременно изменение геометрии, поверхностных и внутренних слоев. То же имеет место при термомеханической обработке.

Табл. 2.2.54 содержит перечень и основные характеристики наиболее распространенных лезвийных методов механической обработки зубьев основных видов зубчатых колес.

Для обработки торцовых поверхностей зубьев применяют:

снятие фасок плавающим дисковым шлифовальным кругом, червячной фрезой-улиткой, конусной фрезой и многозубым инструментом с коническими зубьями;

закругление торцов зубьев пальцевыми фрезами, дисковыми фрезами или пустотелыми конусными торцовыми фрезами.

Продольные кромки зубьев обычно при- тупляют червячной фрезой, долбяком или иным инструментом специального контура одновременно с обработкой основных участков зубьев.

**2.2.53. Уровни концентрации технологического воздействия**

Объект приложения технологического воздействия	Уровень концентрации (название схемы)					
	Совокупность партий	Поочередная		Частично-одновременная		Одновременная
Партия	Однодетальная		Двухдетальная		Многодетальная	
Комплекс зубчатых венцов	Несовмещенная		Частично совмещенная		Совмещенная	
Зубчатый венец	Последовательная		Частично-параллельная		Параллельная	
Зуб	Односторонняя			Двусторонняя		
Сторона зуба	Раздельная		Частично объединенная		Объединенная	
Участок зуба	Прерывистая	Полупрерывистая	Единовременнопрывистая	Непрерывная	Единовременнопровывная	Единовременная

**2.2.54. Методы механической обработки зубчатых колес**

Метод	Вид инструмента	Особенности движений	Точность обработки	Назначение метода
-------	-----------------	----------------------	--------------------	-------------------

**Цилиндрические зубчатые колеса**

<b>Зубофрезерование червячной фрезой</b>	Червячная фреза многовитковая цилиндрическая	Обкат $S_{и} = 0$ при осевом фрезеровании; $S_{и} \neq 0$ при диагональном фрезеровании	11-6 (ГОСТ 1643)	Нарезание мелко- и среднемодульных колес наружного зацепления с открытыми венцами (в т.ч. и червяков)	
	Червячная фреза глобоидная	Обкат	11-8 (ГОСТ 1643)	Нарезание и отделочная обработка крупномодульных колес	
	Червячная фреза одновитковая бочкообразная	Обкат		Нарезание колес внутреннего зацепления	
<b>Зубодолбление</b>	Круговое с параллельными осями	Зуборезный долбяк	Обкат	11-7 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес наружного и внутреннего зацепления с закрытыми венцами, в т.ч. шевронных
	Круговое на скрещивающихся осях	Зуборезный долбяк	Обкат	11-7 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес наружного зацепления с частично закрытыми венцами. Нарезание колес внутреннего зацепления

Продолжение табл. 2.2.54

Контурное	Головка для контурного зубодолбления	Копирование	11-10 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес внутреннего зацепления
Круговое-контурное	Головка для контурного зубодолбления	Деление, копирование	10-8 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес внутреннего зацепления
Зуботочение	Головка для зуботочения	Обкат	11-9 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес наружного зацепления, в т.ч. червяков
	Головка для зуботочения	Обкат	11-9 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес с увеличенным числом зубьев внутреннего зацепления
Зубопротягивание	Протяжка	Копирование	11-8 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес с малым числом зубьев внутреннего зацепления с открытыми венцами
	Круговое	Круговая протяжка с резцом	11-8 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес наружного зацепления с открытым венцом
	Кругодиagonalное	Круговая протяжка	11-8 (ГОСТ 1643)	То же
	Роторное (вихревое)	Круговая протяжка внутреннего зацепления	11-8 (ГОСТ 1643)	Нарезание узких колес с бочкообразными зубьями и червяков
Зубострогание	Зуборезная гребенка	Деление	11-8 (ГОСТ 1643)	Нарезание колес с малым числом зубьев и нарезание крупномодульных колес
Зубофрезерование пальцевой фрезой	Пальцевая модульная фреза	Деление	11-10 (ГОСТ 1643)	То же
Зубофрезерование дисковыми фрезами	Одной фрезой	Деление	11-10 (ГОСТ 1643)	- » -
	Набором фрез			
Зубофрезерование тарельчатыми фрезами	Дисковая трехсторонняя фреза	Деление	11-10 (ГОСТ 1643)	Нарезание зубчатых колес наружного зацепления с открытым венцом
Зубофрезерование роторное	Дисковая модульная фреза внутреннего зацепления	Деление	11-10 (ГОСТ 1643)	Нарезание малогабаритных зубчатых колес наружного зацепления с бочкообразным зубом

Продолжение табл. 2.2.54

Зубошлифование	Шевер	На параллельных осях На скрещивающихся осях Тангенциальная (диагональная) Метод короткого хода Осевое	10-6 (ГОСТ 1643) (зависит от исходной точности)	Чистовая обработка зубчатых колес с твердостью до 40 HRC, в том числе с врезными и закрытыми венцами
<b>Конические зубчатые колеса</b>				
Строгание	Строгальные резцы: а) с прямолинейными кромками; б) с эвольвентными кромками	Деление	10-8 (ГОСТ 1758)	Нарезание конических колес с прямыми и косыми (тангенциальными) зубьями
Фрезерование трехсторонними фрезами	Фрезы трехсторонние	Деление	10-8 (ГОСТ 1758)	То же

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евгеньев Г.Б.** Основы программирования обработки на станках с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1983. 304 с.

2. **Качество машин:** Справочник в 2 т. Т. 2 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.

3. **Качество машин:** Справочник в 2 т. Т. 2 / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. 430 с.

4. **Колесов И.М.** Основы технологии машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1997. 292 с.

5. **Краткий справочник металлста** / Под общ. ред. П.Н. Орлова и С.И. Сороходова. М.: Машиностроение, 1986. 960 с.

6. **Кудевичкий Я.В.** Фасонные фрезы. Л.: Машиностроение, 1978. 171 с.

7. **Машиностроение.** Энциклопедия. Т. IV-3. Надежность машин / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др. Под общ. ред. В.В. Клюева, 1998. 522 с.

8. **Металлообрабатывающий** твердосплавный инструмент: Справочник. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.

9. **Миропольский Ю.А., Луговой Э.П.** Накатывание резьб и профилей. М.: Машиностроение, 1976. 145 с.

10. **Протяжки** для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.И. Ашихмин и др. М.: Машиностроение, 1986. 230 с.

11. **Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л.** и др. Металлорежущие инструменты. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.

12. **Силин С.С.** Метод подбора при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. С. 135-143.

13. **Справочник** технолога-машиностроителя / Под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. Т. 1. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.

14. **Справочник** технолога-машиностроителя / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. Т. 2. М.: Машиностроение, 1986. 496 с.

15. **Станки с числовым программным управлением (специализированные)** / Под ред. В.А. Лещенко. М.: Машиностроение, 1979. 592 с.

16. **Суслов А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.

17. **Технология машиностроения:** В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др. Под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 564 с.

18. **Токарные инструменты.** Резцы для наружного точения. Каталог фирмы. Сандвик. Коромант. С. 1000:2. Швеция, 1986. 265 с.

19. **Трект Е.М.** Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263.

20. **Черпаков Б.И., Земляной В.В., Феофанов А.Н.** и др. Гибкие автоматизированные линии массового и крупносерийного производства / Под ред. Б.И. Черпакова. М.: Высшая школа, 1989. 112 с.

21. **Юликов М.И., Горбунов Б.И., Колесов Н.В.** Проектирование и производство режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1987. 296 с.

## Глава 2.3

### АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

#### 2.3.1. ШЛИФОВАНИЕ

Под абразивной обработкой понимают финишную обработку резанием, которая осуществляется с помощью абразивных зерен в виде монокристаллов, поликристаллов или их осколков. Абразивную обработку можно разделить на два основных вида — на обработку связанным и свободным абразивом.

Основными методами абразивной обработки являются: шлифование, хонингование, суперфиниширование, доводка, полирование. Кроме того, имеется несколько методов гидро- и струйно-абразивной и виброабразивной обработки. Применяется также комбинированная обработка, сочетающая абразивное резание с электрохимическими методами.

**Шлифование** — абразивная обработка, при которой инструмент (шлифовальный круг) совершает только вращательное движение, которое является главным движением, а заготовка — любое требуемое движение, при котором осуществляется удаление припуска с заготовки.

**Доводка** выполняется посредством абразивных составов и жестких притиров, имеющих форму обрабатываемой поверхности или ее образующей. Процесс доводки происходит при сложных перемещениях детали относительно притира или наоборот, в результате абразивные зерна в зоне резания снимают с детали тончайшую стружку. Доводка — физико-химический процесс взаимодействия элементов технологической среды.

**Полирование** — финишная операция, с помощью которой полируют поверхности до малой шероховатости с комплексом требуемых эксплуатационных свойств.

**Струйно- и гидроабразивные обработки** обеспечиваются относительным перемещением свободных абразивных зерен за счет энергии жидкости или газа.

**Виброабразивная обработка** — обработка, при которой относительное движение заготовки и абразивных зерен осуществляется вибрационной машиной.

В зависимости от формы обрабатываемой поверхности заготовки различают шлифование: наружное, внутреннее, плоское, круглое, профильное, зубошлифование, шлицешлифование, резьбошлифование, сферошлифование, заточка, затыловочное шлифование.

В зависимости от технологической базы при обработке различают: шлифование в центрах, в патроне, бесцентровое.

В зависимости от формы и расположения рабочей поверхности шлифовального

круга различают шлифование: периферией круга, торцом круга, многократное несколькими кругами одновременно, одно- и многопрофильное резьбошлифование.

В зависимости от интенсивности съема металла в единицу времени, приведенной к единице длины контактной линии круга с заготовкой {приведенная объемная интенсивность съема ( $\text{мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{мин})$ )}, различают наружное шлифование:

обдирочное 1000 — 2500;  
предварительное 200 — 500;  
получистовое 80 — 200;  
окончательное 30 — 80;  
тонкое 10 — 30.

**Технология круглого наружного шлифования.** Операция круглого наружного шлифования предназначена для обработки наружных поверхностей деталей типа тел вращения с прямолинейными образующими. В качестве технологической базы используют центровые отверстия или наружные центровые поверхности. Для зажима заготовок на станке служат патроны и оправки различных видов и конструкций, поводковые и другие приспособления.

Главным движением (как и при любом виде шлифования) является вращение инструмента — шлифовального круга, а движение подачи, обеспечивающее съем металла со всей обрабатываемой поверхности, выполняется при различных видах круглого наружного шлифования по-разному. В зависимости от направления поступательного движения подачи различают несколько способов шлифования (рис. 2.3.1). Врезное шлифование (рис. 2.3.1, а-в) обеспечивается движением подачи только в одном направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности заготовки, которая шлифуется при ее вращательном движении. Осциллирующее шлифование (рис. 2.3.1, г, д), при котором шлифовальный круг или заготовка наряду с вращательным движением совершают возвратно-поступательное движение, предназначено для обработки поверхностей значительной длины, превышающей высоту шлифовального круга. Шлифование уступами (рис. 2.3.1, е): иногда такой способ называют комбинированным шлифованием, является комбинацией врезного и осциллирующего шлифования. Отдельные участки шлифуемой поверхности (уступы) обрабатывают последовательно врезанием круга; уступы при этом должны перекрывать друг друга.

Глубинное шлифование может быть с продольной подачей и врезным (рис. 2.3.1, ж и з). При глубинном шлифовании с продольной подачей весь или почти весь припуск снимают за один проход инструмента. Шлифовальный круг при этом правят ступенькой

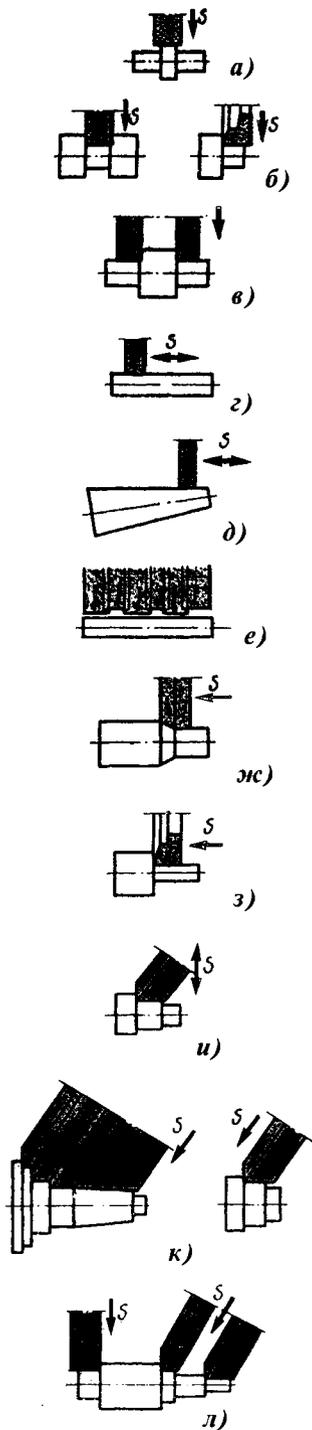


Рис. 2.3.1. Схемы круглого наружного шлифования

или на конус. При глубинном врезном шлифовании заготовке сообщают медленное вращение. При этом шлифовальный круг с увеличенной подачей врезается в заготовку на всю или почти всю величину припуска, а за время одного оборота заготовки весь припуск снимается. Схема обработки аналогична обычному врезному шлифованию периферией круга.

Как вариант круглого наружного шлифования можно рассматривать и многокруговое шлифование — обработку одной или нескольких поверхностей одной и той же заготовки или нескольких заготовок несколькими шлифовальными кругами одновременно (рис. 2.3.1, и-л). При многокруговом шлифовании нескольких поверхностей подача круга осуществляется перпендикулярно оси заготовки или под некоторым углом к ней.

Выбор способа шлифования зависит от типа производства, особенностей конструкции деталей, снимаемого припуска и требований к точности и качеству обработки.

Наиболее характерным методом шлифования является осциллирующее шлифование, при котором припуск снимается постепенно: за несколько продольных проходов стола при большой частоте вращения заготовки. Наиболее часто заготовки шлифуют при параллельном расположении осей заготовки и шлифовального круга, реже — при пересекающихся осях.

Тонкое шлифование предназначено для получения малой шероховатости обрабатываемой поверхности (параметр  $Ra = 0,025 \dots 0,1$  мкм). Снимаемый припуск при тонком шлифовании 0,05–0,10 мм на диаметр.

Для обеспечения требуемых качества поверхности и точности деталей при круглом шлифовании заготовка перед обработкой должна иметь припуск, который удаляется в процессе обработки. Общий припуск, т.е. слой, удаляемый в процессе обработки заготовки, полученной литьем, ковкой и прочими способами, удаляется за несколько технологических операций.

В единичном производстве шлифование обычно выполняется в одну операцию: в массовом и серийном производстве обработка ведется в одну, две операции и более в зависимости от припуска, требований к точности и качеству поверхности.

Выбрав в зависимости от размеров детали, припуска на обработку, требований к параметрам шероховатости поверхности, точности обработки, характеристик станка и шлифовального круга, определенной интенсивности съема металла, — можно назначить окружную скорость заготовки  $v_3$ , продольную пода-

чу  $S_0$  и подачу на глубину шлифования (поперечную подачу)  $t$ . Обычно режимы шлифования приводят в справочных таблицах (нормативах) режимов резания и времени обработки. По табл. 2.3.1. можно ориентиро-

вочно назначить режимы круглого шлифования, когда требования к точности и параметрам шероховатости поверхности не регламентированы. Последовательность выбора подач в таблице показана стрелками.

### 2.3.1. Режимы круглого наружного шлифования заготовок из незакаленной стали

Продольная подача на один оборот детали (в долях высоты круга)			Скорость вращения заготовки, м/мин						
0,5			10-12,5	16	20	25	32	—	—
0,63			—	10-12,5	16	20	25	32	—
0,8			—	—	10-12,5	16	20	25	32
Диаметр шлифуемой поверхности, мм	Скорость вращения заготовки, м/мин	Частота вращения заготовки, мин <sup>-1</sup>	Поперечная подача на ход стола, мм/ход						
			0,019	0,015	0,012	0,0099	0,008	0,006	0,005
16-25	10-24	200-305	0,019	0,015	0,012	0,0099	0,008	0,006	0,005
25-40	10-26	125-210	0,022	0,017	0,014	0,011	0,009	0,007	0,005
40-63	11-28	85-140	0,026	0,021	0,016	0,013	0,010	0,008	0,006
80	20	85							
63-100	12-28	60-90	0,030	0,024	0,019	0,015	0,012	0,009	0,007
100-160	13-30	40-60	0,035	0,028	0,022	0,017	0,014	0,011	0,008
160-250	15,5-32	31-41	0,040	0,032	0,025	0,02	0,016	0,012	0,010
Св. 250	16-34	20-34	0,046	0,036	0,029	0,023	0,018	0,014	0,011

В зависимости от диаметра шлифуемой поверхности (в табл. 2.3.1 80 мм) выбирают скорость вращения заготовки (20 м/мин), назначают продольную подачу стола (0,63  $H$ , где  $H$  - высота шлифовального круга, мм) и определяют рекомендуемую подачу на глубину шлифования (0,015 мм/ход стола). Если поперечная подача осуществляется на двойной ход стола, то табличное значение удваивают.

Выбранные значения параметров режима шлифования следует уточнить с паспортными или фактическими значениями в зави-

симости от частоты вращения соответствующих шпинделей.

При выборе режимов шлифования для конкретных условий обработки приходится учитывать много факторов. Основными являются требования, предъявляемые к точности шлифования, параметрам шероховатости обработанной поверхности, конструктивные особенности детали, механические свойства материала, тип производства. По табл. 2.3.2 можно ориентировочно выбрать режимы круглого наружного шлифования в центрах.

### 2.3.2. Режимы круглого наружного шлифования в центрах

Шлифование	Продольная подача в долях ширины круга	Окружная скорость заготовки, м/мин	Подача на глубину шлифования		
			мм/мин	мм/ход стола	мм/дв. ход стола
Врезное:	предварительное	30-50	0,10-0,50	—	—
	окончательное	20-40	0,05-0,20	—	—
С продольной подачей:	предварительное	15-30	—	0,010-0,025	0,015-0,050
	окончательное	20-60	—	0,005-0,010	0,005-0,010

**Технология внутреннего круглого шлифования.** Внутреннее круглое шлифование предназначено для обработки внутренних поверхностей цилиндрической или конической формы с прямолинейной образующей. На внутришлифовальных станках отверстия обрабатывают следующими методами: шлифованием с продольной подачей (рис. 2.3.2, а, б); врезным шлифованием (рис. 2.3.2, в, г); врезным шлифованием (рис. 2.3.2, в) с дополнительным осциллирующим движением круга; шлифованием с планетарным движением шлифовального круга (рис. 2.3.2, д).

Шлифование с продольной подачей обеспечивает более высокую точность и меньшие параметры шероховатости поверхности. Врезной способ используется при обработке коротких (рис. 2.3.2, в) и глухих отверстий, не имеющих канавок для выхода круга. При планетарном движении шлифовальный шпиндель с кругом 1 помимо вращения вокруг своей оси имеет вращательное движение относительно оси шлифуемого отверстия заготовки 2 от специального устройства станка. Этот метод применяют в основном для шлифования отверстий в тяжелых корпусных деталях, устанавливаемых на станке неподвижно.

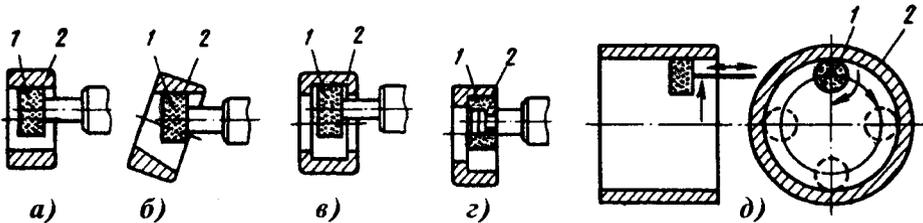


Рис. 2.3.2. Схемы круглого внутреннего шлифования

Особенностями внутреннего шлифования, ограничивающими его возможности, являются: малый диаметр шлифовальных кругов; малая жесткость шлифовального шпинделя; необходимость применения очень высокой частоты вращения шпинделя шлифовального круга для обеспечения оптимальной скорости резания; большой линейный износ кругов из-за малых размеров рабочей поверхности круга. В связи с этими особенностями диаметр шлифовального круга следует выбирать наибольшим из допустимых по условию размещения его в отверстии: 0,75...0,85 диаметра отверстия для диапазона 50...150 мм и 0,85...0,95 диаметра отверстия для диапазона 30...45 мм.

Дополнительные трудности возникают при внутреннем шлифовании с подачей СОЖ в зону обработки, так как поверхности круга и заготовки соприкасаются по дуге большей длины, а зазор между ними мал. Для отвода теплоты из зоны обработки и предотвращения появления прижогов на шлифуемой поверхности применяют подачу СОЖ через специальные сопла, расположенные близко к зоне резания, или через поры круга.

По способу крепления заготовок на внутришлифовальных станках последние делят на патронные и бесцентровые. При патронном внутреннем шлифовании технологической базой является наружная поверхность заготовки, а базирование и закрепление ее проводится патроном. При внутреннем бесцентровом шлифовании технологической базой является наружная ранее обработанная цилиндрическая поверхность.

При шлифовании тонкостенных заготовок типа колец и гильз целесообразно пользоваться схемой бесцентрового внутреннего шлифования. Форма отверстия при способе внутреннего шлифования в основном зависит от формы наружной поверхности заготовки и наладки станка.

Учитывая малую жесткость шпинделя шлифовального круга и его небольшой диаметр, необходимо так проектировать технологический процесс, чтобы припуск на обработку был бы наименьшим. При определении предельных размеров припуска приходится учитывать размеры и форму отверстия, обрабатываемый материал, отношение длины шлифуемой поверхности к диаметру отверстия, характер термической обработки и другие производственные условия. С возрастанием диаметра и длины отверстия припуск следует также увеличивать.

При обработке тонкостенных заготовок, а также заготовок, подверженных короблению при термической обработке, следует увеличивать припуск на 20...50% по сравнению с рекомендуемыми в табл. 2.3.3.

При выборе характеристики кругов для внутреннего шлифования справедливы общие рекомендации. При предварительном шлифовании используют круги зернистостью 40, при окончательном — зернистостью 25-16. При шлифовании заготовок из чугуна, алюминия и его сплавов применяют крупнозернистые круги: при предварительном шлифовании зернистостью 50-40, при окончательном шлифовании — зернистостью 40-25.

## 2.3.3. Припуски (по диаметру) на шлифование отверстий (в мм)

Диаметр шлифуемого отверстия, мм	Длина отверстия, мм					
	До 25	26–50	51–100	101–150	151–200	свыше 200
До 10	0,07–0,10	0,10–0,12	–	–	–	–
От 10 до 30	0,12–0,15	0,12–0,18	0,15–0,22	0,20–0,25	0,22–0,27	–
» 30 » 80	0,15–0,25	0,20–0,30	0,25–0,30	0,25–0,35	0,27–0,40	0,30–0,45
» 80 » 120	0,25–0,30	0,25–0,35	0,28–0,38	0,30–0,38	0,35–0,45	0,40–0,55
» 120 » 180	0,30–0,35	0,30–0,40	0,40–0,45	0,40–0,45	0,45–0,55	0,50–0,60
Св. 180	0,40–0,50	0,45–0,55	0,45–0,55	0,50–0,60	0,60–0,70	0,65–0,75

При шлифовании различных сталей применяют круги из электрокорундов марок 15А, 24А, 34А; при шлифовании чугуновых и алюминиевых заготовок — карбид кремния черный марок 53С, 54С. Связка обычно применяется керамическая марок К1, К5, К8. Круги, как правило, должны иметь структуру №5 и твердость СМ2-СТ1 при шлифовании заготовок из незакаленных сталей и М3-СМ2 — при шлифовании заготовок из закаленных сталей, чугунов и алюминиевых сплавов.

Слишком твердые и мелкозернистые круги требуют очень частой правки и дают прижоги. Однако при использовании мягких кругов наблюдается большой износ круга, а иногда не удается обеспечить требуемую точность и параметры шероховатости поверхности.

Скорость круга следует применять наибольшую, допускаемую частотой вращения шпинделя. Рекомендуется назначать скорости (м/с) круга в следующих пределах в зависимости от марки обрабатываемого материала:

Стали углеродистые и низколегированные .....	25–60
Стали закаленные и высоколегированные .....	15–25
Чугун .....	20–30
Цветные сплавы .....	20–30
Пластмассы и резина .....	15–20
Стекло .....	8–12

Частота вращения заготовки зависит от диаметра шлифуемого отверстия. Скорость заготовки должна составлять 0,015–0,03 скорости круга и выбираться в пределах 10 ... 60 м/мин при обдирочном шлифовании и 12 ... 110 м/мин — при окончательном шлифовании. При шлифовании материалов, склонных к прижогам и трещинам, увеличивают частоту вращения заготовки. Продольную подачу выбирают в долях от высоты

круга  $H$ : при обдирочном шлифовании (0,5 ... 0,8)  $H$ , при окончательном шлифовании (0,25 ... 0,5)  $H$ . Поперечную подачу при врезном шлифовании выбирают в пределах 0,10 ... 0,8 мм/мин; продольная подача при обдирочном шлифовании — 0,005 ... 0,015 мм/дв. ход и 0,001 ... 0,01 мм/дв. ход — при окончательном шлифовании.

**Технология плоского шлифования.**

Шлифование плоских поверхностей называется *плоским шлифованием*. Существует два основных вида плоского шлифования: периферией круга и его торцом. Шлифование периферией круга обеспечивает более высокую точность обработки по сравнению со шлифованием торцом круга и поэтому его рекомендуется применять при высоких требованиях к точности обработки, малой жесткости деталей, а также при обработке закаленных деталей, склонных к образованию прижогов.

Периферией круга обрабатывают детали с жесткими допусками на отклонения от плоскостности (контрольные плиты, угольники, линейки, стыки ответственных деталей и др.); с буртиками и пазами; тонкие детали, подверженные короблению; детали, имеющие недостаточно жесткую опорную поверхность, что приводит к неустойчивому положению их на станке, а также такие детали, на торце которых следует сделать поднутрение или создать выпуклость и др.

Торцом круга можно обрабатывать литые крышки, планки кованные или изготовленные из проката, корпуса коробчатого сечения, заготовки напильников, штамповые кустики и другие детали, предварительно не обработанные; сегменты уборочных сельскохозяйственных машин, лемеха плугов и др.; шайбы, кольца, диски, втулки, фланцы и другие детали массового производства, преимущественно имеющие форму тел вращения.

Основными технологическими факторами, определяющими режим шлифования,

являются заданные точность и параметры шероховатости поверхности, мощность двигателя главного привода и стойкость шлифовального круга.

Показателями режима резания при плоском шлифовании периферией круга являются скорость круга; скорость заготовки; поперечная (параллельная оси шпинделя) подача и глубина шлифования (при шлифовании торцом круга поперечную подачу обычно не используют).

Скорость шлифовального круга зависит от материала заготовки, вида (обычное или скоростное) шлифования и возможностей станка. Скорость заготовки совпадает при плоском шлифовании с продольной или круговой подачей стола, на котором она закрепляется. Увеличение скорости заготовки приводит к повышению производительности обработки. Поэтому рекомендуется выбирать высокие скорости заготовки, особенно при предварительных операциях и снятии больших припусков. Повышение скорости заготовки приводит к уменьшению нагрева и деформации заготовки. На окончательных операциях рекомендуется снижать скорость заготовки.

**Технология бесцентрового круглого наружного шлифования.** Сущность метода бесцентрового шлифования заключается в том, что заготовка 3 (рис. 2.3.3, а) в процессе обработки не закрепляется в центрах, а базируется обрабатываемой (или обработанной ранее) поверхностью на ведущем круге 1 и опорном ноже 2. Шлифовальный круг 4 и ведущий круг 1 вращаются в одном направлении, но с разной окружной скоростью. Окружная скорость ведущего круга в 50-60 раз ниже окружной скорости шлифовального круга. Ведущий круг, как правило, абразивный на вулканитовой связке; иногда применяют металлические ведущие круги (стальные или чугунные). Сила трения между шлифовальным кругом и заготовкой меньше, чем с ведущим кругом, поэтому окружная скорость заготовки близка к окружной скорости ведущего круга. Опорная поверхность ножа скошена под углом 20-30° к линии, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов (линии центров), и, как правило, для уменьшения износа армируется твердым сплавом.

Существуют три основных метода обработки заготовок на бесцентрово-шлифовальных станках: 1) шлифование напроход с продольной подачей заготовки (рис. 2.3.3, б); шлифование до упора (рис. 2.3.3, в); 3) врезное шлифование (рис. 2.3.3, г).

Бесцентровое шлифование напроход (рис. 2.3.3, б) применяется для обработки гладких цилиндрических деталей типа колец

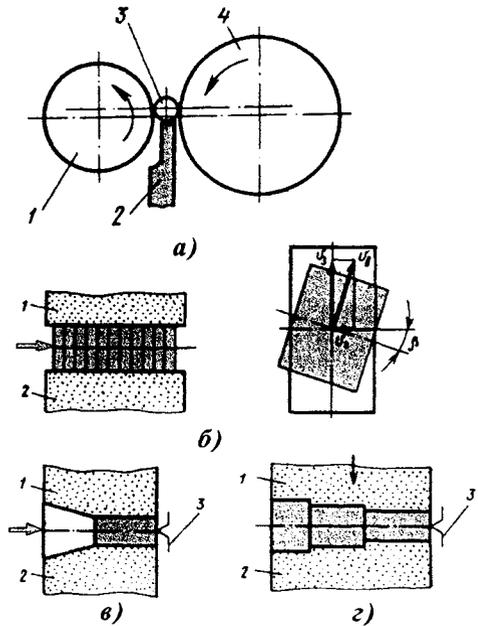


Рис. 2.3.3. Схемы бесцентрового шлифования

подшипников, втулок, поршневых пальцев, толкателей клапанов и др. Для обеспечения продольного перемещения детали ось ведущего круга располагается в вертикальной плоскости под углом  $\beta = 0 \div 8^\circ$  к оси шлифовального круга; при этом скорость продольной подачи (м/мин) заготовки  $v_s = v_B h \sin \beta$ , а окружная скорость (м/мин) заготовки  $v_z = v_B h \cos \beta$ , где  $v_B$  - окружная скорость ведущего круга;  $\beta$  - угол поворота ведущего круга в вертикальной плоскости;  $h$  - коэффициент, учитывающий проскальзывание между ведущим кругом и заготовкой.

При бесцентровом шлифовании до упора (рис. 2.3.3, в) осевое перемещение заготовки осуществляется до упора, после чего ведущий круг отводится от детали в направлении, перпендикулярном ее оси, и обработанная деталь выгружается из рабочей зоны. Этот способ имеет ограниченное применение, в частности, для деталей с сочетанием цилиндрической и конической поверхностей.

Врезное бесцентровое шлифование (рис. 2.3.3, г) используется для обработки ступенчатых и профильных заготовок. Сущность метода заключается в том, что заготовка укладывается на нож и ведущий круг, после чего начинается перемещение шлифовального круга на заготовку или заготовки на шлифовальный

круг. В ряде случаев ведущий круг и опорный нож имеют ступенчатую форму в соответствии с профилем заготовки.

Бесцентровые станки применяют в подшипниковой, автомобильной, тракторной и металлургической промышленности. По сравнению с обработкой на центровых станках при бесцентровом шлифовании обеспечивается более высокая стабильность деталей по качеству и размерам, устраняются прогибы заготовки, что позволяет применять более напряженные режимы шлифования и снижать припуск на обработку. Сокращается или полностью совмещается время обработки и вспомогательное время, связанное с установкой и снятием деталей со станка, проверкой размеров и т.п.

При шлифовании напроход обеспечивается получение погрешностей формы в поперечном сечении до 2,5 мкм при шероховатости поверхности  $Ra = 0,32 \dots 0,16$  мкм. Для снижения параметров шероховатости поверхности на некоторых станках устанавливают два шлифовальных круга разной характеристики: крупнозернистый для снятия основной части припуска и мелкозернистый для уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности.

Большое внимание при обработке должно уделяться правке шлифовального круга. Для рационального распределения нагрузки в зоне контакта на режущей поверхности круга создают четыре основных участка, выполняющих разные функции (рис. 2.3.4). На участке входа заготовок формируется заборный конус 4 длиной 10 ... 30 мм с таким углом, который бы обеспечивал беспрепятственный и надежный вход в зону шлифования заготовок с предельной величиной припуска. Основную часть по высоте круга занимает рабочий конус 3, обеспечивающий равномерное распределение съема припуска по линии контакта заготовок с кругом. Калибрующая зона

2 выполняется при правке образующей параллельно оси круга на длину не более 100 мм, и предназначена для формирования заданных параметров шероховатости поверхности, требуемой точности размеров и формы. Четвертая зона 1 имеет обратную конусность, обеспечивающую правильный выход детали из зоны контакта с кругом. Обратный конус обычно имеет высоту 20 ... 30 мм.

Шлифовальные круги указанного профиля правят с помощью копирных линеек. При предварительном шлифовании с невысокими требованиями к качеству поверхности (параметр шероховатости  $Ra = 2,5 \dots 1,25$  мкм, допуск на размер до 0,1 мм) на круге выполняют только заборный и обратный конусы.

При бесцентровом шлифовании напроход для ввода заготовок в зону шлифования и вывода из нее служат направляющие линейки, установленные параллельно линии контакта заготовки со шлифовальным кругом.

При повороте линеек или их смещении относительно образующей ведущего круга геометрическая форма заготовок искажается: в основном в продольном сечении образуется конусообразность, седлообразность или бочкообразность.

При выборе характеристики шлифовальных кругов необходимо учитывать вид операции (предварительное, чистовое, доводочное шлифование), марку обрабатываемого материала, требования к параметрам шероховатости поверхности, состояние исходной заготовки, величину припуска и ряд других условий.

Для точного учета всех условий обработки следует пользоваться технологическими справочниками. Располагая технологическими параметрами, по таблицам, выбирают необходимую характеристику шлифовального круга по виду абразивного материала, зернистости, твердости и связке, необходимое число переходов, устанавливаемое в зависимости от исходной погрешности заготовки.

Величину осевых подач и интенсивность съема назначают в зависимости от типа заготовки и требования к качеству шлифуемой поверхности. Например, при обдирочном шлифовании прутков на станках с широким кругом скорость осевой подачи составляет около 10 м/мин, при шлифовании поршневых пальцев, осей — 1,5 ... 4,5 м/мин, при шлифовании колец подшипников — 0,25 ... 2 м/мин.

При врезном шлифовании скорость поперечной подачи: чистовой — 0,3 ... 1,5 мм/мин, черновой — 0,8 ... 5 мм/мин, форсированной при позиционировании шлифовального круга — 3 ... 10 мм/мин.

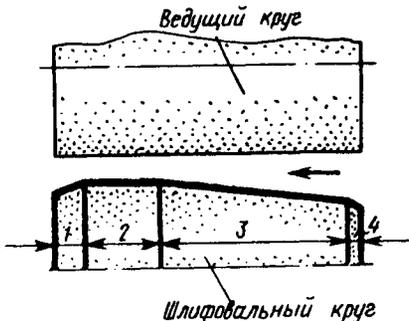


Рис. 2.3.4. Схема правки круга

Бесцентровое шлифование напроход является широкораспространенным процессом финишной обработки деталей. Все заготовки, обрабатываемые этим методом, могут быть подразделены на две группы:

1) заготовки, у которых отношение длины к диаметру меньше  $1/3$ , например, наружные кольца подшипников;

2) заготовки, у которых отношение длины к диаметру более  $1/3$ , например, поршневые пальцы, толкатели клапана и др.

Заготовки первой группы (рис. 2.3.5, а) обрабатываются с базированием по торцу. Для этой цели загрузочные устройства и наладка станка обеспечивают перемещение с подпо-  
ром заготовок, расположенных торцами

вплотную одна к другой. Заготовки второй группы (рис. 2.3.5, б, в) обрабатывают с базированием по наружной цилиндрической обрабатываемой поверхности. Загрузочные устройства и наладка станка обеспечивают в этом случае перемещение заготовок с интервалами между ними.

В обоих случаях обработка проводится шлифовальным кругом 1; заготовки 2 устанавливаются на ноже 3 и ведущем круге 4. При обработке заготовок второй группы для их направления в рабочую зону станка устанавливают дополнительные направляющие щетки 5 и прижимной ролик 6, обеспечивающий лучший прижим заготовок к ведущему кругу 4 (рис. 2.3.5, а-в).

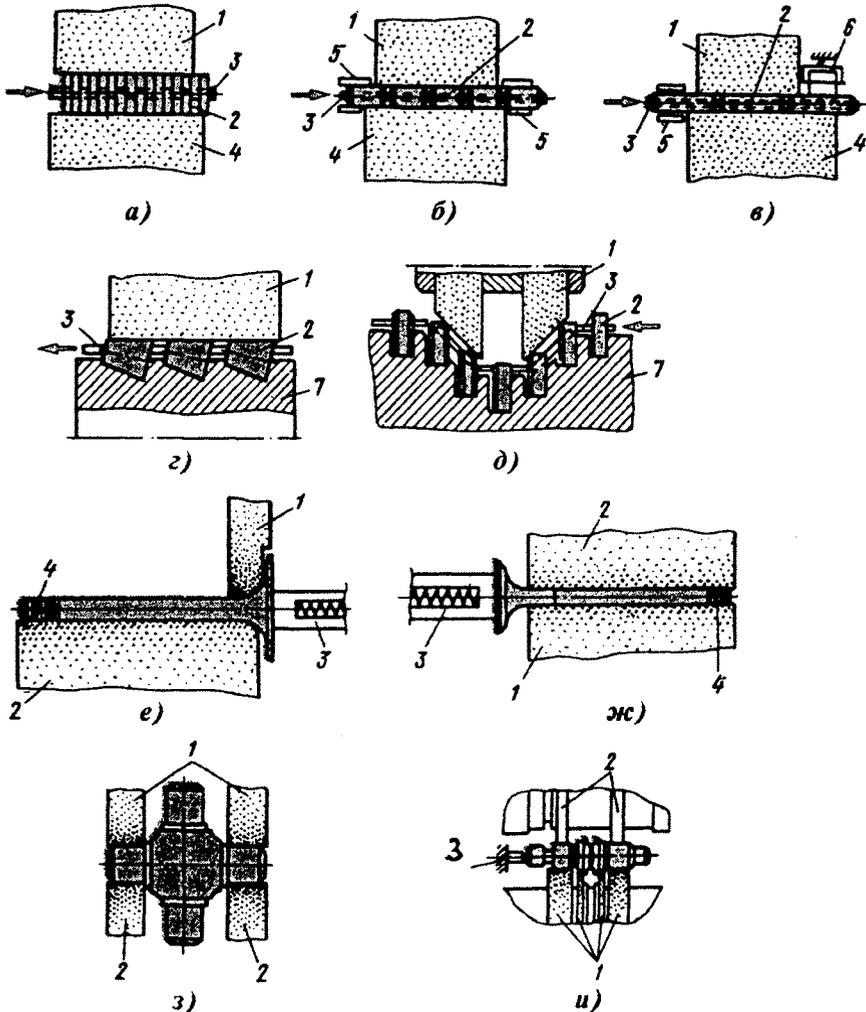


Рис. 2.3.5. Схемы базирования заготовок на бесцентрово-шлифовальных станках

Для обработки напроход конических роликов, фасок на седлах клапанов и других конических поверхностей вместо ведущего круга на станке устанавливают металлический барабан 7 с винтовой канавкой, в которой перемещается обрабатываемые заготовки (рис. 2.3.5, з, д).

В последние годы резко расширилась номенклатура деталей, обрабатываемых врезным методом. Разработаны специальные устройства, позволяющие базировать и обрабатывать заготовки сложной многоступенчатой формы, большой длины (иногда превосходящей габариты станка). В ряде случаев обрабатывают несколько деталей небольшой длины. При обработке профильных поверхностей на станках используют устройства для правки шлифовального круга алмазным роликом.

На рис. 2.3.5, е приведена схема обработки галтели клапана автомобильного двигателя. Образующей шлифовального круга 1 придается форма обрабатываемой галтели, а ведущему кругу 2 — профильная форма, обеспечивающая его прилегание по цилиндрической части (стеблю) клапана и по галтели. В осевом направлении клапан прижимается к упору 4 с помощью подпружиненного плунжера 3. Упор 4 может использоваться для последующего выгалькивания (с помощью пневматического цилиндра) прошлифованных деталей в ящик. Аналогичным образом обрабатывается цилиндрическая поверхность стебля клапана (рис. 2.3.5, ж).

Для обработки двух соосных шеек крестовины кардана (рис. 2.3.5, з) применяют два шлифовальных круга 1. Обрабатываемая заготовка опирается на два ведущих круга 2 и нож.

На рис. 2.3.5, и приведена схема одновременной обработки четырех шеек ступенчатого вала четырьмя шлифованными кругами 1. Заготовка приводится во вращение двумя ведущими дисками 2 (чугунными) и при их развороте прижимается к упору 3.

При обработке колец шариковых и роликовых подшипников качения широкое рас-

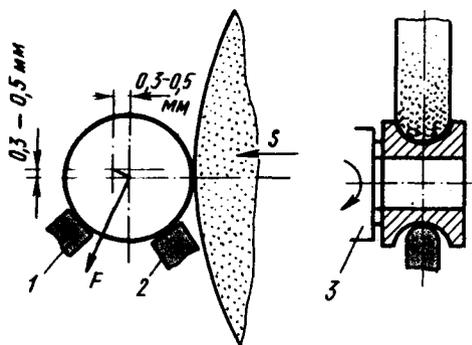


Рис. 2.3.6. Схема базирования заготовки на неподвижных станках

пространение получил способ базирования заготовок на неподвижных опорах — башмаках. Заготовку при шлифовании устанавливают на двух неподвижных башмаках 1 и 2 (рис. 2.3.6) и она прижимается торцом к магнитному патрону 3, закрепленному на шпинделе бабки изделия станка. Башмаки 1 и 2 устанавливают так, что ось заготовки смещается относительно оси шпинделя изделия, в результате чего при вращении наблюдается проскальзывание между торцом магнитного патрона и заготовкой. Величина смещения (отклонение от соосности) устанавливается так, чтобы результирующая сила трения  $F$ , возникающая при проскальзывании, прижимала кольцо к башмакам. Для уменьшения износа рабочие поверхности магнитного патрона и опорных башмаков армируют твердосплавными пластинами. Такой способ базирования имеет следующие преимущества по сравнению со способами базирования заготовки на ноже и ведущем круге: задний опорный башмак 1 не вносит погрешностей, связанных с биением ведущего круга; конструкция башмачного устройства способствует повышению жесткости технологической системы; конструктивно станок упрощается.

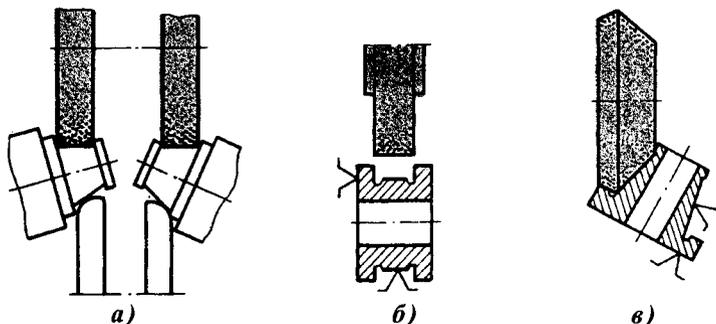


Рис. 2.3.7. Схемы базирования заготовок при одновременном шлифовании

Одновременное шлифование нескольких поверхностей существенно повышает эффективность использования станков для врезной обработки. На рис. 2.3.7. представлены схемы базирования заготовок при одновременном шлифовании: конических поверхностей двух внутренних колец конических роликоподшипников (рис. 2.3.7, а); двух торцов и дорожки качения внутренних колец цилиндрических роликоподшипников (рис. 2.3.7, б); борта и дорожки качения внутренних конических колец (рис. 2.3.7, в). В последних двух случаях заготовки базируются на неподвижных опорах.

**Технология профильного шлифования.** Профильное шлифование – это шлифование поверхности, образующая которой кривая или ломаная линия. Однако к профильному шлифованию относят и обработку рабочей поверхности кулачков и копиров с прямой или кривой образующей и не относят обработку выпуклых и вогнутых поверхностей (гиперболоидных поверхностей), образующихся при круглом наружном и внутреннем шлифовании, когда при цилиндрической форме имеют оси вращения, перекрещивающиеся с осью заготовки. Поэтому профильным шлифованием будем называть обработку деталей по сложному контуру, который нельзя обработать при простых движениях круга простой формы. Кругами простой формы считают шлифовальные круги, у которых рабочая поверхность – цилиндр (круг ПП), конус (круг 1Т и др.) или плоский торец (круг ЧК и др.). Простыми движениями являются вращательное и прямолинейное поступательное.

Профильные поверхности имеют такие распространенные детали как зубчатые колеса, шлицевые валы, кулачки, лопатки турбин, компрессоров и сопловых аппаратов, валки прокатных станов, фасонные резцы, профильные шаблоны, пуансоны, матрицы, копиры и др. Так как многие из перечисленных деталей изготавливают в больших количествах, то для их обработки создано большое число станков разнообразного назначения: зубошлифовальные полуавтоматы, шлицешлифовальные, резьбо- и червячно-шлифовальные, вальцешлифовальные, шлифовально-копировальные, желобошлифовальные, профилешлифовальные и др. Для обработки профильных поверхностей деталей подшипников созданы специальные высокопроизводительные станки-автоматы и полуавтоматы, многие из которых входят в состав гибких производственных систем (ГПС) или встроены в автоматические линии.

Профильное шлифование можно осуществлять разными методами. Наиболее распространенными являются три метода:

метод копирования, при котором профиль на круге соответствует профилю на детали;

метод огибания профиля на заготовке рабочей поверхностью круга с помощью относительного движения обкатки;

метод эквидистантного шлифования, при котором движение подачи круга осуществляется по траектории, эквидистантной шлифуемому профилю (эквидистантные линии – линии, отстоящие друг от друга на одинаковом расстоянии).

Частным случаем метода копирования является многократное шлифование профиля поверхности несколькими шлифовальными кругами одновременно.

На рис. 2.3.8 приведена схема профильного шлифования по методу врезной подачи круга, осевой профиль рабочей поверхности которого соответствует профилю шлифуемой

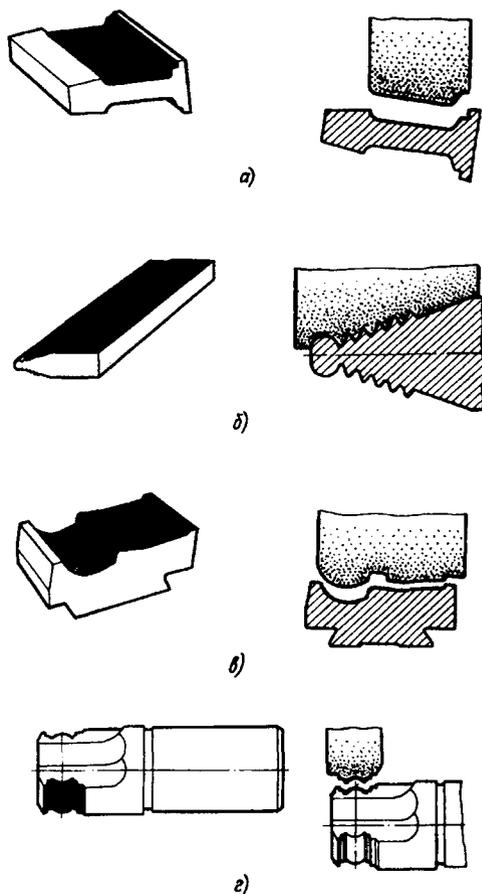


Рис. 2.3.8. Схемы профильного шлифования

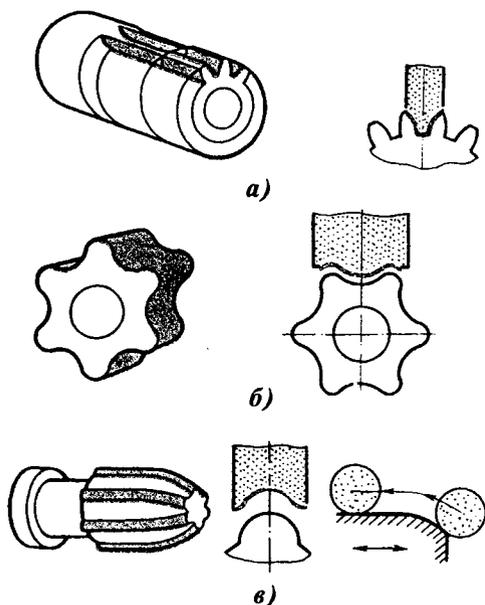


Рис. 2.3.9. Схемы врезного и профильного шлифования с делением и повторным шлифованием

фасонной поверхности: пуансона вырубного штампа для изготовления сердечников электродвигателей (рис. 2.3.8, а), наружной протяжки для обработки елочного профиля замка турбинного диска (рис. 2.3.8, б), фасонных тангенциального (рис. 2.3.8, в) и круглого (рис. 2.3.8, г) резцов. На рис. 2.3.9 показаны схемы врезного профильного шлифования с делением и повторным шлифованием нескольких одинаковых профилей заготовки. Для поворота заготовки используется делительная головка с ручным или автоматическим приводом или с управлением от системы ЧПУ. После шлифования каждой впадины на пуансоне для прессования зубчатых

колес из порошковых материалов (рис. 2.3.9, а) происходит поворот пуансона на один угловой шаг и цикл шлифования впадины повторяется. Аналогично осуществляется шлифование боковых поверхностей зубьев шестерен, используемых в специальных насосах (рис. 2.3.9, б). При шлифовании боковых поверхностей карданных валов равных угловых скоростей помимо деления вала осуществляется также профилирование и в осевой плоскости (рис. 2.3.9, в) за счет подачи по копиру или автоматического перемещения от системы ЧПУ.

На рис. 2.3.10 показаны схемы шлифования по профилю внутреннего (рис. 2.3.10, а) и наружного (рис. 2.3.10, б, в) колец шарикоподшипников из штампованных заготовок без предварительной токарной обработки. Заготовки обрабатываются методом врезного шлифования.

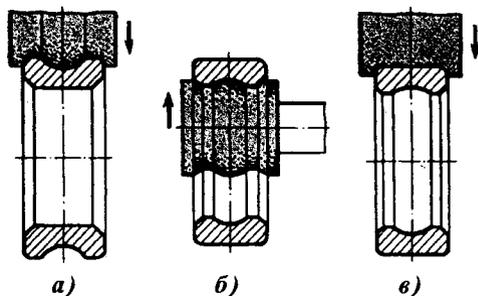


Рис. 2.3.10. Схемы шлифования колец шарикоподшипников

На рис. 2.3.11 приведены примеры абразивной обработки рабочих профилей валков для прокатных и трубоэлектросварочных станков. Рабочий профиль валков формируется либо по методу копирования, либо при перемещении рабочей поверхности кругов по траекториям, которые эквидистантны различным участкам образующей шлифуемого профиля.

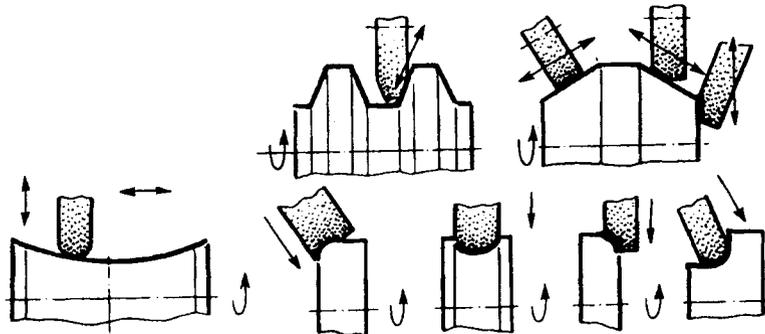


Рис. 2.3.11. Схемы шлифования профилей валков

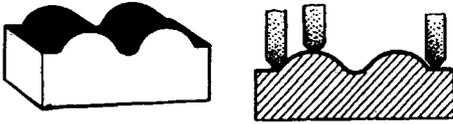


Рис. 2.3.12. Схема шлифования штампа

На рис. 2.3.12 приведен пример обработки фасонной поверхности детали штампа на плоскошлифовальном станке, оснащенной системой ЧПУ. Заготовка закрепляется на электромагнитной плите, а перемещение для образования профиля осуществляется по программе от сервомотора постоянного тока.

На рис. 2.3.13 приведена схема профильного шлифования с шаговой подачей на примере двух деталей: мелкозубчатой рейки (рис. 2.3.13, а), боковые поверхности которой обрабатываются за шесть шаговых подач, и пресс-формы для изготовления рамок интегральных микросхем (рис. 2.3.13, б),

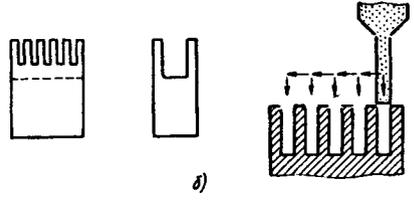
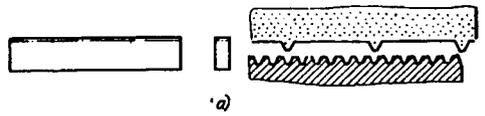


Рис. 2.3.13. Схемы шлифования с шаговой подачей

профиль которой состоит из пяти пазов и обрабатывается по методу врезного шлифования на глубину 5, 8 мм и шаговой подачи, равной 2,5 мм.

На рис. 2.3.14 показаны схемы шлифования элементов прямоочных шлицевых валов

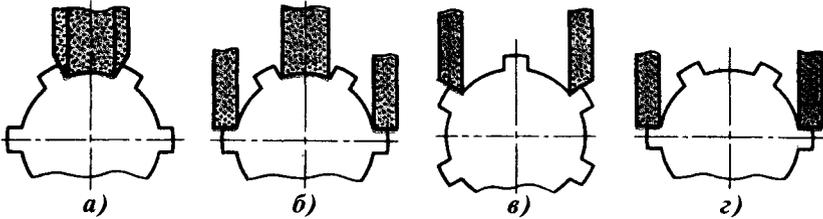


Рис. 2.3.14. Схемы шлифования прямоочных шлицевых валов

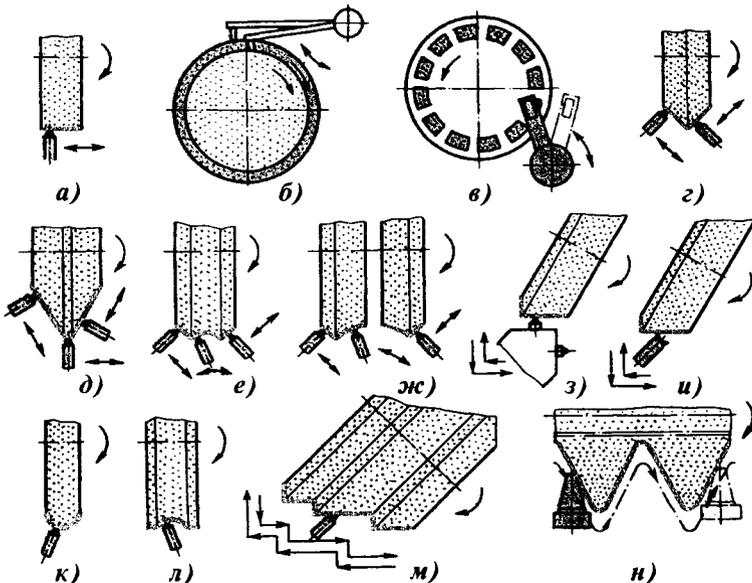


Рис. 2.3.15. Схемы правки рабочей поверхности для профильного шлифования алмазов в оправе (а, б, в, к, л), алмазным резцом (м, н), двумя и тремя алмазами (г, д, е, з, и)

валов, у которых центрирование детали на валу осуществляется по внутреннему диаметру и боковым сторонам шлицев. На одношпиндельном станке профиль шлицевого вала обрабатывают одним кругом, профиль рабочей поверхности которого образуют с помощью специального правильного устройства (рис. 2.3.14, а). На специальных станках шлифование профиля вала осуществляют несколькими кругами одновременно (рис. 2.3.14, б) или в две операции (рис. 2.3.14, б-г).

Профиль этих кругов представляет производящий исходный контур рейки, а механизм обкатки станка имитирует его взаимодействие с боковыми поверхностями шлифуемых зубьев при работе зубчато-реечного механизма.

**Правка рабочей поверхности шлифовальных кругов.** При профильном шлифовании точность формы шлифуемых поверхностей зависит от формы рабочей поверхности шлифовального круга и параметров шлифовального станка. Профиль и рельеф рабочей поверхности на шлифовальном круге получают в процессе правки. Широкое применение для профильной правки круга получили следующие методы и алмазные инструменты: точеч-

ные алмазами в оправе, алмазными карандашами и алмазными резцами (рис. 2.3.15); алмазными роликами с врезной и тангенциальной подачами (рис. 2.3.16, 2.3.17); правка алмазным фасонным бруском (рис. 2.3.18) и алмазными гребенками.

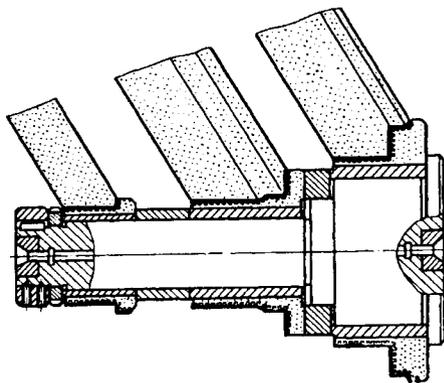


Рис. 2.3.16. Схема правки рабочих поверхностей кругов алмазными роликами для многокругового профильного шлифования разобренных поверхностей цапфы заднего моста автомобиля

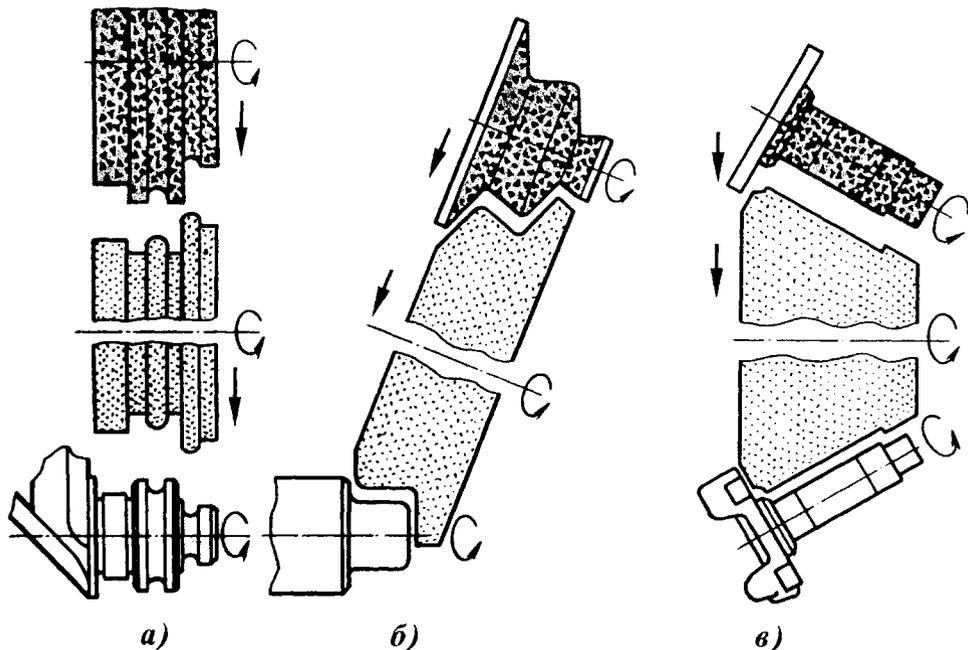


Рис. 2.3.17. Схема совмещенной правки рабочей поверхности круга алмазными роликами и шлифования: а - концевой участка вала; б - цилиндрического и двух торцовых участков вала; в - торцовых и цилиндрических поверхностей валов

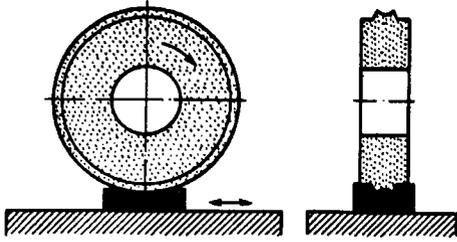


Рис. 2.3.18. Схема профильной правки круга фасонным резцом

На практике широко используют приспособление для правки кругов по прямолинейным образующим. Алмазный правящий инструмент закрепляется на ползуне, который может перемещаться по направляющим, представляющим собой синусную линейку. Угол наклона этой линейки относительно основания определяется высотой набора плоскопараллельных концевых мер. Приспособление устанавливается основанием на магнитной плите плоскошлифовального станка. Для профилирования рабочей поверхности круга по дугам окружности применяют разнообразные приспособления, принцип работы которых можно рассмотреть на примере.

Алмазный правящий инструмент с помощью винта закрепляется на стойке, которая вместе с салазками и диском может поворачиваться относительно вертикальной оси втулки, запрессованной в отверстие плиты. Смещение правящего инструмента относительно этой оси равно радиусу дуги, который требуется выдержать при правке. Это смещение контролируется размером  $B$  относительно упора:  $R = 75 - B$ , где  $R > 0$  — радиус выпуклого профиля,  $R < 0$  — радиус вогнутого профиля на шлифовальном круге. Стойка  $A$  может перемещаться для установки алмаза вдоль оси круга по верхним направляющим салазок и в радиальном направлении по направляю-

щим диска. Поворот верхней части приспособления при правке осуществляют вручную с помощью рукоятки.

Широкое применение получили правящие приспособления с копирными устройствами. В державке закреплен блок с двумя алмазными резами, один из которых используется при предварительной правке, второй — при окончательной правке рабочей поверхности круга. Перемещение алмазного реза по контуру осуществляется пантографом с рычагами при перемещении оси шупа с маховичком по профилю копира. Копир закрепляется на салазках, имеющих базовые детали в виде планки и штифтов. Перемещение салазок осуществляется вращением маховичка.

Профилирование рабочей поверхности круга на станках, оснащенных ЧПУ выполняется с одновременным перемещением по двум координатным осям. На плоскошлифовальном станке эти перемещения осуществляются за счет вертикальной подачи  $S_y$  шлифовального круга (по оси  $y$ ) и поперечной подачи  $S_x$  стола (по оси  $x$ ), на котором закреплен правящий алмазный инструмент (рис. 2.3.19, а). Перемещения осуществляются от управляемых сервомоторов постоянного тока с точностью 0,001 мм. При обработке точное позиционирование по координатам  $x$  и  $y$  шлифовального круга и обрабатываемой заготовки обеспечивается автоматически с помощью устройства ЧПУ.

Взаимное расположение центра  $C$  сферы на кристалле алмаза и базовых плоскостей  $A$  и  $B$  на заготовке при ее установке на электромагнитной плите показано на рис. 2.3.19, б и определяется размерами  $B_x$  и  $B_y$ . Размер  $W_x$  и  $W_y$  соответствуют рабочему чертежу детали. Величина взаимного перемещения круга и заготовки при позиционировании (из позиции правки в позицию шлифования) определяется координатами  $x_1$  и  $y_1$ , а перемещение при врезной подаче — координатой  $y_2$ .

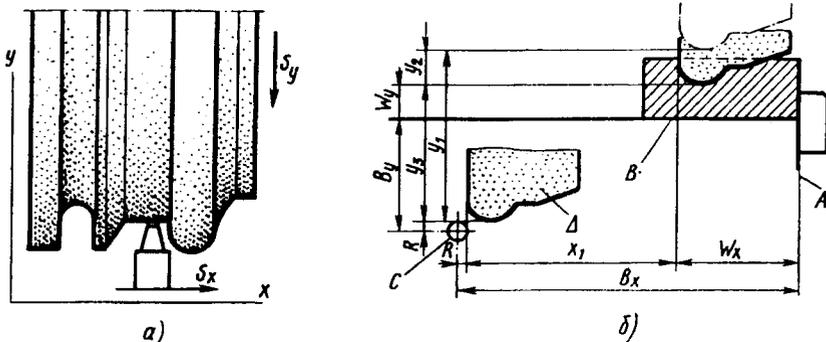


Рис. 2.3.19. Схема профилирования круга на станках с ЧПУ

**Шлифование кулачков.** В состав кулачковых механизмов входит звено, выполненное в виде поверхности переменной кривизны — кулачок. Профиль кулачка определяется координатами его точек и обеспечивает заданный закон движения выходного звена. При повороте кулачка с заданным угловым шагом перемещение выходного звена (толкателя) изменяется неравномерно. Обработка криволинейной поверхности проводится методом копирования на специальных станках или на станках с ЧПУ с дискретными подачами, обеспечивающими относительное перемещение оси шлифовального круга по эквидистантной траектории по отношению к конструктивному профилю кулачка. Условия шлифования на разных участках профиля различаются: при заданной частоте вращения заготовки на основной окружности радиуса  $r_0$  скорость круговой подачи наименьшая, а на участке наиболее удаленных точек профиля — наибольшая. При шлифовании промежуточных участков увеличивается дуга контакта заготовки с рабочей поверхностью круга и приведенная объемная интенсивность съема [ $\text{мм}^3/\text{мм}\cdot\text{с}$ ] может существенно возрасти. Поэтому, прогрессивная технология предусматривает использование таких станков, которые имеют программируемую переменную частоту вращения заготовки, обеспечивающую оптимальную объемную интенсивность съема материала на каждом участке профиля и для каждой из операций шлифования: предварительного, окончательного и выхаживания (без врезной подачи).

На рис. 2.3.20, *а* приведена схема, поясняющая относительное расположение круга 1, заготовки 2, люльки 3 с копиром 4 и роликом 5 при шлифовании кулачка методом прямого копирования профиля. Круг 1 помимо главного движения  $D_{r1}$  совершает также движения подачи на врезание и движения подачи вдоль оси (осциллирующая подача).

На рис. 2.3.20, *б* приведена схема обработки кулачка с помощью копировального суппорта 3, на котором установлены шпиндель шлифовального круга 1 и ролик 5. При вращении заготовки 2 и копира 4 суппорт совершает поступательное перемещение, обеспечивая движение подачи  $D_{s1}$  шлифовальному кругу. Профиль копира согласован с профилем кулачка и траекторией оси круга в относительном движении с помощью эквидистантных профилей.

На рис. 2.3.20, *в* приведена схема обработки кулачка *б*, закрепленного на валу, установленного в центрах 7 и 5 передней и задней бабок. Шаговый двигатель 13 с гидроусилителем 12 через редуктор 11 и червячную передачу 10 обеспечивает вращение шпинделя 9 по заданной программе. Бабки станка закреплены на столе 8. Шаговый двигатель 1 с гидроусилителем 2, редуктором 3 и шариковой винтовой передачей 4 обеспечивает поступательное перемещение шлифовальной бабки 14. Дополнительные установочные перемещения осуществляются винтовой парой, установленной на плите 15. Требуемая согласованность движения подач заготовки и шлифо-

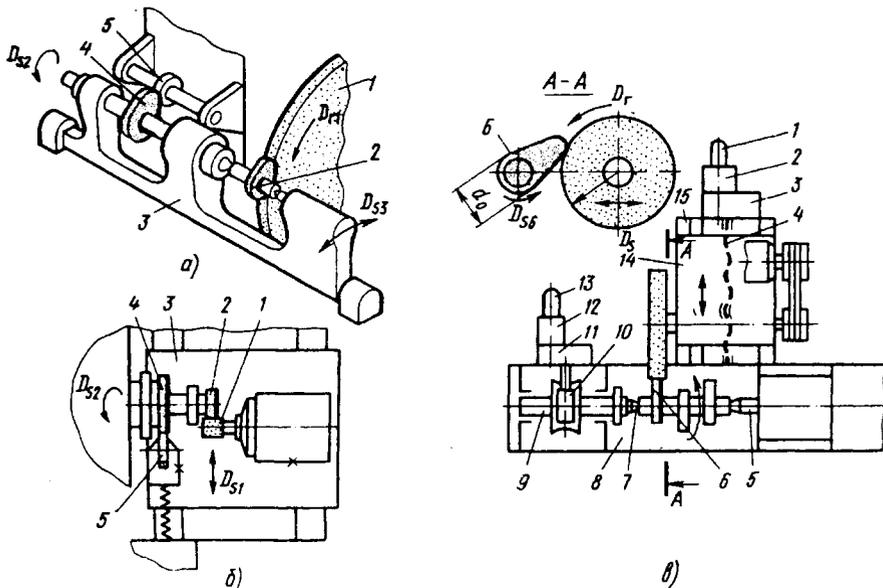


Рис. 2.3.20. Схема шлифования кулачка с помощью копировального суппорта

вального круга обеспечивается системой числового программного управления работой шаговых двигателей. Повышение производительности и качества поверхностного слоя по профилю кулачка, обеспечивают специализированные станки, оснащенные более современными системами управления и регулирования режимов шлифования.

На рис. 2.3.21 приведена схема шлифования кулачкового вала на станке с переменной программируемой угловой скоростью

заготовки в пределах каждого оборота на  $360^\circ$ . Применение микропроцессора, аксиально-поршневого гидромотора для привода вращения заготовки позволяет поддерживать заданную объемную интенсивность съема металла на всех участках профиля и обеспечивают плавность движения в точках изменения радиусов кривизны (например, при переходе от начальной окружности радиуса  $r_0$  к боковым участкам с большими радиусами кривизны).

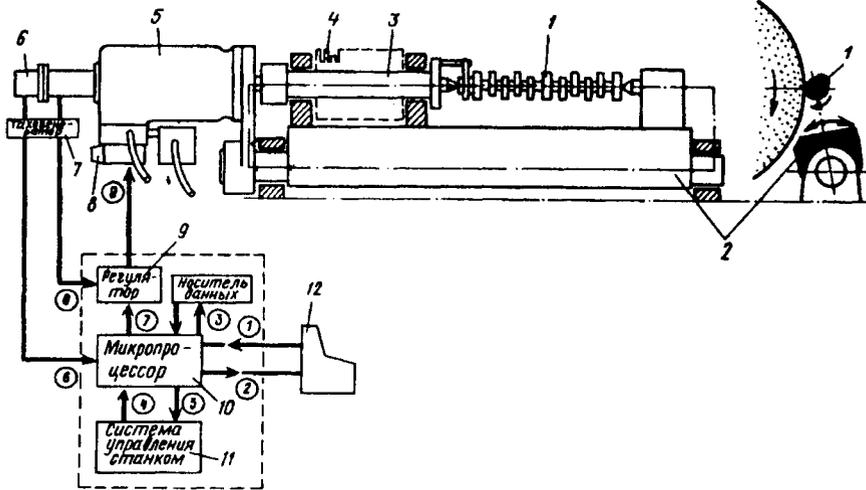


Рис. 2.3.21. Схема шлифования кулачка с программируемой угловой скоростью

Структура передачи сигналов в системе управления поясняется на рисунке стрелками ①-⑨. Движения подачи сообщаются поворотному столу 2, на котором закреплены заготовка 1, шпиндель и копир 4. Работа гидромотора 5 регулируется сервоклапаном 8 и регулятором 9. Изменение фактической угловой скорости заготовки осуществляется тахогенератором 7 и сельсином 6. Необходимые команды обрабатываются и вводятся системой управления 11 с пультом 12 и микропроцессором 10.

2 ... 5 мм. Схема процесса приведена на рис. 2.3.22.

Колебательное движение брусков может быть не только прямолинейным, но и в виде качаний с дуговой траекторией, например, при обработке дорожки качения кольца шарикоподшипника (рис. 2.3.23). Заготовка, как

### 2.3.2. СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ

**Физическая сущность процесса. Области применения.** Суперфиниширование — процесс доводочной абразивной обработки поверхностей деталей с использованием в качестве инструмента мелкозернистых абразивных брусков. Характерным признаком процесса суперфиниширования является колебательное движение брусков с частотой 10 ... 50 Гц (600 ... 3000 дв. ходов/мин) и амплитудой

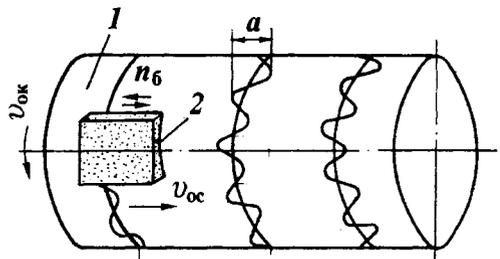


Рис. 2.3.22. Схема процесса суперфиниширования:

1 - заготовка; 2 - брусок;  
 $n_b$ ,  $a$  - частота и амплитуда колебаний бруска;  
 $v_{ок}$  - окружная скорость заготовки;  
 $v_{ос}$  - скорость движения осевой подачи

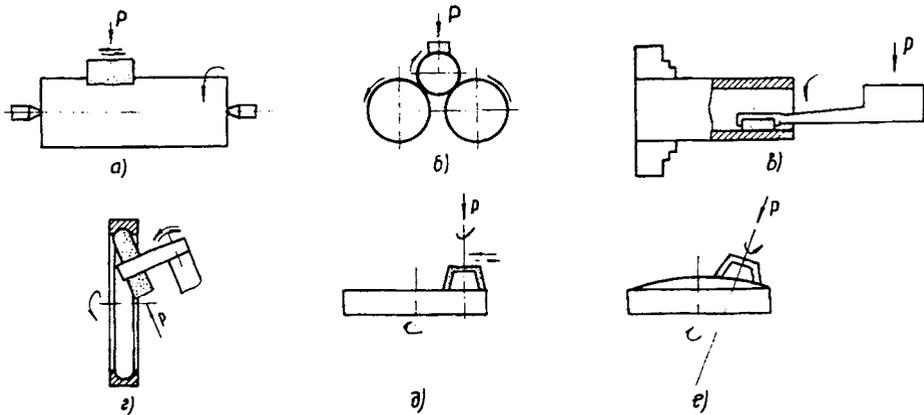


Рис. 2.3.23. Схемы различных операций суперфиниширования:

*a* - в центрах; *b* - бесцентровое; *в* - внутреннее; *г* - с угловыми колебаниями; *д*, *e* - торцовое

правило, совершает вращательное движение. В ряде случаев необходимо движение осевой подачи, которое совершает либо брусок (рис. 2.3.23, *a*), либо заготовка (при бесцентровой схеме обработки).

Физическая сущность процесса суперфиниширования заключается во взаимодействии с обрабатываемой поверхностью одновременно большого количества ( $4 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^3$  1/мм<sup>2</sup>) мельчайших (3 ... 40 мкм) абразивных частиц. Основными видами взаимодействия являются процессы микрорезания металла со снятием тончайших стружек и трения-выглаживания с пластическим отгеснением металла. Преобладание того или иного вида взаимодействия может быть достигнуто путем соответствующего выбора оптимальных характеристик брусков и режимов обработки. Наиболее эффективный рабочий цикл суперфиниширования состоит в последовательном осуществлении этапов интенсивного стабильного микрорезания со скоростью съема металла до 0,5 ... 3 мкм/с и последующего трения-выглаживания, при котором съем металла резко уменьшается, но одновременно существенно улучшается качество поверхности, включая состояние поверхностного слоя металла.

Схема такого рабочего цикла, отражающая изменение съема металла и параметров шероховатости, приведена на рис. 2.3.24.

Суперфиниширование следует применять для решения следующих технологических задач:

уменьшения отклонений от круглости до 0,3 ... 0,5 мкм, волнистости до 0,05 ... 0,10 мкм;

получения параметра шероховатости поверхности  $Ra = 0,03 \dots 0,06$  мкм;

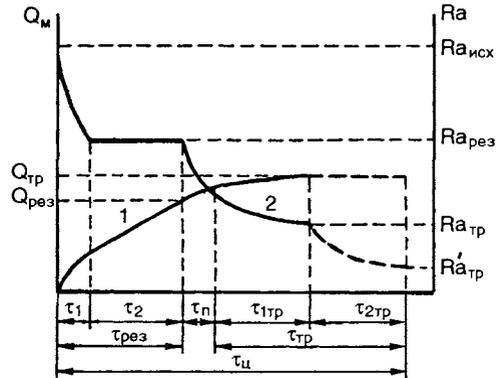


Рис. 2.3.24. Схема изменения съема металла (1) и параметров шероховатости поверхности (2) в двухстадийном рабочем цикле суперфиниширования:

$t_{рез}$  - время этапа микрорезания;

$t_{тр}$  - время этапа трения - выглаживания

значительного увеличения фактической опорной поверхности;

удаления дефектного слоя от предшествующих операций шлифования, получение поверхностного слоя металла с характеристиками, улучшающими эксплуатационные свойства деталей.

Суперфиниширование целесообразно применять в качестве финишной технологической операции, в основном, при обработке наружных поверхностей деталей, работающих в условиях трения скольжения или качения; в ряде случаев суперфинишированием обрабатывают также внутренние и торцовые поверхности. Основные схемы операций суперфиниширования приведены на рис. 2.3.23. Обрабатываемая деталь может быть установлена в

центрах (рис. 2.3.23, а), либо на опорных валах при бесцентровой схеме (рис. 2.2.23, б). Находит применение также процесс торцового суперфиниширования (рис. 2.3.23, д, е).

Процесс суперфиниширования, как окончательная технологическая операция, широко распространен в следующих областях:

в производстве подшипников качения при обработке дорожек качения колец, а также при обработке цилиндрических, конических, бомбинированных роликов;

в производстве двигателей внутреннего сгорания при обработке коленчатых и распределительных валов, клапанов, поршневых пальцев;

в автомобильном и тракторном производстве при обработке валов коробок скоростей, штоков амортизаторов;

в производстве топливной и гидроаппаратуры при обработке плунжеров, золотников;

в станкостроении при обработке шпинделей, пинолей.

Перспективным является применение суперфиниширования для обработки валиков малогабаритных электродвигателей и привода магнитофонов, рабочей поверхности магнитных головок и других деталей.

**Бруски для суперфиниширования.** Для обработки деталей из термообработанных

сталей используются бруски из традиционных абразивных материалов — электрокорунда и карбида кремния, причем бруски из карбида кремния применяют на окончательных операциях (переходах). Для обработки наиболее твердых (не менее 60 HRC<sub>3</sub>) сталей, а также твердых покрытий (хромирование, плазменные) весьма эффективными являются бруски из кубического нитрида бора (наиболее широко известного под маркой "эльбор"). Для обработки твердосплавных и керамических деталей наиболее эффективны бруски из синтетического алмаза. При необходимости суперфиниширования деталей из цветных сплавов применяют бруски из карбида кремния.

Бруски для суперфиниширования в большинстве случаев изготавливают из микропорошков зернистостью М28-М7 (для сверхтвердых материалов обозначения 40/28 ... 7/5), размер частиц основной фракции которых составляет, соответственно, 20 ... 28 мкм и 5 ... 7 мкм. В особых случаях обработки используют бруски зернистостью М5 и М3 (5/3 и 3/1) с размерами частиц основной фракции 3 ... 5 мкм и 1 ... 3 мкм. Выбор зернистости бруска тесно связан с требованиями к параметрам шероховатости поверхности (табл. 2.3.4).

### 2.3.4. Рекомендации по выбору зернистости брусков

Исходная шероховатость Ra, мкм	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость
	Требуемая шероховатость Ra, мкм							
	0,16—0,20		0,08—0,12		0,05—0,06		0,03—0,04	
0,40—0,63	1	M20—M14	1	M20—M14	1	M14	1	M14—M10
			2	M10	2	M7	2	M5
0,20—0,32	1	M14	1	M10	1	M14—M10	1	M10—M7
					2	M7	2	M5
0,12—0,16	—	—	1	M10	1	M10	1	M7
					2	M7	2	M5

Бруски из электрокорунда и карбида кремния изготавливают, как правило, на керамических связках; на окончательных, полировальных переходах используют также бруски на бакелитовой связке с графитовым наполнителем. Бруски из эльбора изготавливают на керамической связке, алмазные бруски — на металлической связке и на органических (каучукосодержащих) связках, придающих бруску эластичность. Широко используется пропитка брусков серой, что уменьшает хрупкость брусков, предотвращает их сколы, значительно повышает износостойкость брусков, т.е. увеличивает их ресурс, улучшает качество

обработанной поверхности.

Важным показателем качества брусков является их твердость, которая контролируется прямым методом на приборе "Роквелл", а также косвенным акустическим методом с помощью приборов "Звук". Абразивные бруски на керамической связке применяют, как правило, степеней твердости ВМ1-ВМ2 и мягче (показатели по прибору "Звук" — звуковые индексы — в пределах 25-33). Бруски из эльбора на керамической связке имеют твердость степеней СТ1-Т1, обеспечивающую оптимальное сочетание режущей способности и износостойкости.

**Оборудование для суперфинишования.** Суперфинишные станки для обработки в центрах выпускаются с одной или несколькими инструментальными головками. Станки с несколькими головками являются специализированными и используются в крупносерийном и массовом производстве для одновременной обработки нескольких шеек вала. В табл. 2.3.5 приведены основные технические характеристики центровых суперфинишных станков. На этих станках колебательное движение кареток брусками осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу и эксцентрики, установленные в каретках. Вращение заготовки осуществляется от тиристорного привода через коробку скоростей. Движение осевой (продольной) подачи инструментальной головки с бруском осуществляется гидроцилиндром. Для прижима бруска к заготовке в инструментальной головке также имеется гидроцилиндр. Станок мо-

жет быть оснащен устройством для активного контроля размера (диаметра).

Бесцентровые суперфинишные станки выпускают двух модификаций: для работы с осевой подачей и врезанием, т.е. без осевой подачи. В табл. 2.3.6 приведены основные технические характеристики бесцентровых суперфинишных станков. Для базирования заготовки и ее вращения станки имеют опорные валки с приводом их вращения. Для обеспечения движения осевой подачи валки имеют гиперболоидальный профиль и разворачиваются относительно друг друга в вертикальной плоскости на угол  $1 \dots 2^\circ$ . На бесцентровых станках, работающих с осевой подачей, установлены несколько (от четырех до восьми) инструментальных головок с брусками; сила прижима может устанавливаться независимо на каждой головке. Оснащение станка загрузочно-транспортным устройством для заготовок позволяет работать в автоматическом цикле.

### 2.3.5. Технические характеристики центровых суперфинишных станков

Параметр	Модель станка			
	ЗД870Б	ЗД871Б	ЗД871	ЗД871БК
Наибольшие размеры заготовки, мм:				
диаметр	140	280	280	280
длина	360	710	710	1400
Число инструментальных головок	1-2	1	4	1
Высота центров, мм	150	200	200	200
Частота колебаний бруска, Гц	17; 25; 32	17; 25; 32	17; 25; 32	17; 25; 32
Амплитуда колебаний, мм	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	47-1875	25-1000	25-1000	25-1000
Наибольшая сила прижима, Н	400	1000	1000	1000
Мощность электродвигателя, кВт	4	4	4	4

### 2.3.6. Технические характеристики бесцентровых суперфинишных станков

Параметр	Модель станка			
	ЗД878	ЗД879	ЗД880	ЗД879Б
1	2	3	4	5
Диаметр заготовки, мм:	1,5-32	8-60	10-125	8-125
Размеры опорных валков, мм:				
диаметр	45; 60; 100	100	130	80; 110; 150
длина	400; 550	550	750	550

Продолжение табл. 2.3.6

1	2	3	4	5
Число инструментальных головок	4-6	6	8	4
Частота колебаний бруска, Гц	17; 25; 32	17; 25; 32	17; 25; 32	17; 25; 32
Амплитуда колебаний, мм	0,5-5	0,5-5	0,5-5	0,5-5
Частота вращения валков, мин <sup>-1</sup>	67-675; 54-540; 30-300	30-300	60-600	30-300
Скорость движения осевой подачи, м/мин	0,16-3,28	0,16-3,28	0,19-5,9	Обработка врезанием
Наибольшая сила прижима, Н	400	400	400	1000
Мощность электродвигателей, кВт	3,6	3,6	7,8	3,9

Специальные станки для суперфиниширования дорожек колец подшипников выпускаются для однопозиционной и двухпозиционной обработки. Станки работают в автоматическом цикле. Особенностью этих станков является базирование заготовок — колец на жестких опорах; вращение колец осуществляется с помощью магнитного патрона. В табл. 2.3.7 приведены основные технические характеристики станков этой группы.

Для суперфиниширования торцовых поверхностей выпускается станок мод. 3888В, являющийся двухпозиционным полуавтоматом. Имеются две инструментальные головки и два шпинделя изделия, оснащенные инди-

видуальным приводом. Основные технические данные станка приведены ниже.

Наибольшие размеры заготовки, мм:

диаметр ..... 200  
высота ..... 125

Частота вращения, мин<sup>-1</sup>:

заготовки (регулируется бесступенчато) ..... 60-1000  
круга ..... 700; 1000  
Диаметр круга, мм ..... 50-125  
Сила прижима, Н ..... 50-500

### 2.3.7. Технические характеристики станков для суперфиниширования дорожек качения колец подшипников

Параметр	Модель станка			
	ЛЗ-261	ЛЗ-263	ЛЗ-264	ВТ-46М
Посадочный диаметр кольца, мм:				
внутреннего	20-50	10-50	40-100	15-65
наружного	25-80	25-80	70-180	35-125
Высота кольца, мм	8-30	5-25	5-36	10-54
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	100-6000	60-6000	40-4000	150-3000
Частота колебаний бруска, мин <sup>-1</sup>	360-1300	600-900	600-900	500-2000
Сила прижима, Н	20-300	40-250	40-400	50-400

Для применения процесса суперфиниширования в условиях единичного и мелкосерийного производства выпускаются суперфинишные головки к универсальным станкам (токарным, шлифовальным). Такие головки имеют механизм колебаний бруска, устройства для прижима бруска к заготовке (гидрав-

лические или пружинные). Головка может быть установлена на суппорт токарного станка либо вместо бабки шлифовального круга.

**Технология суперфиниширования.** При обработке поверхностей вращения величина припуска, снимаемого при суперфинишировании, определяется следующим образом:

$$P = 2(R_{\max} + h_b),$$

где  $R_{\max} = (8+10)R_a$  — наибольшая высота микронеровностей от предшествующей обработки,  $h_b$  — наибольшая высота волнистости на поверхности заготовки. В большинстве случаев величина припуска на предварительных переходах составляет 10–15 мкм, на окончательных — 3–4 мкм.

Рабочая ширина бруска  $B$  выбирается из следующих соотношений:

$$B \geq D \sin \frac{\alpha_0}{2}; B_{\max} = K_B D,$$

где  $D$  — диаметр заготовки;  $\alpha_0$  — угол охвата заготовки бруском, определяемый из соотношения

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{k}, k — номер основной гармонической составляющей профиля поверхности заготовки в поперечном сечении (овальность —  $k = 2$ , трехгранник —  $k = 3$  и т.д.);  $K_B$  — коэффициент, значения которого с увеличением  $D$  от 3 ... 10 мм до 60 ... 100 мм уменьшаются от 0,7 ... 0,6 до 0,4 ... 0,3.$$

С увеличением ширины бруска затрудняется доступ СОЖ в зону контакта и удаление отходов, что приводит к ухудшению качества поверхности. Поэтому при обработке заготовок диаметром более 60 ... 70 мм следует использовать два бруска и более, установленных симметрично в специальных державках.

Режимы суперфиниширования оказывают существенное влияние на производительность и качество обработки. Кинематический режим характеризуется следующими основными величинами: окружной скоростью заготовки  $v_{ок} = \pi Dn/1000$  и скоростью колебательного движения бруска  $v_{кол} = 2an_{бр}/1000$ , где  $n$  — частота вращения заготовки, мин<sup>-1</sup>;  $n_{бр}$  — частота колебаний, мин<sup>-1</sup>;  $a$  — амплитуда колебаний, мм.

Отношение  $v_{ок}/v_{кол}$  определяет угол сетки  $\alpha_c$  траекторий абразивных зерен бруска относительно обрабатываемой поверхности;  $\alpha_c = \arctg v_{ок}/v_{кол}$ . Изменяя  $\alpha_c$ , можно управлять процессом суперфиниширования: при  $\alpha_c = 40 \dots 50^\circ$  достигаются наиболее интенсивный сьем металла и самозатачивание бруска; при  $\alpha_c = 80 \dots 90^\circ$  обработка происходит в режиме трения-выглаживания, уменьшая параметры шероховатости и улучшая состояние поверхностного слоя металла.

В современных суперфинишных станках предусмотрено автоматическое регулирование  $v_{ок}$  в цикле обработки, позволяющее изменять угол  $\alpha_c$ . Значения  $v_{ок}$  составляют 10–100 м/мин.

Увеличение частоты колебаний способствует более интенсивному микрорезанию и самозатачиванию бруска. В современных станках частота колебаний бруска составляет 1200 ... 3000 мин<sup>-1</sup>.

Суперфиниширование дорожек качения колец шарикоподшипников осуществляется с значительно более высокими скоростями  $v_{ок}$ , до 150 ... 300 м/мин; при этом необходимо применять очень мягкие, твердостью менее ВМ, бруска, легко осуществляющие самозатачивание.

Рабочее давление в паре "брусок-заготовка" составляет, как правило, 0,2 ... 0,4 МПа. При обработке мягких материалов давление уменьшается до 0,15 ... 0,2 МПа. Высокоскоростное суперфиниширование колец подшипников осуществляется при увеличении давления до 0,8 ... 1,5 МПа, что также способствует самозатачиванию бруска.

К смазочно-охлаждающим жидкостям для суперфиниширования предъявляются следующие основные требования: образование тонких и прочных граничных пленок, предотвращающих сухое трение и схватывание; высокая смачивающая способность для предотвращения коагуляции отходов обработки. Этим требованиям отвечают широко используемые керосино-масляные смеси, состоящие из 80 ... 90% керосина, 10 ... 15% индустриального масла, 3 ... 5% олеиновой кислоты. При обработке вязких, пластичных сталей и сплавов следует увеличивать содержание масла до 50 ... 70%, либо применять смесь легких масел с добавкой олеиновой кислоты. Разрабатываются СОЖ на водной основе, например, СОЖ В25, содержащая 1% натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и антикоррозионные присадки: такая СОЖ пригодна для получения параметра шероховатости  $Ra = 0,12 \dots 0,16$  мкм.

Следует обращать особое внимание на тщательную очистку СОЖ от отходов обработки. С этой целью используют дополнительные песчано-тканевые фильтры с несколькими камерами.

**Суперфиниширование торцовых поверхностей** применяется в ряде случаев вместо менее производительных операций притирки. Инструментом при этом виде обработки является чашечный круг либо комплект брусков, наклеенных на торец дисковой оправки. Заготовка (или партия) заготовок, установленная на столе станка, вращается, круг также вращается и может совершать дополнительные колебания в радиальном направлении. Изменяя соотношение частот вращения круга и заготовки, можно получать различную форму и плотность сетки траекторий абразивных зерен на поверхности заготовки, влиять на

производительность съема металла и качество поверхности.

Важным наладочным параметром, влияющим на отклонения от плоскостности деталей, является межцентровое расстояние между осями круга и заготовки (стола)

$$A = \sqrt{\frac{R_3^2 + r_3^2}{2} + \left(\frac{R_k + r_k}{2}\right)^2},$$

где  $R_3$ ,  $r_3$ ,  $R_k$ ,  $r_k$  – соответственно наибольший и наименьший радиусы заготовки и круга.

При торцовом суперфинишировании достигается скорость съема припуска до 10 ... 30 мкм/мин; параметр шероховатости поверхности  $Ra = 0,06 \dots 0,08$  мкм, отклонение от плоскостности в пределах 3 мкм на 100 мм.

**Суперфиниширование с дополнительным наложением ультразвуковых колебаний** позволяет повысить скорость съема металла в 1,4-1,7 раза, полностью исключить налипание частиц металла на рабочую поверхность бруска, что, особенно важно при обработке вязких сталей и сплавов (коррозионно-стойких, цветных, титановых).

Ультразвуковые колебания с частотой 18 ... 22 кГц и амплитудой 5 ... 10 мкм, как правило, сообщаются бруску, для чего державка с наклеенным бруском плотно соединяется с торцом концентратора ультразвуковой системы, работающей от специального генератора.

Наложение ультразвуковых колебаний снижает силы резания в 1,3-2 раза, причем больший эффект достигается с увеличением амплитуды колебаний. С целью повышения износостойкости бруска рекомендуется при суперфинишировании с ультразвуковыми колебаниями применять бруски повышенной твердости. Для уменьшения шероховатости поверхности заключительный этап цикла обработки следует выполнять с отключением ультразвуковых колебаний.

**Повышение эксплуатационных свойств деталей, обработанных суперфинишированием, обусловлено следующими факторами:**

увеличением опорной длины профиля поверхности в 1,8-3 раза по сравнению с шлифованной поверхностью;

увеличением микротвердости поверхностного слоя на 15 ... 35%;

формированием в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, величина которых составляет 300 ... 700 МПа.

Указанные факторы обеспечивают повышение, по сравнению с обработкой шлифованием, износостойкости в 1,6-3, контакт-

ной жесткости в 1,2-1,8, сопротивления усталости в 1,5-1,7 раза.

Таким образом, суперфиниширование является высокоэффективной технологической финишной операцией обработки деталей, в особенности работающих в условиях знакопеременных и контактных нагрузок, характерных для узлов трения качения и скольжения.

### 2.3.3. ПОЛИРОВАНИЕ И НАНОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Полирование является физико-химическим процессом финишной абразивной обработки, которая обеспечивает гладкие поверхности деталей с комплексом заданных эксплуатационных свойств.

Само определение процесса полирования не отражает физической сущности происходящих при этом явлений, а характеризует лишь конечные результаты, не регламентируя способы их достижения. Гипотезы, объясняющие процессы полирования можно классифицировать: 1) на чисто механические (процесс микрорезания – царапания); 2) на химико-механические (главенствующая роль химических процессов); 3) на физико-химические. Поэтому в настоящее время нет теоретических обобщений для априорных суждений о сущности протекающих процессов при полировании.

В связи с этим можно различить две разновидности полирования: декоративное (блескообразование) и точное, когда к поверхностям, кроме требований по их высоким отражающим свойствам, предъявляются высокие требования по точности их формы. В этом случае полирование называют оптическим.

При этом, когда достигаемые параметры поверхности выше этих требований, то полирование переходит в область нанотехнологии, т.е. обеспечение нанометрических размеров точности и шероховатости поверхности. При полировании может быть использована обработка свободным и связанным абразивом. Эффективность полирования свободным абразивом, т.е. достижение высоких параметров поверхности и производительности зависит в основном от технологической среды, которая включает полировальник, абразивную и неабразивную составляющие технологического состава и материал обрабатываемый заготовки.

По эксплуатационным характеристикам и конструкции полировальники можно разделить на две группы: мягкие и композиционные. Мягкие полировальники классифицируются на замшевые, войлочные, фетровые, кожаные, резиновые, бумажные; композици-

онные — на пекоканифольные, полимерные и комбинированные.

Основные требования, предъявляемые к полировальникам:

- 1) высокая износостойкость;
- 2) оптимальный модуль упругости материала;
- 3) оптимальная текстура, обеспечивающая хорошее закрепление абразивных зерен и их подачу в зону обработки;
- 4) оптимальная толщина, обеспечивающая необходимую форму обрабатываемой поверхности и ее физико-химические свойства;
- 5) стойкость к агрессивным полирующим составам.

Особое место среди полировальников занимают композиционные полировальники, а также полировальники из замши, которые нашли наибольшее применение для обработки лазерных зеркал, магнитных дисков, подложек микросхем. Композиционные полировальники на смоляной основе могут обеспечить хорошее качество поверхности при длительном полировании абразивными суспензиями, так как их поверхностный слой быстро насыщается шаржированными частицами абразива и практически мало изнашивается,

они легко принимают требуемую форму.

Условия взаимодействия абразивных зерен с материалом заготовки и полировальника зависят от свойств и состояния всех элементов системы: полировальник — абразивная прослойка — заготовка.

При полировании незакрепленным абразивом поверхности заготовок деталей с высокой отражательной способностью применяют различные полировальники, например из технической шерсти, фторопласта, полихлорвинила или пекоканифольной смолы.

Полировальные составы применяют в виде твердых мазеобразных паст, суспензий. Физико-механические свойства основных абразивных материалов, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 2.3.8.

Отечественная промышленность изготавливает абразивные микропорошки с размерами зерен до нескольких десятков микрометров (табл. 2.3.9).

При выборе абразивных составляющих следует учитывать размер, форму и твердость абразивных частиц, так как с увеличением их размера и твердости скорость съема материала возрастает, но одновременно ухудшаются физико-химические параметры поверхности, шероховатость и глубина дефектного слоя.

### 2.3.8. Физико-механические свойства абразивных материалов

Абразивный материал	Химическая формула	Твердость по Моосу	Микротвердость, Нц, ГПа	Температура плавления или разложения, К	Модуль упругости, ГПа
Кварц	SiO <sub>2</sub>	7,0	9,8—12,5	1883	103
Корунд	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,0	18,6—21,6	2323	320
Наждак	—	9,0	18,6—21,6	—	—
Карбид бора	B <sub>13</sub> C <sub>2</sub>	9,3	36,3—44,1	1873	296
Карбид кремния	SiC	9,5—9,8	50—58	2473—2873	365
Электрокорунд	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (до 97%)	9,0	17,6—23,5	2323	380
Крокус	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0—6,0	—	1838	—
Полирит	GeO <sub>2</sub>	6,0-7,0	—	2973	—
Окись тория	ThO <sub>2</sub>	6,5	—	3473	—
Двуокись циркония	ZrO <sub>2</sub>	—	—	2973	—
Окись хрома	CrO <sub>3</sub>	9,0	—	2608	—
Алмаз	C	10,0	84,3—98,0	4273—3273	900
Кубический нитрид бора	BN	—	78,4—88,2	3273	720

### 2.3.9. Зернистость микропорошков и размер зерен

Общепринятое обозначение зернистости	Размер зерен основной фракции, мкм
M40	40 – 28
M28	28 – 20
M14	14 – 10
M10	10 – 7
M7	7 – 5
M5	5 – 3
M3	3 – 2
M2	2 – 1
M1	1 – 0,5
M0,5	0,50 – 0,25

Полирующая способность абразивов определяется начальной формой зерен и динамикой их изменения в процессе обработки. Предпочтительной, с точки зрения производительности обработки, является остроугольная пластинчатая форма частиц, а для уменьшения шаржируемости — овализированная или круглая форма.

Концентрация абразива в полировальных составах может достигать 70%. Оптимальная концентрация порошков зависит от их химической активности, твердости обрабатываемого материала и других факторов.

Оптимальное количество абразивных частиц в суспензиях можно определить по максимуму коэффициента абразивного взаимодействия

$$K_i = n_i / Svt,$$

где  $n_i$  - число зерен, попавших на элементарную площадку обрабатываемой поверхности;  $v$  - скорость истечения суспензии м/с;  $k$  - концентрация абразива в суспензии;  $t$  - время переноса через элементарную площадку, с;  $S$  - подача.

Соотношение количества жидкости (Ж) и микропорошка (Т) в суспензиях изменяется в широких пределах — от 2 : 1 до 60 : 1.

Важным свойством абразивных зерен является степень гидрофобности их поверхностей. Плохая смачиваемость жидкостных абразивных частиц и отсутствие между ними и полировальником жидкостной прослойки улучшают сцепление абразива с полировальником и условия удаления с поверхности. Например, гидрофобизация порошков растворами, содержащими олеиновую кислоту,

является очень эффективной. Мягкие абразивные материалы на основе окислов, особенно металлов с переменной валентностью, способны оказывать на обрабатываемую поверхность химическое воздействие с образованием преимущественно на микровыступах поверхности окисной пленки, облегченное удаление которой улучшает качество полирования как мягких, так и твердых материалов.

Для улучшения качества поверхности абразивные зерна подвергаются корректировке формы различными методами, например методом механической (вариант А) или термической (вариант Б) овализации. Геометрия зерен существенно влияет на характер физико-механических явлений, что может значительно улучшить эксплуатационные характеристики. Такому корректированию (овализации) подвергаются и алмазные микропорошки, часто применяемые для изготовления деталей. Они изготавливаются из синтетических алмазов АСМ и АСН и природных алмазов АМ и АН.

Твердые абразивные материалы, особенно алмазные микропорошки, проверяют на соответствие содержанию основных, крупных и мелких фракций зерен.

Для наноабразивной обработки созданы ультрадисперсные абразивы оксида алюминия сферической формы с размером зерен около 0,1 мкм (100 нм), полученных газодисперсным синтезом (ГДС). Стандартный химический анализ такого абразива:  $Al_2O_3$  — 99,80%,  $MgO$  — 0,03%,  $SiO_2$  — 0,05%,  $Fe_2O_3$  — 0,06%,  $TiO_2$  — 0,05%,  $CaO$  — 0,01%.

Суть метода ГДС заключается в синтезе ультрадисперсных порошков в зоне горения ламинарного двухфазного факела газозвесей металлических порошков в кислородсодержащем газе.

Жидкость в абразивных составах обеспечивает транспортировку абразивных зерен в зону обработки с равномерным распределением их по поверхности, удаляет шлам, охлаждает полировальник и деталь, химически взаимодействует с материалом для облегчения его удаления с поверхности. Эти функции могут быть реализованы, если жидкость имеет малую вязкость, большую теплоемкость, плохо смачивает полировальник и абразивные частицы, обладает достаточной химической активностью. В качестве жидкости в полирующих суспензиях используют воду, керосин, скипидар, спирт, машинное масло, ПАВ, щелочные растворы и др.

В абразивных пастах неабразивная часть содержит смесь вспомогательных веществ, которые формируют жировую основу пасты, служат связующими веществами, химически активными добавками, растворителями. Это

прежде всего стеариновая и олеиновая кислоты, церезин, парафин, костное, вазелиновое, машинное масла, говяжий жир, канифоль, солидол, пчелиный воск, петролатумы, скипидар, керосин. Олеиновая и стеариновые кислоты выполняют функции химически активных добавок, ПАВ и в некоторой степени смазок. Парафин, стеарин, вазелин, пчелиный воск, петролатум создают требуемую вязкость и служат загустителями; пасты, масла, жиры, керосин, скипидар, олеиновая кислота уменьшают поверхностную энергию материалов и облегчают условия диспергирования. Керосин, скипидар, бензин, дибутилфталат, этиленгликоль, асидон, глицерин, изопен, касторовое, костное, веретенное масла служат растворителями и разбавителями в пастах. С увеличением вязкости пасты шероховатость обработанной поверхности возрастает. Оптимальной считают плотность абразива 0,1-0,2 г/см<sup>3</sup>.

Важным параметром материалов связок абразивных паст является температура испарения. При медленном испарении связки в составе абразива оказываются большое количество разрушенных и истративших свою режущую способность частиц, что приводит к засаливанию и снижению скорости съема. При слишком быстром испарении связки происходит преждевременное сбрасывание работоспособных частиц с полировальника.

Учитывая, что процесс полирования абразивными суспензиями сопровождается как динамическим, так и физико-химическим воздействиями с помощью неабразивной среды, при ее подборе следует учитывать следующие основные требования:

- 1) необходимое и достаточное поверхностное натяжение;
- 2) хорошую смазочную способность;
- 3) отсутствие окисления обрабатываемой поверхности в процессе обработки;
- 4) экологическую чистоту.

Из выпускаемых отечественной промышленностью абразивных составов наиболее широко распространены мазеобразные и твердые составы на основе алмазных микропорошков и окиси хрома. Алмазные пасты выпускаются: смываемые водой (В) и органическими растворителями (О), смываемые во-

дой и органическими растворителями (ВО), мазеобразные (М), твердые (Т). Абразивная способность алмазных паст в несколько раз выше, чем у абразивных паст. Однако, при полировании мягких материалов алмазные зерна шаржируют обрабатываемые поверхности, что ухудшает их эксплуатационные свойства.

В табл. 2.3.10 приведены характеристики алмазных паст. Наиболее распространенными абразивными пастами являются пасты Государственного оптического института (ГОИ). В табл. 2.3.11 приведены составы паст ГОИ.

Среди суспензий на основе алмазных порошков для зеркальных поверхностей известны суспензии, содержащие в качестве неабразивных составляющих глицерин и шампунь, аминоспирты, которые не обеспечивают высокой отражательной способности и необходимой производительности процесса.

### 2.3.10. Характеристика алмазных паст

Зернистость	Концентрация алмазов			Цвет пасты
	Нормальная	Повышенная	Высокая	
60/48				Красный
40/28	8	20	40	
28/20				
20/14				Голубой
14/10	6	15	30	
10/7				
7/5				Зеленый
5/3	4	10	20	
3/2				
2/1				Желтый
1/0	2	5	10	
0,7/0,3				
0,5/0,1				Пасты не окрашиваются
0,3/0	2	5	10	
0,1/0				

### 2.3.11. Составы паст ГОИ

Группа паст	Номер	Содержание, % (мас.)						
		Окись хрома	Силикагель	Расщепленный жир	Олеиновая кислота	Двууглекислая сода	Керосин	Стеарин
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Грубые	50	86	2	5	—	—	2	5

Продолжение табл. 2.3.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Грубые	40	85	2	5	—	—	2	5
	35	81	2	5	—	—	2	10
	30	81	2	5	—	—	2	10
	25	81	2	5	—	—	2	10
	20	81	2	5	—	—	2	10
Средние	15	80	2	10	—	—	2	6
	10	75	2	10	—	—	2	11
Тонкие	7	75	1,8	10	2	0,2	2	9
	4	73	1,8	10	2	0,2	2	11
	11	70	1,8	10	2	0,2	2	14

В табл. 2.3.12 приведен состав полировальных паст, применяемых в промышленно-

сти, а в табл. 2.3.13 – рекомендации по применению этих паст.

## 2.3.12. Состав полировальных паст

№ пасты	Абразив (%)	Неабразивные материалы												
		Стеариновая кислота	Олеиновая кислота	Жир технический	Парафин	Церезин	Канифоль	Пчелиный воск	Скипидар	Жирная кислота (фракции до 10)	Жирная кислота (фракции более 10)	Смазка УС-3	Гудронное сало	Петролатум
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Оксид хрома (73)	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13
2	Оксид хрома (80,3)	17	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1,7	—	—
3	Оксид хрома (75)	15	2	6	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Оксид хрома (70)	—	5	3	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	Глинозем (77)	19	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	Оксид железа (36); оксид хрома (36)	23	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	Глинозем (55); оксид хрома (8)	30	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	Оксид железа (73,1)	18,5	1	—	5,4	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—
9	Глинозем (75)	10	—	4,5	—	—	—	8,0	2,5	—	—	—	—	—
10	Оксид железа (36,8); каолин (36,8)	13,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13,2	—
11	Оксид железа (36,5); оксид хрома (36,5)	20,5	4,4	—	2,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	Каолин (36,8); оксид хрома (36,8)	13,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13,2	—
13	Каолин (68)	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15	—
14	Глинозем (35,6); оксид хрома (35,6)	8,8	—	4,4	—	13,4	—	—	2,2	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 2.3.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15	Венская известь (71,8)	23,0	—	1,5	—	1,5	—	—	2,2	—	—	—	—	—
16	Глинозем (40)	35	—	—	3	—	—	—	—	—	—	22	—	—
17	Окись хрома (60)	40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	Глинозем (17,0); окись хрома (63,0)	14,4	—	—	5,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19	Окись хрома (64)	23	4	—	8	—	1	—	—	—	—	—	—	—
20	Окись хрома (70)	20	—	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	Окись хрома (72)	13	2	—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	Окись железа (78)	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	Электрокорунд ЭБ М7-М14 (70)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	—	—	—
24	Огарок колчедана (39,4)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60,6	—	—	—
25	Электрокорунд ЭБ М5-М3 (59,4)	10,8	—	—	5	12,4	—	—	—	10,4	—	—	—	2
26	Электрокорунд ЭБ М5-М3 (80)	6,5	—	—	4	8	—	—	—	—	—	—	—	1,5
27	Окись железа (76,6)	18,8	—	—	—	—	3	—	—	—	1,6	—	—	—
28	Окись железа (31); окись хрома (41)	—	—	—	2,5	—	—	3,2	—	—	—	—	22,3	—
29	Меловая пудра или тальк (95)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5
30	Меловая пудра или тальк (100)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31	Казельгур (65,3)	—	—	—	21	1,5	—	—	10,7	—	—	1,5	—	—
32	Венская известь (71,8)	—	—	—	23	1,5	—	—	2,2	—	—	1,5	—	—
33	Венская известь (84)	—	—	—	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
34	Окись хрома (42); сульфат бария (38)	—	1,0	—	10	9	—	—	—	—	—	—	—	—
35	Трепел (70,0)	—	5	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—	—
36	Трепел (69)	—	—	—	—	19	12	—	—	—	—	—	—	—
37	Сапфировая пудра (10)	—	75	—	—	15	—	—	—	—	—	—	—	—
38	Электрокорунд ЭБ М5 (70)	15	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
39	Электрокорунд ЭБ М3 (50)	40	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Для наноабразивной обработки применяются водные суспензии на основе ультрадисперсного сферического абразива. Так, например, при обработке такой суспензией алюминиевых зеркал можно обеспечить отражательную способность около 98,1%.

Сглаживающий эффект, который оказывает абразивная суспензия с наличием сферического абразива, позволяет уменьшить резание-царапание поверхности и перейти к эффекту микровыкатывания.

Существует еще эффект химического взаимодействия высоковязкой жидкости со взвешенными абразивными частицами с обрабатываемой поверхностью. Эти два эффекта позволили получить максимальную отражательную способность на обрабатываемых деталях (рис. 2.3.25).

Важнейшим условием получения высокой эффективности процесса является выбор его режимов - скорости резания  $v$ , давления  $p$ .

## 2.3.13. Применение полировальных паст для обработки различных материалов

Обрабатываемый материал	№ пасты (см. табл. 2.3.12)	Обрабатываемый материал	№ пасты (см. табл. 2.3.12)
Коррозионно-стойкая сталь	1, 2, 10, 23, 24, 31, 34	Хром	1, 2, 3, 4, 8, 10, 16, 17, 21, 27, 29, 30, 34, 37
Углеродистая сталь	8, 11, 12, 16, 17, 19, 23, 27, 38, 39	Никель	1, 2, 4, 9, 15, 16, 17, 20, 27, 32, 33, 37
Алюминий и его сплавы	1, 5, 7, 15, 17, 20, 22, 25	Цинковые сплавы	14, 17, 32, 33
Медь и ее сплавы	1, 8, 9, 12, 13, 14, 16, 20, 23, 24, 27, 28, 31, 37	Серебро	8, 12, 13, 15, 27, 31, 32, 33
		Пластмассы	35, 36

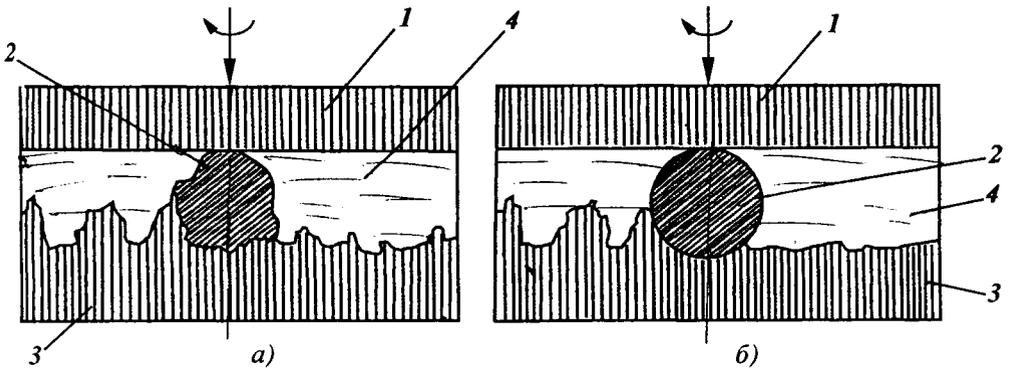


Рис. 2.3.25. Модель взаимодействия абразивного зерна стандартной (а) и сферической (б) формы с обрабатываемой поверхностью:

1 - полировальник; 2 - абразив; 3 - поверхность; 4 - жидкая среда

На рис. 2.3.26 в качестве примера приведены зависимость скорости съема  $Q$  от линейной скорости и давления  $p$  при полировании медных деталей.

Выбор режимов полирования зависит от различных факторов, связанных с материалом детали, достигаемыми параметрами поверхности, точностью обработки и т. д.

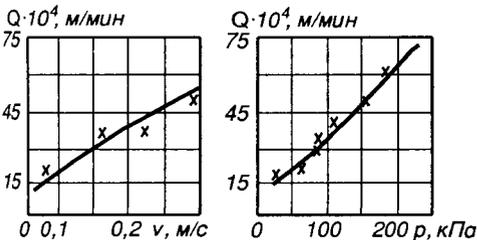


Рис. 2.3.26. Зависимость скорости съема  $Q$  от технологических параметров процесса абразивной доводки:

а - линейная скорость  $v$ , м/с; б - давление  $p$ , кПа

Как правило, технологический процесс полирования — это многостадийный процесс, включающий несколько переходов с использованием порошков различной зернистости. В табл. 2.3.14 приведен типовой технологический маршрут обработки медного плоского зеркала.

Для полирования применяются шлифовально-полировальные станки типа ШП550Б, ПД700, АД1000 и др. Кроме того, для декоративного полирования используют специальные станки.

В связи с появлением новых абразивных материалов начали применять обработку связанным абразивом с использованием композиционных полировальников.

Одним из таких композиционных материалов является абразивный инструмент на основе корундовых микросфер оксида циркония размером 30-70 мкм с толщиной стенки 3-4 мкм. Способы получения новых микросфер оксида алюминия — корунда могут быть различными, например плазменным методом

### 2.3.14. Типовой технологический маршрут абразивной обработки

Операции, характеристики абразива	Режим обработки		Параметры шероховатости поверхности Rz, мкм
	v, м/с	p, кПа	
Шлифование, АСМ14/10	0,18	200	0,050
Шлифование, АСМ10/7	0,18	180	0,050
Шлифование, АСМ7/5	0,15	120	0,040
Полирование, АСМ5/3	0,12	100	0,032
Полирование, АСМ3/2	0,10	80	0,025
Полирование, АСМ1/0	0,08	40	0,025

или газотермическим синтезом. Наиболее предпочтителен газодисперсный синтез, который обеспечивает стабильность геометрических размеров и высокую чистоту абразива.

В качестве связующего материала применяют кремнийорганический каучук, преимуществом которого является нетоксичность компонентов.

Рабочая поверхность инструмента подготавливается к работе точением — подрезкой торца на токарном станке. При этом происходит раскалывание микросфер, находящихся на рабочей поверхности абразивного инструмента, с образованием режущих элементов, а также пор, возникающих в местах выпадания

сфер, и полостей, находящихся внутри самих сфер.

Для обработки зеркал из труднообрабатываемых материалов, например из молибдена, вольфрама создано специальное суперфинишное оборудование, позволяющее получать высоту неровностей порядка 25 нм (0,025 мкм) и отклонения формы, например при обработке плоскости, около 1 мкм.

Станина станка устанавливается на четырех пневматических виброизолирующих опорах. Шпиндель обрабатываемого круга, стола и механизма правки вращаются в аэро-статических подшипниках.

Суппорты перемещаются на аэро-статических направляющих. Приводы линейных перемещений суппортов осуществляются через бесконтактные магнитные передачи винт-гайка, привод круговой подачи стола — через бесконтактный волновой редуктор. Электродвигатели и преобразователи всех электроприводов маловиброактивные.

При обработке может быть обеспечен параметр шероховатости поверхности  $Ra = 0,63 \dots 0,4$  мкм. Состояние поверхностного слоя в этом случае определяется тепловыми явлениями в зоне обработки, зернистостью шкурки, конструкцией круга, материалом детали.

Увеличение угловой скорости и степени деформации круга приводит к увеличению производительности. Сглаживание неровностей дуги полирования лепестковыми кругами происходит в основном за счет пластического течения материала.

В табл. 2.3.15 и 2.3.16 приведены режимы плоского и круглого полирования деталей из различных материалов лепестковыми кругами (ЛКП).

### 2.3.15. Оптимальные условия плоского полирования ЛКП

Материал детали	Ra, мкм	Круг	Зернистость лепестков	Скорость v, м/с	Деформация $\delta$ , мм
Сталь 45 закаленная и нормализованная	0,08—0,16	ПП300, L = 60 мм	14A4	33	0,8
	0,16—0,32		14A4	33	1
Чугун СЧ 20	0,32—0,63	ПП300, L = 60 мм	14A8	33	1,2
	0,63—1,25		14A12		1,2
Латунь Л62	0,16—0,32*	ПП300, L = 50 мм	14A4	30	0,5
	0,32—0,63		14A4		0,6
	0,63—1,25		14A8		0,8

\* Круги пропитаны

2.3.16. Оптимальные условия круглого полирования ЛКП

Материал детали	Ra, мкм	Круг	Зернистость лепестков	Скорость v, м/с	Деформация δ, мм
Сталь 45 закаленная и нормализованная	0,16–0,32*1	ПП300, L = 60 мм	14A4	33	1,0
	0,32–0,63		14A8		1,2
	0,63–1,25		14A12		1,3
Чугун СЧ 20	0,08–0,16*2	ПП300, L = 75 мм	14A4	35	1,2
	0,16–0,32		14A4		1,2
	0,32–0,63		14A8		1,5
	0,63–1,25		14A12		1,5
	0,08–0,16*1	ПП900, L = 100 мм	14A4	40–45	1,5
			14A8		2,0
14A12	2,0				
Латунь Л62	0,16–0,32*1	ПП600, L = 75 мм	14A4	30	0,8
	0,32–0,63		14A4		1,0
	0,63–1,25		14A8		1,2
АЛ4	0,32–0,63*1	ПП600, L = 75 мм	14A4	30	0,6
	0,63–1,25		14A4		0,8

\*1 Круги пропитаны.

\*2 Лепестки в круге пропитаны и наклонены под углом 45°.

2.3.4. ДОВОДКА

В арсенале средств технологического обеспечения высоких требований к качеству поверхностного слоя, точности размеров и формы обработанных поверхностей важное место занимает абразивная доводка.

Доводка является окончательным методом обработки, обеспечивающим высокое качество поверхностного слоя с получением Rz = 0,050 ... 0,010 мкм, отклонения размеров и формы обработанных поверхностей до 0,05 ... 0,3 мкм.

Требования к точности размеров и формы плоских, цилиндрических, сферических поверхностей, шероховатости поверхности и свойствам поверхностного слоя прецизионных деталей машин и приборов обеспечиваются на окончательных операциях изготовления методами абразивной доводки.

Параметры качества обработанных поверхностей после абразивной доводки зависят от режимов и условий процесса обработки. Механическая абразивная доводка позволяет повысить производительность обработки в 2–6 раз по сравнению с ручной доводкой.

Одностороннюю или двухстороннюю обработку плоских поверхностей осуществля-

ют с помощью плоского притира (притиров) в виде диска, плиты или трубчатого притира.

Доводку наружных цилиндрических поверхностей осуществляют как плоскими, так и цилиндрическими притирами, а внутренних цилиндрических поверхностей – в основном резными цилиндрическими притирами.

Выпуклые сферические поверхности обрабатывают сферическим инструментом в виде трубки или чашеобразной "шкалы", а вогнутые – инструментом в виде "грибка", диска или трубчатый инструментом.

Доводку шариков проводят между двумя притирами, один из которых имеет кольцевую канавку, а другой – плоский.

Различают два метода доводки в зависимости от типа инструмента (притира): доводка незакрепленными зёрнами абразива в составе абразивных паст и суспензий и доводка закрепленными зёрнами абразива (шаржированными притирами и абразивными кругами).

Как правило, доводка заготовок прецизионных деталей осуществляется за две-пять операций (или за два-пять переходов) с последовательным уменьшением зернистости применяемого абразива в составе суспензий и паст, используемых на операциях (переходах) предварительной, чистовой (окончательной) и

тонкой доводки, с целью получения требуемых параметров качества обработок.

Для повышения параметров качества доведенных поверхностей применяют предварительную селекцию деталей: интервал рассеяния доводимого (исходного) размера в партии одновременно обрабатываемых деталей должен быть не более 1/3 величины припуска под доводку.

Припуск на обработку на сторону назначается в зависимости от требуемых параметров качества обработки:

предварительная доводка: припуск 0,02 ... 0,05 мм, достигаемая точность обработки (отклонение от требуемой формы поверхности) 3 ... 5 мкм; параметр шероховатости  $R_a = 0,63 \dots 0,16$  мкм;

получистовая доводка: припуск 0,005 ... 0,015 мм, точность обработки 1 ... 2 мкм; параметр шероховатости поверхности  $R_a = 0,16 \dots 0,08$  мкм;

чистовая (окончательная) доводка: припуск 0,002 ... 0,005 мм, точность обработки 0,5 ... 1 мкм; параметр шероховатости поверхности  $R_a = 0,08 \dots 0,02$  мкм;

тонкая доводка: припуск 0,0002 ... 0,001 мм, точность обработки 0,1 ... 0,5 мкм, параметр шероховатости поверхности  $R_a = 0,02 \dots 0,005$  мкм.

Доводка абразивными пастами на притирах осуществляется посредством периодического нанесения пасты на поверхность притира (путем ее намазки) либо посредством предварительного шаржирования притира абразивными зернами с помощью специальных устройств с плоскими, роликовыми, кольцевыми правильно-шаржирующими инструментами.

Доводка абразивными суспензиями осуществляется двумя способами: при непрерывной подаче или с периодической дозированной подачей суспензии. Непрерывную подачу абразивной суспензии в зону обработки применяют для предварительной обработки.

Доводку с периодическим нанесением пасты применяют как для предварительной, так и для чистовой доводки.

Наивысшие параметры качества доведенной поверхности достигаются при тонкой доводке притирами, шаржированными зернами пасты.

Для повышения производительности обработки применяют абразивные круги вместо металлических притиров.

Доводку осуществляют суспензиями, пастами и мелкозернистыми кругами на основе микропорошков из следующих абразивных материалов: электрокорунда белого (23А, 24А, 25А), хлористого (33А, 34А), титанистого (37А), монокорунда (43А, 44А, 45А); карбида

кремния зеленого (62С, 63С, 65С), карбида бора (КБ) и эльбора зернистостью М40-М1; алмазных микропорошков марок АСМ, АСН (из синтетических алмазов), АМ и АН (из природных алмазов) зернистостью 60/40 - 1/0.

Для предварительной доводки применяют порошки зернистостью 5-4, микропорошки - М40-М14, для получистовой - М10-М5, для окончательной - М10-М3, для тонкой - М3-М1. Окончательную и тонкую доводку осуществляют также мягкими абразивными материалами - окисью алюминия, окисью хрома, крокусом и др.

Абразивные суспензии и пасты состоят из абразива и неабразивной части. Неабразивная часть паст содержит такие компоненты как парафин, стеарин, олеиновую кислоту, керосин, веретенное, дизельное, вазелиновое масла и т.д. В абразивных суспензиях абразив по массе составляет не более 20...30% и находится во взвешенном состоянии в керосино-масляной смеси с добавкой парафина, стеарина или олеиновой кислоты и т.д.

Абразивная способность паст и суспензий характеризует режущую способность абразивных зерен при конкретных условиях и режимах доводки, поэтому абразивная способность паст и суспензий определяет производительность обработки (съем материала заготовки в единицу времени и суммарный съем материала заготовки до полной потери работоспособности абразива).

Показатели качества поверхности после доводки (шероховатость поверхности и свойства поверхностного слоя) также зависят от факторов процесса, определяющих схему работы зерен в прослойке между заготовкой и притиром.

Материал притира и его свойства выбирают в зависимости от физико-механических характеристик обрабатываемого материала, требуемых производительности и параметров качества обработки.

Для доводки деталей из труднообрабатываемых материалов наиболее распространенными материалами притира является чугуны с ферритной, перлитной и перлитоферритной структурой. Обычно чугуны притиры изготавливают из серого чугуна СЧ 15, СЧ 18, СЧ 20, СЧ 25 твердостью 120 ... 200 НВ.

Для предварительной доводки наилучшие результаты по износостойкости имеют перлитные чугуны с крупнопластинчатым перлитом, хорошо удерживающим абразивные зерна.

Для окончательной доводки применяют более мягкие ферритные чугуны с фосфидной эвтектикой и перлитоферритные чугуны с мелкодисперсным и тонкопластинчатым пер-

литом. Из ферритных чугунов изготавливают притиры для шаржирования их мелкозернистым абразивом зернистостью МЗ-М1 (например, для доводки концевых мер длины).

При доводке деталей из цветных металлов и сплавов (алюминия, меди, магниевых сплавов), отожженных сталей рекомендуется применять в качестве материалов притиров оптическое стекло К8 или МКР-1 (пирекс), а также перлитные чугуны и цветные металлы (олово, свинец), которые хорошо шаржируются абразивом.

Производительность и показатели качества процесса абразивной доводки определяют следующие факторы:

технологические качественные факторы: вид абразива и рабочей жидкости абразивной суспензии, материал притира и заготовки, состояние их поверхностных слоев;

технологические количественные факторы: зернистость абразива, рабочее давление притира на заготовку, твердость материала притира и заготовки, соотношение жидкой и твердых составляющих абразивной суспензии;

кинематические факторы: соотношения угловых скоростей и линейных размеров звеньев исполнительного механизма доводочного станка, определяющие траекторию и законы изменения скорости и тангенциального ускорения относительного движения заготовки по притиру;

динамические факторы: среднее значение и закон изменения силы взаимодействия заготовки через абразивную прослойку с притиром, действующей в плоскости, касательной к поверхности контакта заготовки;

геометрические факторы: точность формы рабочей поверхности притира и заготовок, разноразмерность заготовок в партии перед доводкой, форма и размеры канавок для подвода абразивной суспензии, форма вырезов каблучков на рабочей поверхности притира, относительное расположение осей притира, сепараторов и заготовок в последних, а также соотношение линейных размеров обрабатываемых поверхностей заготовок и притира.

Физико-механической основой процесса абразивной доводки является процесс разрушения поверхностных слоев притира и заготовок под действием абразивных зерен.

На основе обобщения накопленных результатов исследований, производственного опыта можно выделить следующие особенности процесса доводки.

*Первая особенность:* обработку осуществляют композиционным инструментом, состоящим из следующих элементов: притира,

абразивных зерен, рабочей жидкости — суспензии (неабразивная часть пасты).

Обеспечение стабильных показателей обработки основано на стабилизации условий взаимодействия указанных элементов в системе заготовка - абразивная прослойка - притир. Когда абразивные зерна находятся в незакрепленном состоянии, рабочая поверхность притира является базовой поверхностью (основанием) для перемещения зерен в зазоре между заготовкой и притиром. Ориентация заготовки на рабочей поверхности притира происходит через абразивный слой суспензии или пасты. Если зерна закрепляются в материале притира при их шаржировании, то материал притира является связкой, удерживающей зерна в состоянии закрепления. В этом случае заготовки на притире ориентируются шаржированными зернами рабочей поверхности притира.

Рабочая жидкость и активные добавки в составе суспензии или пасты усиливают действие адсорбционных процессов, ускоряют механические процессы, приводящие к разрушению твердых тел.

Взаимодействие обрабатываемой поверхности заготовки через абразивную прослойку с рабочей поверхностью притира имеет динамический характер: осуществляется при перемещении заготовки по притиру (притиром) со скоростью  $v$  под действием внешней главной  $P_z$  и нормальной  $P_y$  сил.

Сила сопротивления  $F$  движению заготовки по притиру и нормальная сила реакции  $R_F$  являются усредненными значениями сил взаимодействия притира через отдельные абразивные зерна и неабразивную часть прослойки с заготовкой.

Постоянство от времени среднего значения силы  $F$ , направленной касательно к поверхности заготовки навстречу скорости  $v$ , свидетельствует о стабильности процесса доводки по производительности и ряду критериев шероховатости. В то же время такие характеристики поверхностного слоя, как глубина поверхностного (нарушенного обработкой) слоя, распределение дефектов по глубине, а также напряженное состояние поверхностного слоя определяются не только средним значением силы  $F_{cp}$ , но и мгновенными  $F_{max}$ ,  $F_{min}$ .

При одно- и двусторонней доводке взаимное изнашивание контактирующих поверхностей заготовки и инструмента указывают на взаимосвязь между давлением в зоне контакта заготовки и инструмента и износом поверхности заготовки. Взаимное изнашивание приводит к взаимной приработке заготовки и инструмента.

Приработка как временная стадия состоит из двух этапов: переходного процесса изнашивания и стадии приработки поверхностей. Переходный процесс связан с изменением формы рабочих поверхностей притирова во времени, приводящим к непостоянству толщины абразивного слоя между поверхностями заготовки и притирова.

Стадию приработки рассматривают как период изнашивания, в течение которого сохраняется форма рабочих поверхностей притирова. При этом характер сопряжения поверхностей притирова не является решающим (сопряжение профилей может быть полным или частичным). Приработка поверхностей представляет собой явление, происходящее при полном или частичном совмещении притира (притирова) и заготовки (заготовок), и имеет специфические особенности.

В пределах каждого участка поверхностей заготовки и притира действует один механизм разрушения материалов, воспроизводится некоторая однородная шероховатость поверхности, создаются определенные структура и напряженное состояние поверхностного слоя заготовки и притира, обеспечиваются постоянство формы изношенной поверхности притира, обрабатываемой поверхности заготовки.

Таким образом, качество обработанной поверхности детали будет изменяться в процессе доводки. В переходном процессе (до стадии приработки) качество поверхностного слоя заготовок будет формироваться на последних циклах их относительного движения по поверхности притира.

*Вторая особенность:* процесс доводки заготовки осуществляется, как правило, с переменной скоростью относительного движения заготовки по рабочей поверхности притира. Движение зерна с переменной скоростью приводит к изменению скорости деформации в материале поверхностного слоя заготовки и притира и, следовательно, к более неравномерному распределению деформаций и напряжений в локальных микрообъемах поверхностных слоев контактирующих тел. Характер разрушения поверхностного слоя, зависящий от взаимодействия зерен с твердым телом, определяется уровнем этих напряжений и физико-механическими свойствами материалов.

*Третья особенность:* процесс доводки заготовок незакрепленными абразивными зернами характеризуется различной степенью подвижности зерен, находящихся в зазоре между притиром и заготовкой. Характер воздействия абразивных зерен на поверхностные слои заготовки и притира зависят от степени их подвижности.

*Четвертая особенность:* при доводке действуют те же факторы, что и при абразивном изнашивании поверхностей деталей машин в процессе их эксплуатации.

Однако в процессе доводки для обеспечения высокой производительности и стабильности качества обработки заготовка должна находиться в условиях ускоренного абразивного разрушения, а притиры в условиях минимального абразивного износа.

*Пятая особенность:* стохастический характер взаимодействия твердых тел системы "заготовка—абразивная прослойка—притир".

Абразивное изнашивание и доводка по природе являются стохастическими процессами как процессы многократного импульсного воздействия абразивных зерен, находящихся в различные моменты времени в незакрепленном, полужакрепленном и закрепленном состоянии на поверхности заготовки или притира.

*Шестая особенность:* регенеративный характер процесса механической абразивной доводки.

При механической абразивной доводке имеют место регенеративные эффекты, посредством которых реакция технологической системы "процесс абразивного изнашивания — упругая система конструкции доводочного станка" проявляется в виде обратной связи с запаздыванием во времени, причем из-за износа как притир (инструмент), так и обрабатываемая заготовка участвуют в регенеративной обратной связи.

Внутренний (взаимное сближение заготовки и инструмента в текущий момент времени) и внешний (взаимное сближение заготовки и инструмента в предыдущий цикл их взаимодействия) регенеративные эффекты определяют возможность существования незатухающих колебаний в технологической системе механической абразивной доводки с частотами, близкими к резонансным частотам несвязанных колебаний отдельных составных частей упругой системы конструкции станка.

Указанные особенности процесса доводки необходимо учитывать при проектировании процесса механической абразивной доводки и доводочного оборудования.

По технологическому назначению доводочные станки в зависимости от формы и вида обрабатываемой поверхности разделяют на следующие типы: плоскодоводочные — для доводки плоских и наружных сферических поверхностей, внутридодочные — для доводки цилиндрических и конических поверхностей, специальные — для доводки внутренних и наружных фасонных поверхностей.

Доводочные станки для обработки плоских, цилиндрических, конических, сфериче-

ских и фасонных поверхностей по виду кинематической связи рабочих звеньев исполнительного механизма разделяют на два типа: станки с жесткой кинематической связью и станки с фрикционной связью между заготовками и инструментом (притиром). Эти станки имеют подвижные и неподвижные притиры с различными исполнительными механизмами, задающими закон относительного движения заготовки по притиру путем сочетания вращательных, качательных и поступательных движений притира (притиров), а также сепараторов, кассет, блоков (планов) с закрепленными или свободно установленными в них заготовками.

Механизация и автоматизация технологического процесса доводки и подготовки рабочей поверхности притиров на доводочных станках осуществляются с целью достижения стабильности параметров качества доведенных поверхностей деталей, снижения трудоемкости доводочных операций (переходов) и сокращения вспомогательного времени.

Механизация и автоматизация осуществляются по двум направлениям:

1) механизация и автоматизация цикла рабочих движений процесса обработки, т.е. основных движений, осуществляющих процесс формообразования поверхностей и формирования свойств поверхностного слоя деталей;

2) механизация и автоматизация технологического цикла доводки, т.е. автоматизация одновременно основных и вспомогательных движений, включая установочные (в том числе транспортных) перемещения с одной позиции на другую, контрольные движения, ходы и переходы).

Автоматизация цикла рабочих движений процесса доводки включает управление технологическими, кинематическими, геометрическими и динамическими факторами процесса:

рабочим давлением  $p$ , скоростью  $v$  и ускорением  $a^x$  относительного движения детали по притиру, характеристиками жесткости элементов упругой системы "притир — абразивная прослойка — заготовка".

Механизация и автоматизация вспомогательных и установочных движений при доводке на доводочных станках связана со следующими движениями: укладка на рабочую поверхность притира заготовок в гнезда сепараторов, снятие заготовок после доводки, подача абразивной суспензии (пасты) и рабочей жидкости в зону обработки, удаление шлама в процессе или после доводки партии заготовок, периодическая правка рабочих поверхностей притиров и т.д.

### 2.3.5. СТРУЙНАЯ, ЭКСТРУЗИОННАЯ И ТУРБОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

**Струйно-абразивная обработка.** Физическая сущность данного способа заключается в воздействии высокоскоростной ( $v = 30 \dots 70$  м/с) струи абразивно-жидкостной смеси на поверхность обрабатываемой заготовки. Как правило, такая струя направляется под углом  $\alpha$  к поверхности, который называется углом атаки. След воздействия абразивно-жидкостной струи на поверхность представляет эллипсовидное пятно-кратер; величина снятого слоя металла в центре и по краям кратера значительно отличается: от  $5 \dots 30$  мкм по краям до  $2 \dots 3$  мм в центре. Поэтому для обеспечения равномерности съема металла необходимы движения подачи либо струйного соплового аппарата, либо заготовки, либо того и другого. Скорости движений подачи могут изменяться в достаточно широких пределах.

Съем металла при струйно-абразивной обработке осуществляется в результате ударного воздействия абразивных зерен; частота ударов достигает  $10^6$  1/с. Разрушение металла происходит как в результате резания, так и усталостного нагружения микрообъемов металла.

На рис.2.3.27 приведена схема струйно-абразивной установки. Насос 6 подает абразивно-жидкостную смесь из бака 1 по трубопроводу 2 к струйному аппарату 3, который

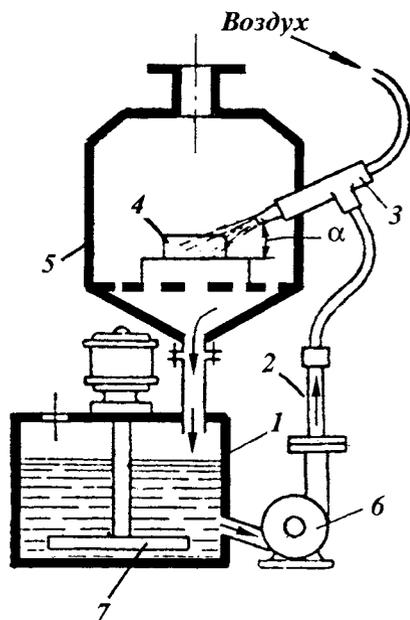


Рис. 2.3.27. Схема струйно-абразивной обработки

направляет струю смеси на заготовку 4. Обработка происходит в герметичной камере 5, откуда смесь стекает в бак 1. Для размешивания смеси имеется устройство 7 с отдельным приводом.

Установки для струйно-абразивной обработки работают как при низком (0,5 ... 0,8 МПа), так и при высоком (4 ... 10 МПа) давлении; последние используются для интенсификации обработки более грубых поверхностей заготовок.

Создан ряд установок-полуавтоматов, имеющих многопозиционные поворотные рабочие столы и несколько (до 16) одновременно работающих струйных аппаратов. Производительность таких установок достигает 100 ... 140 деталей в час.

Для мелкосерийного производства, а также для обработки заготовок особо сложной конфигурации, не имеющих баз, имеются ручные установки, снабженные специальными резиновыми рукавами-перчатками для рук оператора, который удерживает и поворачивает заготовку в рабочей камере.

Основным элементом струйно-абразивной установки является струйный аппарат, который формирует и направляет струю абразивно-жидкостной смеси. На рис. 2.3.28 приведена конструкция такого аппарата. Рабочая

смесь подается с помощью насоса в центральный канал 1; в каналы 2 подается сжатый воздух. В аппарате имеются промежуточное 3 и выходное сопла 6; расстояние  $l_0$  между соплами регулируется с помощью резьбовой втулки 4. Гайка 5 служит для соединения выходного сопла с втулкой 4. Цилиндрическое отверстие выходного сопла имеет диаметр 5 ... 7 мм и длину 50 ... 70 мм. Такой аппарат при давлении воздуха 0,3 ... 6,6 МПа обеспечивает получение скорости струи до 30 ... 70 м/с.

Выходные сопла струйных аппаратов подвергаются наибольшему изнашиванию; для повышения износостойкости их следует изготавливать из специальной термостойкой керамики.

Выбор абразивного зерна для струйно-абразивной обработки проводится на основе следующих рекомендаций: для предварительных, более грубых операций используется электрокорунд зернистостью 40-50, для окончательных — электрокорунд зернистостью 10 ... 20.

Концентрация зерен в рабочей смеси составляет от 1:1 до 1:3 (по массе). В состав смеси, кроме воды, входят кальцинированная сода - до 1% и поверхностно-активные вещества - до 2%.

Увеличение давления сжатого воздуха приводит к увеличению кинетической энергии струи и, как следствие, к повышению производительности обработки. Так, увеличение давления от 3 до 6 МПа повышает скорость съема металла более, чем в 3 раза.

Оптимальные значения угла атаки  $\alpha$  находятся в интервале 30 ... 60°. Увеличение расстояния от выходного сопла до заготовки уменьшает скорость съема металла; на предварительных операциях следует работать при длине струи 70 ... 80 мм, на окончательных операциях - при длине струи 150 ... 300 мм.

Скорость движения подачи (поступательного, качательного вращения) на предварительных операциях выбирают равной 0,5 ... 2 м/мин, на окончательных операциях - 0,15 ... 20 м/мин.

Скорость съема металла при струйно-абразивной обработке составляет 10-30 мкм/(мин·см<sup>2</sup>). Шероховатость обработанной поверхности при обработке зерном 25 ... 50 составляет  $Ra = 1,7 ... 2,4$  мкм, зерном 14 ... 28 —  $Ra = 0,4 ... 0,7$  мкм.

Поверхностный слой металла глубиной 20 ... 50 мкм в результате струйно-абразивной обработки упрочняется (степень наклепа 1,2-1,4); в нем формируются остаточные напряжения сжатия, фазовые изменения металла отсутствуют.

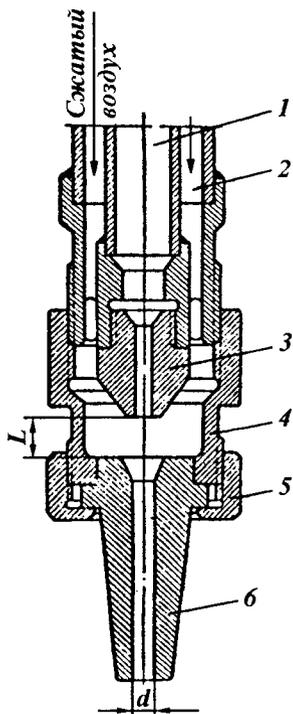


Рис. 2.3.28. Струйный аппарат

Струйно-абразивная обработка наиболее эффективна при обработке несимметричных, несбалансированных сложнопрофильных деталей средних размеров; при этом могут быть обработаны как наружные, так и внутренние поверхности. Широко применяют этот способ при обработке пресс-форм, литьевых форм, турбинных лопаток, литых и штампованных сложнопрофильных деталей, лемехов и отвалов тракторных плугов.

**Экструзионно-абразивная обработка.** Физическая сущность этого способа отделочной абразивной обработки заключается в продавливании через обрабатываемую поверхность специальной абразивной пасты, имеющей высокую вязкость. Схема экструзионно-абразивной обработки представлена на рис. 2.3.29. На пасту 1, находящуюся в верхнем цилиндре 2, давит пуансон 3, который передает давление масла, создаваемое гидростанцией 8. Паста перемещается через обрабатываемое отверстие заготовки 4 в нижний цилиндр 5. После того, как весь объем пасты переместится в нижний цилиндр, подача масла в верхний цилиндр прекращается с помощью крана 7, и масло подается к пуансону 6 нижнего цилиндра, что вызывает перемещение пасты в обратном направлении. Такое циклическое возвратно-поступательное движение абразивной вязкой пасты (своеобразного эластичного инструмента) аналогично движению брусков в процессе хонингования, поэтому этот способ называют также "экструзионным хонингованием".

При перемещении абразивной пасты относительно обрабатываемой поверхности абразивные зерна под действием гидростатического давления внедряются в обрабатываемую поверхность и осуществляют микрорезание и пластическое отгеснение металла. Дав-

ление при этом способе обработки составляет от 4 ... 5 МПа при обработке относительно мягких сплавов алюминия, меди и до 10-14 МПа — при обработке стали. Такое давление уплотняет слой пасты и процесс обработки приближается к способам обработки инструментом с закрепленным в эластичной связке абразивным зерном.

Паста для экструзионно-абразивной обработки представляет смесь абразивных зерен с вязким связующим, состоящим из эластичного полимера, смазочного вещества и поверхностно-активных добавок. Вязкость пасты должна повышаться с увеличением диаметра обрабатываемого отверстия. В качестве абразивного материала используют порошки эдэктрокорунда, карбида кремния, алмаза. Размер зерен составляет 20 ... 500 мкм; в ряде случаев используют смесь порошков различной зернистости. Содержание абразива в пасте находится в пределах 25 ... 75% (мас.). Приготовление пасты заключается в смешивании связующего и абразивных зерен, причем оба компонента предварительно нагреваются до температуры 60 ... 100 °С.

Создан ряд установок, в том числе автоматизированных, для экструзионно-абразивной обработки, включающих следующие основные узлы: гидравлическую систему высокого давления, блок с зажимным устройством для установки и закрепления заготовок, пульт управления. Используя сменные вставки в зажимном устройстве; можно обрабатывать заготовки различных размеров и формы. Система управления позволяет регулировать рабочее давление, число циклов перекачки пасты в единицу времени, машинное время обработки. Объем используемой пасты достигает 20 000 см<sup>3</sup>.

Экструзионно-абразивный способ используют для финишной обработки отверстий малых (менее 6 ... 8 мм) диаметров, некруглых и сложнопрофильных отверстий, окон, пазов в матрицах штампов и пресс-форм, а также в других деталях. Особенно эффективен этот способ для снятия заусенцев и округления кромок в пересекающихся отверстиях. Машинное время обработки составляет от 2 до 20 мин. Обеспечивается получение параметра шероховатости поверхности  $Ra = 0,08 \dots 0,12$  мкм при исходном параметре  $Ra = 1 \dots 1,5$  мкм.

Можно одновременно обрабатывать несколько отверстий (12-16).

**Турбоабразивная обработка.** Данный способ отделочной обработки основан на использовании так называемого "кипящего" слоя абразивных зерен, образующегося в рабочей камере при подаче восходящего потока воздуха через воздухораспределительную ре-

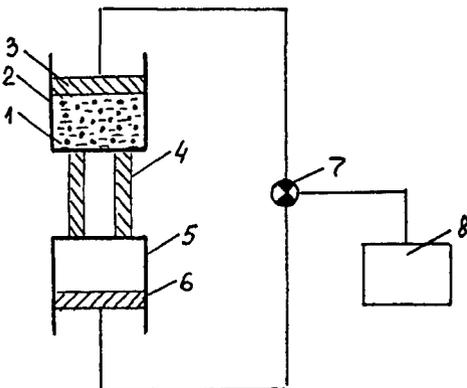


Рис. 2.3.29. Схема экструзионной абразивной обработки

щетку, являющуюся дном рабочей камеры (рис. 2.3.30). Абразивные зерна совершают в "кипящем" слое перемещения в различных направлениях со скоростью 0,1 ... 0,5 м/с и осуществляют микроударное воздействие на поверхность заготовки, которая вводится в рабочую камеру. Ввиду относительно малой энергии и частоты ударов зерен при неподвижной заготовке интенсивность съема металла в этом случае не превышает 0,02 ... 0,03 мкм/мин (или 0,015 ... 0,03 мг/(мин·см<sup>2</sup>)). С целью повышения производительности обработки заготовке сообщают рабочее движение (вращение, планетарное движение) со скоростью 15 ... 30 м/с, что приводит к значительному увеличению частоты ударов зерен (до 300 ... 400 1/(с·мм<sup>2</sup>) [вместо 4-5 1/(с·мм<sup>2</sup>) при неподвижной заготовке] и энергии соударения. В результате интенсивность съема металла увеличивается до 1,5 ... 2 мкм/мин и более, что значительно превышает показатели, например, виброабразивной обработки.

Степень разреженности и текучесть "кипящего" слоя абразивных зерен весьма высоки, поэтому этим способом можно обрабатывать заготовки сложной формы. Путем соответствующего расположения заготовки можно обеспечить либо одинаковое, либо различное по интенсивности воздействие абразивных частиц на различные участки профильной поверхности. Наиболее интенсивной обработке подвергаются кромки и прикро-

мочные зоны, что делает данный способ высокоэффективным для удаления заусенцев и округления кромок на заготовках после операций резания и штамповки. "Кипящий" слой абразивных зерен является своеобразным инструментом; рекомендуется использовать при турбоабразивной обработке зерно абразивных материалов, обладающих повышенной прочностью и ударной вязкостью. К таким абразивным материалам относятся легированные электрокорунды: хромотитанистый электрокорунд марок 91А, 92А и циркониевый электрокорунд марки 38А. Для предварительных, более грубых операций следует применять зерно 50 - 80 (размер зерен основной фракции 500 ... 800 мкм); для окончательных операций зерно 12-25 (размер зерен основной фракции 120 ... 250 мкм). Высота насыпного слоя зерен в рабочей камере определяет следующим образом

$$H_{н.с} = (0,2 \dots 0,3)D_з + H_0,$$

где  $D_з$  - диаметр заготовки;  $H_0$  - расстояние от нижнего края заготовки до воздухораспределительной решетки, равное 40 ... 60 мм.

При образовании "кипящего" слоя его высота  $H_{н.с}$  составляет (1,4 ... 1,5) $H_{н.с}$ .

Износ абразивных зерен в процессе обработки происходит в виде скалывания микрочастиц, которые удаляются из рабочей камеры потоком воздуха вместе с частицами металла. Добавление зерна в рабочую камеру

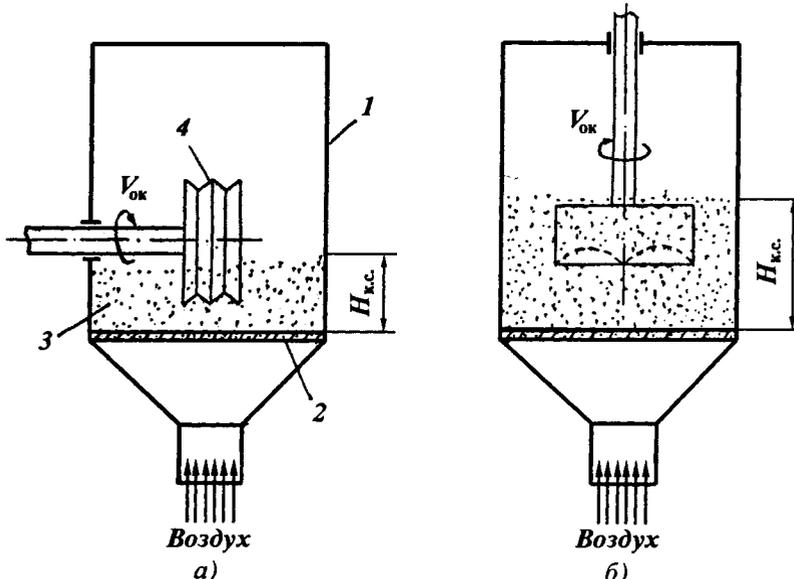


Рис. 2.3.30. Схема процесса турбоабразивной обработки с горизонтальной (а) и с вертикальной (б) осью вращения заготовки:

1 - рабочая камера; 2 - воздухораспределительная решетка; 3 - абразивное зерно; 4 - заготовка

до требуемого уровня проводится при обработке сплошных поверхностей не чаще 1 раза в две-три смены, при обработке прерывистых поверхностей, когда зерно разрушается более интенсивно, через 2 ... 4 ч работы.

Турбоабразивная обработка обеспечивает получение однородного микрорельефа поверхности, отношение  $R_{max}/R_a$  составляет 7-8 (после шлифования 10-12). После обработки зерном 63-80 достигается параметр шероховатости  $R_a = 0,6 \dots 1$  мкм; зерном 40-50 —  $R_a = 0,4 \dots 0,6$  мкм; зерном 16-25 —  $R_a = 0,2 \dots 0,4$  мкм; зерном 8-12 —  $R_a = 0,16 \dots 0,2$  мкм. Форма микронеровностей характеризуется большими радиусами округления выступов (до 300 ... 400 мкм) и малыми углами наклона боковых сторон (1,4 ... 1,6°).

Вследствие малых сил взаимодействия абразивных зерен с металлом и высокой степени разреженности "кипящего" слоя процесс турбоабразивной обработки является низкотемпературным; какие-либо фазово-структурные изменения в поверхностном слое не обнаружены. Установлено образование остаточных напряжений сжатия, величина которых составляет 300 ... 600 МПа, а глубина распространения — до 15 мкм.

Приведенные параметры качества поверхности после турбоабразивной обработки обеспечивают повышение эксплуатационных свойств деталей. Так, сопротивление усталости увеличивается до 30 ... 40%, что особенно

важно для деталей, работающих в условиях высокодинамических нагрузок (например, диски турбин и газотурбинных двигателей). Улучшается сцепление поверхности с покрытиями.

Созданные для турбоабразивной обработки установки-полуавтоматы позволяют обрабатывать детали диаметром от 50 до 1200 мм, длиной до 300 мм. На установке может одновременно обрабатываться партия заготовок, установленных на оправке (планшайбе, кассете). Для крупносерийного и массового производства имеются многошпиндельные установки, производительность которых достигает 50 ... 80 дет./ч. При оснащении роботами-манипуляторами для установки и снятия деталей турбоабразивные установки могут быть использованы в качестве модулей для финишной обработки в гибких автоматизированных производствах.

Основные технические характеристики турбоабразивных установок приведены в табл. 2.3.17; имеется также ряд других модификаций установок. На рис. 2.3.31 приведена схема основных узлов установки мод. ТАУ-500. Обработка проводится в рабочей камере 5, куда вводится заготовка, получающая вращение от электродвигателя 7, смонтированного вместе с шпиндельным узлом 6 на поворотной платформе.

### 2.3.17. Основные технические характеристики турбоабразивных установок

Параметр	Одношпиндельные установки				Многошпиндельные установки	
	ТАУ-250	ТАУ-500	ТАУ-800	ТАУ-1200	ТАУ-250-2	ТАУ-220-4
Размеры деталей, мм:						
диаметр	50—250	200—500	500—800	800—1200	15—250	160—220
длина, не более	250	200	400	600	350	280
Частота вращения деталей, мин <sup>-1</sup>	1500; 3000; 6000	600; 1050; 1500	375; 750; 1500	375; 500; 750	1500; 3000; 6000	3000
Мощность электро- двигателей, кВт	12	16	23	26	12	33
Расход сжатого возду- ха, м <sup>3</sup> /ч	400—1000	800—2000	1200— 3000	2000— 5000	1000—1800	1500—3000
Габаритные размеры, мм	3400× ×1300× ×2640	1790× ×2000× ×2340	4200× ×2900× ×3450	4360× ×1460× ×3400	3000× ×2500× ×2950	3150× ×2200× ×3000
Масса, кг	900	1130	2560	3850	1200	1400

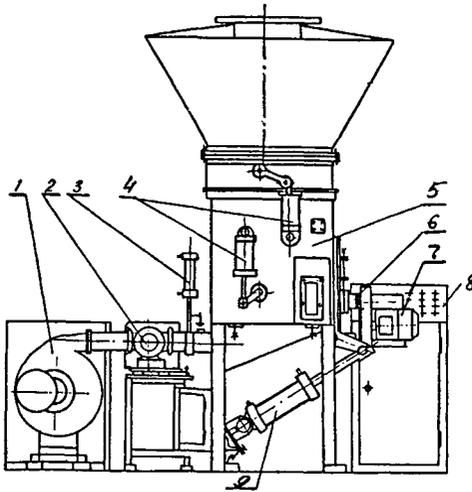


Рис. 2.3.31. Схема основных узлов турбореактивной установки

Поворот платформы в грузозачное или рабочее положение осуществляется пневмоцилиндром 9. Поддача воздуха в рабочую камеру для образования "кипящего" слоя осуществляется вентилятором 1; для регулирования расхода и времени подачи воздуха служат автоматическая заслонка 3 и пульсатор 2, для автоматизации перекачки абразивного зерна — пневмоцилиндры 4. Для управления установкой имеется пульт 8. Мощность привода вращения детали определена, исходя из установленных значений удельной мощности, равных 1,5 ... 2 Вт/см<sup>2</sup>.

Процесс турбоабразивной обработки позволяет ликвидировать трудоемкие ручные операции при решении технологических задач:

- удаление заусенцев и скругление кромок после операций обработки резанием, штамповки; при этом величину радиуса округления кромок можно регулировать;

- финишная обработка профильных поверхностей с получением параметра шероховатости поверхности  $Ra = 0,16 \dots 0,3$  мкм;

- подготовка поверхностей под различные покрытия;

- удаление окалины, следов коррозии и т.п.

Турбоабразивным способом обрабатывают детали из различных машиностроительных материалов: конструкционных, инструментальных и коррозионно-стойких сталей цветных, титановых и жаропрочных сплавов. Примерами высокоэффективного применения технологии турбоабразивной обработки являются: обработка дисков турбин и газотурбин-

ных двигателей после протягивания пазов под лопатки; обработка зубчатых колес после зубонарезания; обработка гребенок-ножей электрических стригальных машинок после прорезки зубьев; обработка декоративных автомобильных колесных колпаков, деталей люстр, деталей стиральных машин, термосов после штамповки; обработка поршневых колец после токарных операций; финишная обработка алмазных отрезных дисков с вскрытием алмазосодержащего слоя.

### 2.3.6. ВИБРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Обрабатываемые заготовки и рабочая абразивно-жидкостная смесь помещаются в контейнер 1 (рис. 2.3.32), которому сообщаются колебательные движения (показаны стрелками) с помощью специального вибратора (на рисунке — вращающийся от отдельного привода вал 7 с неуравновешенным грузом 8). Контейнер соединен с жесткой рамой 9 через пружины 6 и 10. В контейнер по шлангу 2 подается жидкость из бака 4 с помощью насоса 3; слив из контейнера происходит по шлангу 5.

В результате воздействия вибраций в контейнере происходит интенсивное движение заготовок и абразивных частиц; их относительное перемещение и инерционные силы создают условия для микроударного воздействия и микроцарапания поверхности заготовок абразивными частицами, т.е. для съема металла и формирования микрорельефа. С увеличением интенсивности колебаний (частоты, амплитуды) в определенных пределах производительность виброабразивной обработки повышается. В большинстве случаев обработку проводят при частоте колебаний 30 ... 50 Гц и амплитуде 2 ... 5 мм. При этом скорости относительного движения абразивных

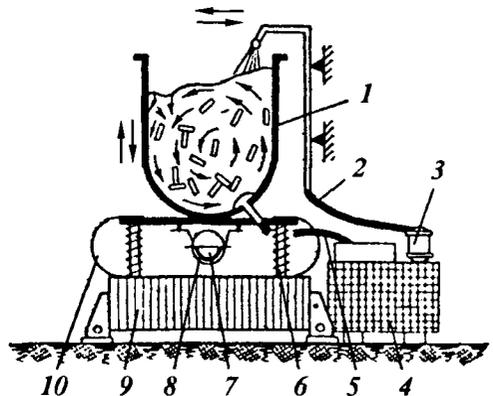


Рис. 2.3.32. Схема виброабразивной обработки

частиц составляют  $0,3 \dots 1$  м/с, силы микроударов могут изменяться в широких пределах и достигать  $10 \dots 20$  Н, давление абразивного слоя на поверхность заготовки -  $0,002 \dots 0,05$  МПа.

Колебания могут быть прямолинейными, плоскостными и объемными. Наиболее эффективны плоскостные (двухкомпонентные) и объемные (трехкомпонентные) колебания. При плоскостных колебаниях абразивные частицы и заготовки имеют три степени свободы: перемещения по двум осям координат и вращение вокруг третьей оси; при объемных колебаниях происходят перемещения по трем осям координат и вращение относительно любой оси. Установки для виброабразивной обработки, в которых используются плоскостные и объемные колебания, обеспечивают наиболее высокие производительность и качество.

Создан ряд конструкций виброабразивных установок, у которых можно выделить следующие основные признаки. По форме рабочей камеры-контейнера имеются установки с U-образной, V-образной, цилиндрической, тороидальной и спиральной камерой. На рис. 2.3.33 и 2.3.34 показаны наиболее часто применяемые установки с тороидальной и со спиральной камерой (типа "спиратрон"). В этих камерах абразивные частицы и заготовки совершают сложное движение по кольцевым траекториям и вдоль оси камеры, в "спиратроне" — по восходящей спирали.

По типу устройства-вибратора, создающего колебания, известны установки с инерционными вибраторами (с вращающейся неуравновешенной массой), с кривошипными или кулачковыми вибраторами, с электромагнитными вибраторами.

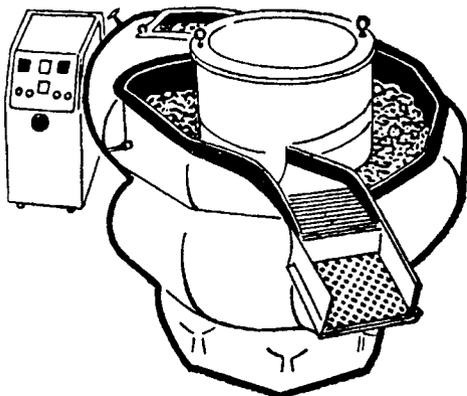


Рис. 2.3.33. Установка с тороидальной камерой

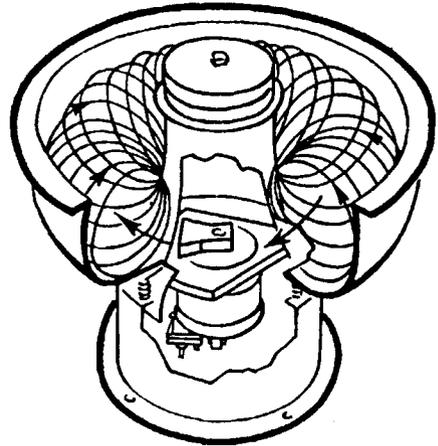


Рис. 2.3.34. Установка типа "спиратрон"

По числу рабочих камер имеются одно-, двух- и четырехкамерные установки. Объем камеры может изменяться в пределах  $10 \dots 27000$  дм<sup>3</sup>.

С целью автоматизации вспомогательных операций виброабразивные установки оснащают устройствами для загрузки и выгрузки заготовок, для транспортировки рабочей смеси, для разделения обработанных деталей и рабочей смеси, для промывки и сушки деталей. Такие автоматизированные установки непрерывного действия используют в крупносерийном и массовом производстве.

Созданы установки для шпиндельной виброабразивной обработки, при которой обрабатываемая заготовка устанавливается внутри контейнера на шпинделе и вращается.

Для виброабразивной обработки разработан специальный инструмент — абразивные тела в форме призм, пирамид, конусов, звездочек, шаров. Такие тела изготавливают из электрокорунда различных марок на керамической и полимерной связках. Кроме того, для этой технологии используют абразивные частицы произвольной формы, полученные дроблением боя и отходов шлифовальных кругов с последующим рассевом дробленых частиц на фракции. Отличительной особенностью абразивных тел и частиц для виброабразивной обработки является их высокая твердость, соответствующая степеням твердости Т-ЧТ, что необходимо для уменьшения интенсивности их изнашивания в процессе обработки.

Для предварительных, более грубых операций используют абразивные наполнители зернистостью 40-25; для окончательных операций — наполнители зернистостью 8-М20. В табл. 2.3.18 приведены скорость съема металла и параметры шероховатости поверхности.

### 2.3.18. Скорость съема металла и параметры шероховатости поверхности при обработке стали Ст3

Зернистость	40	16	8	4
Скорость съема металла, мкм/мин	0,18	0,09	0,06	0,02
Параметр шероховатости Ra, мкм	5,3	2,5	1,6	0,9

Наполнители на полимерной связке используют для полировальных операций; для этой же цели используют наполнители из дерева, войлока, фетра с добавлением шлифовальных порошков и полировальных паст.

Жидкости, применяемые для рабочих смесей, представляют водные растворы щелочей, солей и кислот с добавками поверхностно-активных, антикоррозионных, осветляющих веществ. Наиболее широко распространены 2 ... 3%-ный раствор кальцинированной соды, слабые растворы серной, соляной, ортофосфорной кислот, раствор хромпика. В качестве добавок используют олеиновую и стеариновую кислоты, медный купорос, тиомочевину, скипидар и др.; содержание добавок не превышает 1 ... 1,5%.

Вследствие малых скоростей и контактных сил производительность съема металла при виброабразивной обработке низка и находится в пределах 0,05 ... 0,2 мкм/мин. Поэтому машинное время обработки достаточно велико, от 30 мин до нескольких часов.

Виброабразивная обработка – низкотемпературный процесс, не приводящий к каким-либо фазовым изменениям в поверхностном слое металла; она формирует остаточные напряжения сжатия 200 ... 500 МПа и упрочняет поверхностный слой; степень упрочнения составляет 25 ... 30 %.

В результате виброабразивной обработки достигается значительное уменьшение шероховатости поверхности. Так, при исходном параметре шероховатости Ra = 10 ... 20 мкм за одну операцию шероховатость уменьшается до Ra = 1,25 ... 2,5 мкм, а за две-три операции – до Ra = 0,32 ... 0,63 мкм. На операциях виброполирования получена шероховатость Ra = 0,08 ... 0,16 мкм.

Виброабразивная обработка позволяет также удалять заусенцы и скрутывать острые кромки после операций резания и штамповки, удалять окалину после термообработки, подготавливать поверхности под покрытия.

Область применения виброабразивной обработки – сравнительно небольшие, массой до 1-2 кг, детали сложной формы, обладающие достаточно высокой жесткостью, не имеющие баз. Это литые заготовки из цвет-

ных сплавов, стали, чугуна, а также заготовки, полученные штамповкой и методом порошковой металлургии. В качестве примеров эффективного применения виброабразивной обработки служат турбинные лопатки мелких и средних размеров, детали санитарно-технической арматуры, заготовки постоянных магнитов (очистка отливок), заготовки режущих инструментов (очистка от окалины), шайбы, шпонки, скобы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев Н. Д. Ламинарный двухфазный факел. Эксперимент и теория. // Автореферат диссертации на соиск. уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. - Одесса: ОГУ, 1987. 22 с.
2. А.С. /патент/ СССР № 4905867/05, 1991. Назаров Ю. Ф., Безродных А. К., Агеев Н. Д., Рубан В. М. Состав для полирования металлических поверхностей.
3. Доводка прецизионных деталей машин / П. Н. Орлов, А.А. Савелова, В.А. Полухин, Ю. И. Нестеров; Под ред. Г. М. Ипполитова. М.: Машиностроение. 1978. 256 с.
4. Маринин Г. В., Колокольцев Г. И., Лазарев М. Д. и др. Нанотехнология и обработка с субмикронной точностью. // Технология: Науч.-техн. сб. / ЦНТИ "Поиск". 1990. С. 9-18 (Сер. "Технология машиностроения". Вып. 3).
5. Назаров Ю. Ф., Талдонов Г. В. Курченко В. В. Основы наноабразивной обработки деталей машин // Вестник машиностроения. 1997. № 9. С. 25-28.
6. Орлов П. Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение. 1988. 384 с.
7. Рубан В. М., Назаров Ю. Ф., Лурье Г. Б. и др. Исследование зависимости скорости полирования от технологических факторов обработки // Алмазы и сверхтвердые материалы. 1980. № 10. С. 89.
8. Рубан В.М., Назаров Ю.Ф., Лурье Г.Б. Оптимизация процесса абразивной обработки зеркальных металлических поверхностей // Науч.-техн. сб. "Алмазы и сверхтвердые материалы". М.: НИИМАШ, 1981. Вып. 4. С. 17-19.
9. Сагателян Г. Р. Разработка абразивного инструмента для доводки основ магнитных дисков памяти / "Чистовая обработка материалов резанием" / МДНТП. 1978. С. 15-19.
10. Скворцов К. Ф. Полирование прецизионных деталей в приборостроении // Труды МГТУ "Технология производства электронной аппаратуры". М.: МГТУ, 1989. С. 4-41. № 538.
11. Ящерицын П. И., Зайцев А. Г., Баработько А. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. Минск: Наука и техника. 1976. 282 с.

Глава 2.4

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

2.4.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) представляет собой процесс формоизменения заготовки вследствие электрических импульсов. Она включает: обработку сформированными генератором короткими (до  $3 \cdot 10^{-4}$  с) импульсами (электроискровой процесс); длинными импульсами (электроимпульсная обработка); импульсами, возникающими в межэлектродном пространстве (МЭП), при работе в жидкой и газовой среде (электроконтактный процесс, упрочнение и легирование).

Применяют несколько технологических схем электроэрозионной обработки.

1. **Прошивание** – удаление металла из полостей, углублений, отверстий, пазов, с наружных поверхностей. На рис. 2.4.1 показаны схемы изготовления углубления и фасон-

ного отверстия. Электрод-инструмент 1 поступательно перемещается к заготовке 2 со скоростью  $v_n$  (см. рис. 2.4.1, а). Оба электрода помещены в ванну 3, заполненную диэлектриком 4. Продукты обработки 5 выбрасываются в межэлектродный промежуток и оседают на дно ванны. Прошиванием можно получать поверхности с прямой и с криволинейной осью.

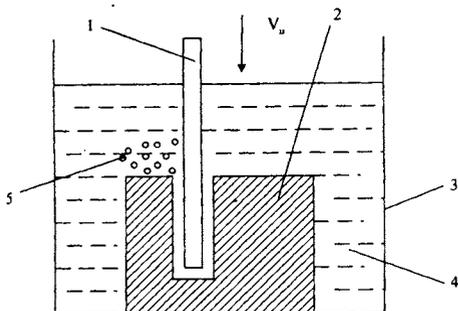
Существует два варианта прошивания:

*прямое копирование*, когда электрод-инструмент находится над заготовкой (рис.2.4.1, а);

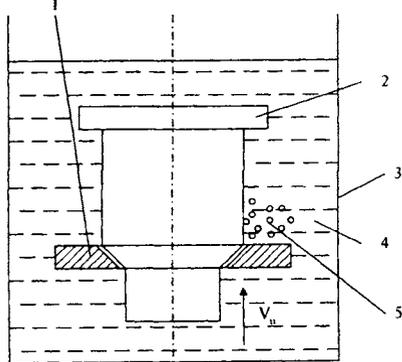
*обратное копирование* с расположением заготовки 1 над электродом-инструментом 2 (рис.2.4.1, б). Движение подачи здесь может осуществлять заготовка относительно электрода.

Второй вариант позволяет облегчить удаление продуктов обработки 5 и за счет сокращения числа боковых разрядов через частицы расплавленного металла в межэлектродном промежутке повысить точность обработки детали.

2. **Электроэрозионное шлифование**, схема которого приведена на рис. 2.4.2. Металлический электрод-инструмент 1 в форме диска совершает вращательное и поступательное движение к заготовке 2 со скоростью  $v_n$ . Заготовка может вращаться, как показано на рис. 2.4.2. Жидкость подают поливом из насадки 3. При небольших габаритах заготовок процесс может протекать в ванне с рабочей жидкостью. Шлифование может быть как встречным, так и попутным.



а)



б)

Рис. 2.4.1. Схемы прошивания: а – углубления; б – отверстия

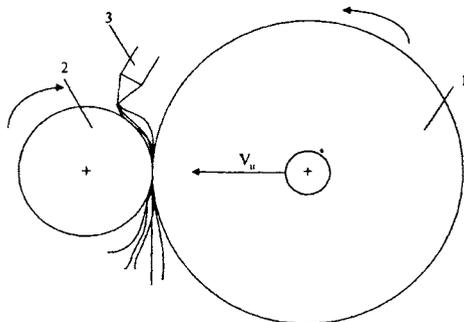


Рис. 2.4.2. Электроэрозионное шлифование диском

3. **Разрезание профильным или непрофильным инструментом** включает разделение заготовки на части – *отрезание* – и получение непрямолинейного контура – *вырезание*, которое выполняется только непрофильным электродом-инструментом. Профильный электрод-инструмент 1 при разрезании деталей (рис. 2.4.3, а) может быть выполнен в форме диска или пластины. Его перемещают к заготовке 2 со скоростью  $v_n$  вдоль детали.

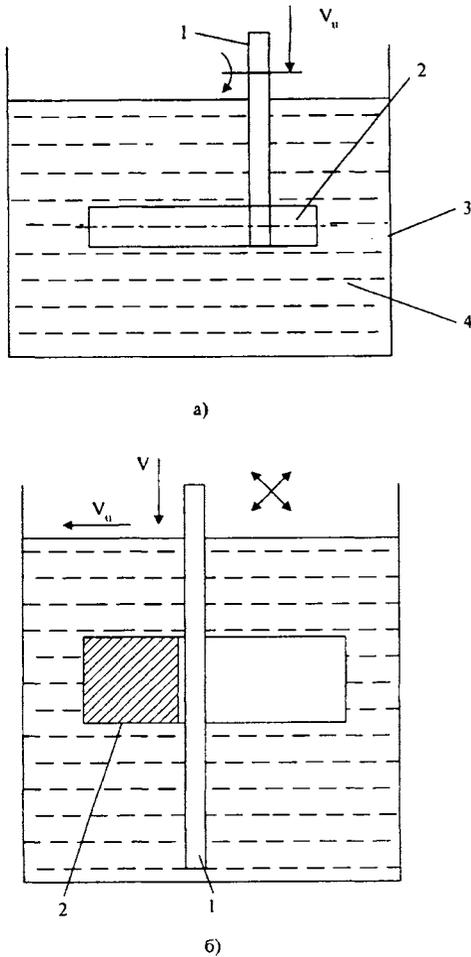


Рис. 2.4.3. Разделение заготовок:

а — пластиной; б — непрофилированным электродом-проволокой

Обработка выполняется в ванне 3 с диэлектрической жидкостью 4. Если разрезание выполняется пластиной с одним поступательным перемещением ее к заготовке, то это будет прошивание. В случае использования непрофилированного электрода (рис. 2.4.3, б) инструмент 1 выполняют в форме круглой проволоки диаметром 0,002 ... 0,3 мм или стержня, которые могут перемещаться в различных направлениях со скоростью  $v_n$  в любой части заготовки 2. Для устранения влияния износа электрода-инструмента на точность прорезаемых пазов проволоку или стержень перемещают (обычно перематыванием) вдоль оси со скоростью  $v$ . Разрезание выполняют в ванне с диэлектрической жидкостью.

**4. Электроэрозионное упрочнение и восстановление деталей**, включающее легирование и наращивание поверхности, обычно осуществляют на воздухе и в газах. Частицы расплавленного металла инструмента на воздухе не успевают остыть и оседают на поверхности заготовки, образуя на ней слой сплава, насыщенного легирующими элементами электрода-инструмента (либо легирующим компонентом из состава рабочей среды). Кроме того, нанесенный на заготовку слой закален до высокой твердости и имеет за счет этого повышенную износостойкость.

Производительность  $Q$  процесса оценивается отношением объема или массы удаленного (или нанесенного) металла ко времени обработки. Исключение составляют операции разделения и вырезки деталей, где под производительностью понимают отношение площади боковой поверхности паза ко времени обработки.

Этот показатель находят по зависимости

$$Q = \psi A_n f,$$

где  $A_n$  — энергия импульса;  $\psi$  — коэффициент, учитывающий количество холостых импульсов:  $\psi = f / f_{т.и}$  (здесь  $f_{т.и}$  — частота импульсов, вырабатываемых генератором;  $f$  — частота импульсов, вызывающих эрозию).

Для получения высокопроизводительного режима необходимо, чтобы  $\psi$  был ближе к единице, т.е. чтобы как можно больше импульсов участвовало бы в процессе эрозии. При малой частоте импульсов  $\psi \approx 0,85$ ; в случае высокой частоты  $\psi \approx 0,75$ . Через  $\psi$  обозначен объем металла, снимаемого одним или несколькими импульсами с суммарной энергией 1 Дж. Объем расплавленного металла можно найти из уравнения теплопроводности, если принять температуру  $T$  на 50 ... 100 К выше температуры плавления материала электрода. Введя коэффициент  $k = \psi a$  и выразив частоту через длительность импульса  $f = 1 / (q\tau_n)$ , расчет ведут по зависимости

$$Q = k A_n / (q\tau_n),$$

где  $q$  — скважность;  $k$  — коэффициент, который находят экспериментально. Он зависит от вида и состояния рабочей среды, ее прокачки, материалов и размеров электродов, характеристики импульсов.

Таким образом, повысить производительность можно, если подобрать оптимальное сочетание факторов, позволяющих увеличить долю полезных рабочих импульсов. Для этого необходимо достичь оптимального соотношения между максимальным значением силы тока  $I_{max}$  в импульсе и его длительностью  $\tau_n$ .

Например, в случае режимов обработки со средней силой тока 10 ... 100 А наибольшая производительность может быть достигнута при соотношении  $I_{\max}/\tau_{\text{и}} = 5...8$  МА/с.

Для черновых операций используют импульсы с энергией более 1 Дж, для чистовых — от 0,1 до 1 Дж и отделочных — менее 0,1 Дж. Технологические показатели рассматриваются для жидкой диэлектрической среды.

Если увеличивать площадь обрабатываемой поверхности, то скорость съема металла будет возрастать, но в дальнейшем произойдет ее снижение. Это объясняется тем, что с течением времени ухудшаются условия удаления продуктов обработки из межэлектродного промежутка. Все большее число импульсов генератора не будет вызывать эрозии из-за накопления газов и металлических частиц в пространстве между электродами.

Количество продуктов обработки зависит также от энергии импульсов, их числа и времени действия, т.е. от *мощности*, реализуемой в межэлектродном промежутке. При малой мощности количество расплавленного металла невелико; с ростом подводимой мощности оно возрастает, но при этом увеличивается и количество продуктов обработки, которые тормозят процесс съема металла. Для получения высокой производительности *необходимо правильно выбрать сочетание площади обрабатываемой поверхности и мощности*. Такой вариант выполняют с помощью пространственных диаграмм в координатах *сила тока — площадь обработки — производительность*.

**По мере углублений отверстия** усложняется удаление продуктов обработки и поступление свежей жидкости в межэлектродный промежуток. Наличие большого количества электропроводных капель застывшего металла вызывает импульсы, энергия которых тратится на вторичное расплавление этих частиц. Для предотвращения таких "паразитных" импульсов используют принудительную прокачку жидкости через межэлектродный промежуток под давлением 100 ... 200 кПа. Это в свою очередь требует повышения жесткости технологической системы.

Глубина лунки, получаемой на заготовке после каждого импульса, при одинаковых условиях обработки зависит от свойств обрабатываемого материала (температуры плавления, температуропроводности и энтальпии в расплавленном состоянии). *Обрабатываемость* оценивают отношением массы снятого исследуемого металла к массе металла, снятого с заготовки из стали 45 при одинаковых условиях обработки. Сталь 45 выбрана как наиболее широко применяемый конструкционный материал.

Вольфрам при прямой полярности имеет коэффициент обрабатываемости 0,7; молибден — 1,5; магний — 2,5. Обрабатываемость железа близка к единице. Чугун имеет низкую обрабатываемость из-за включений свободного графита. Жаропрочные сплавы благодаря низким температуропроводности и теплоемкости в расплавленном состоянии обрабатываются лучше стали 45.

**При электроконтактной обработке в воздушной среде** скорость съема металла зависит от тех же факторов, что и при эрозии в жидкости. Однако условия теплообмена в рассматриваемом случае имеют существенные отличия. Электроды при работе постепенно нагреваются до высоких температур, что не наблюдается при работе в жидкостях. При этом способе используются большие токи, а поскольку зависимость скорости съема от среднего тока имеет характер, близкий к линейному, то производительность процесса можно оценивать через силу тока:

$$Q = k_2 I,$$

где  $k_2$  — коэффициент, учитывающий режим обработки и материал электродов.

При разрезании заготовок производительность

$$Q' = k_3 I,$$

где  $k_3 = k_2/b$  ( $b$  — толщина заготовки).

Скорость электроконтактного разрезания материалов в воздушной среде достигает 2 ... 3 мм/с, что в 5-10 раз выше, чем при механической обработке.

Производительность легирования оценивают отношением площади нанесенного слоя ко времени. Она зависит от режима обработки и материала электрода-инструмента. Если наносят твердые сплавы, то скорость покрытия составляет, в зависимости от режимов, 2 ... 8 мм<sup>2</sup>/с, в случае серебрения — до 15 ... 20 мм<sup>2</sup>/с. Толщина слоя обычно не превышает 0,08 ... 0,12 мм; при восстановлении деталей достигает 2 мм.

**Точность.** При ЭЭО на точность изготовления деталей влияют: 1) точность изготовления электрода-инструмента; 2) износ электрода-инструмента вследствие эрозии; 3) погрешности формы и размеров углубления на заготовке относительно электрода-инструмента.

Допуски на размеры электрода-инструмента составляют обычно 0,015 ... 0,1 мм, что соответствует требованиям к изготовлению металлорежущих инструментов.

При вырезании по контуру непрофилированным электродом-инструментом (прово-локкой) постоянный по времени износ не влияет на точность.

В случае легирования износ инструмента не сказывается на точности детали.

Для большинства режимов обработки износ составляет:

в случае прошивания сталей на электроискровом режиме медными и латунными электродами 30 ... 95 % от объема снятого с заготовки металла;

при обработке на электроимпульсном режиме медно-графитовыми электродами-инструментами 0,1 ... 4,0 %;

в случае электроконтактной обработки в жидкости 10 ... 40 %;

при электроконтактном разрезании на воздухе до 30 %.

Чтобы снизить влияние износа электродов-инструментов на точность изготовления, выполняют следующие действия: а) изготовляют инструмент из материала, стойкого к эрозии, например из вольфрама, меднографита, коксографитовых композиций; б) используют так называемые безыносные схемы, при которых часть материала с заготовки или из рабочей среды осаждают на электроде-инструменте, компенсируя тем самым его износ; в) заменяют изношенные участки электрода-инструмента путем продольного перемещения, как при прошивании сквозных отверстий и обработке непрофилированным электродом, или заменяют весь инструмент; г) проводят правку и калибровку рабочей части электрода-инструмента.

На современном уровне развития электроэрозионной обработки точность изготовления деталей на электроискровом режиме профильным электродом-инструментом достигает 6 ... 7-го качества, непрофилированным - 5 ... 6-го качества; в случае применения электроимпульсного режима изготовления соответствует 9 ... 11-му качеству; при электроконтактной обработке в жидкой среде (шлифование) - 7 ... 8-й качество, при обработке в воздухе (разрезание) - 16 ... 17-й качество. Погрешности электроэрозионного легирования оценивают неравномерностью наносимого слоя, которая может достигать 20 % его толщины.

Для проектирования технологических процессов необходимо иметь исходную документацию и сведения, требуемые для расчета режимов обработки и оценки технико-экономических показателей электроэрозионной обработки:

1) чертеж детали с техническими условиями;

2) чертеж заготовки после операции, предшествующей электроэрозионной обработке;

3) программу выпуска изделий, в которые входит изготавливаемая деталь, число дета-

лей, необходимых для сборки изделий и их ремонта в процессе эксплуатации;

4) технико-экономические показатели процесса, по которому выполнялась операция до замены ее электроэрозионной обработкой;

5) каталог электроэрозионного оборудования и перечень оборудования, имеющегося на предприятии;

6) каталог и альбомы чертежей имеющегося инструмента и приспособлений для электроэрозионной обработки.

Обработка в электроискровом режиме эффективна для изготовления прецизионных деталей небольших габаритов. Эффективность еще более повышается, если материал детали трудно поддается традиционным методам механической обработки или если обрабатываемая поверхность имеет сложную форму. Такие детали характерны для приборостроения, точного машиностроения, инструментального производства.

Обработка в электроимпульсном режиме характеризуется большей энергией разряда - высота неровностей здесь больше. Но вследствие повышения энергии разряда достигается высокая производительность процесса, которая в 15-20 раз превышает аналогичный показатель при электроискровом режиме и составляет для стали до 250 мм<sup>3</sup>/с, для твердых сплавов - 3 ... 5 мм<sup>3</sup>/с. Учитывая малый износ электрода-инструмента и удовлетворительную энергоемкость, не превышающую аналогичного показателя для фрезерования, обработку на электроимпульсном режиме можно рекомендовать для замены фрезерования крупных полостей сложной формы, углублений, каналов, где механической обработкой не удается достичь высокой производительности или где затруднен доступ инструмента в зону резания. Такие изделия применяются во многих отраслях индустрии, в частности в энергетическом и транспортном машиностроении, в двигателестроении, радиотехнической промышленности.

**Электроконтактное разрезание в жидкости** позволяет получить производительность процесса до 400 ... 450 мм<sup>3</sup>/с, что значительно выше, чем при механическом разрезании заготовок. Однако параметры шероховатости поверхности здесь высоки, а точность - невысока. Способ экономичен - расход электроэнергии в 6-10 раз ниже, чем при обработке на электроискровом режиме. Значителен износ электрода-инструмента и неудобна в эксплуатации традиционная рабочая жидкость, которая разбрызгивается. Это вызывает загрязнения станков, деталей, одежды работающих и требует особых конструкций накладных ванн.

Электроконтактное разрезание в жидкости используется в качестве заготовительной операции при получении заготовок из труднообрабатываемых токопроводящих материалов.

**Шлифование в жидкой среде** обеспечивает малые параметры шероховатости поверхности и высокую точность размеров, но производительность здесь ниже, чем при абразивном шлифовании. Процесс протекает при малых усилиях на заготовку, поэтому не происходит ее деформации, не образуются заусенцы. Это позволяет успешно использовать способ для заточки инструмента, обработки нежестких конструкций, а также заготовок, где недопустимы заусенцы, например, деталей летательных аппаратов, приборов, изделий электротехнической промышленности.

**Электроконтактный метод в воздушной среде** имеет производительность до 900-1000 мм<sup>3</sup>/с, что в несколько раз выше, чем при других известных методах разрезания и обдирки специальных сплавов. Процессу свойственна низкая энергоемкость, которая не превышает 1... 2 кВт·ч/кг (в 3-5 раз ниже, чем при обработке в жидкости). Однако показатели шероховатости и точности уступают другим способам электроэрозионной обработки. Метод используют для высокопроизводительной черновой обработки заготовок больших габаритов, преимущественно в металлургической промышленности.

**Электроэрозионное упрочнение, легирование и восстановление** уступает по производительности другим методам упрочнения, например, плазменному напылению, не вызывает нагрева детали, не повреждает исходный материал, дает достаточно равномерный слой удовлетворительного качества и более технологично. Находит использование в инструментальном производстве, в приборостроении, при ремонте машин.

**Электроэрозионная обработка включает следующие этапы проектирования:**

1. По форме обрабатываемой поверхности, ее размерам и требованиям шероховатости намечают один или несколько способов обработки, позволяющих обеспечить соответствие детали чертежу и техническим условиям; подбирают схему обработки; рассматривают возможность и целесообразность использования многоконтурной и многоэлектродной обработки.

2. Намечают маршрут технологического процесса электроэрозионной обработки, для чего определяют последовательность и число операций, выполняемых на станке, и контрольных операций.

3. Рассчитывают технологические показатели процесса для каждой операции: произ-

водительность, точность, качество поверхности и режимы обработки. *Расчет режимов выполняют в зависимости от технологических требований к детали:*

а) при необходимости исключить последующую операцию находят параметры режима, обеспечивающие заданную точность и качество поверхности;

б) если деталь должна работать в условиях динамических нагрузок, надо выбирать режимы, при которых отсутствуют микротрещины;

в) для достижения минимальной трудоемкости за основу выбора режима принимают максимальную производительность процесса;

г) для получения минимальной трудоемкости доводки выбирают режим, при котором затраты на электроэрозионную обработку и последующую доводку будут минимальными.

*Режимы рассчитывают в такой последовательности:*

а) выбирают технологический критерий, который должен быть достигнут в конце операции (точность, шероховатость, производительность и т.д.);

б) для выбранного критерия находят энергию импульса;

в) по характеру операции (черновая, чистовая) находят напряжение холостого хода и среднее напряжение. Выбирают требуемую диэлектрическую среду (вода, нефтепродукты и др.);

г) определяют длительность импульса;

д) находят средний ток и ток короткого замыкания;

е) для известной энергии импульса и его длительности находят технологические показатели процесса, не являющиеся критериальными.

Рассчитанные показатели точности, шероховатости и состояния поверхностного слоя сравнивают с требованиями чертежа и технических условий. Если хотя бы один из показателей оказывается ниже требований чертежа, необходимо наметить последующие операции, используя для этой цели другие методы обработки (электрохимический, механический и т.д.).

4. Из расчета производительности процесса находят скорость подачи электрода-инструмента.

5. Разрабатывают операционные карты технологического процесса в количестве, определяемом маршрутной картой.

6. Намечают схему базирования, установки и закрепления заготовки, обосновывают целесообразность проектирования специальных приспособлений для установки заготовки и инструмента.

7. Выбирают из числа имеющегося или (при его отсутствии) проектируют и изготавливают инструмент.

#### 2.4.2. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

В результате электроэрозионной обработки поверхность приобретает характерные неровности, а приповерхностные слои металла претерпевают физико-химические изменения. Это оказывает влияние на эксплуатационные показатели обрабатываемых деталей.

Обрабатываемая поверхность формируется из перекрывающихся друг друга произвольно расположенных лунок. Размеры лунок зависят от энергии импульса и материала электродов. Они возрастают с ростом энергии импульсов и уменьшением частоты их следования. Высота неровностей зависит от степени перекрытия лунок.

Поскольку размер лунки зависит от энергии импульса, то можно высоту неровностей  $Rz$  выразить через энергию импульса  $A_n$ :

$$Rz = k_n A_n^p,$$

где  $k_n$  - коэффициент, зависящий от режима обработки, материала электродов, их размеров, вида и состояния рабочей среды;  $p = 0,3 \dots 0,04$  - показатель степени, характеризующий форму лунки (в расчетах принимают  $p = 1/3$ ); при чистовых режимах для твердых сплавов  $k_n = 1 \dots 5$ , для сталей  $k_n = 2 \dots 12$ ; при черновых режимах  $k_n = 10 \dots 50$ .

Параметр шероховатости после обработки на электроискровом режиме твердых сплавов  $Ra = 0,2 \dots 0,3$  мкм; после обработки сталей  $Ra = 0,3 \dots 0,6$  мкм. После обработки на электроимпульсном режиме  $Rz = 20 \dots 40$  мкм; при шлифовании в жидкости  $Ra = 0,5 \dots 0,8$  мкм; при разрезании  $Rz = 80 \dots 200$  мкм; при электроконтактном обдирочном шлифовании и разрезании на воздухе  $Rz = 150 \dots 400$  мкм. Высота неровностей при упрочнении и легировании растет с увеличением толщины наносимого слоя:  $Rz = 10 \dots 200$  мкм.

**Поверхностный слой** формируется за счет части расплавленного металла, оставшегося на поверхности лунки, и прилегающего к ней слоя металла, подвергнутого структурным изменениям от быстрого нагрева и охлаждения материала. Поверхностный слой состоит из так называемого белого слоя 1 (рис. 2.4.4), в котором наблюдаются химико-термические превращения, переходного слоя 2, в котором имели место только термические изменения и под которым находится неизмененный металл 3 заготовки. Измененная зона, образуемая слоем 1, содержит продукты диэлектрической

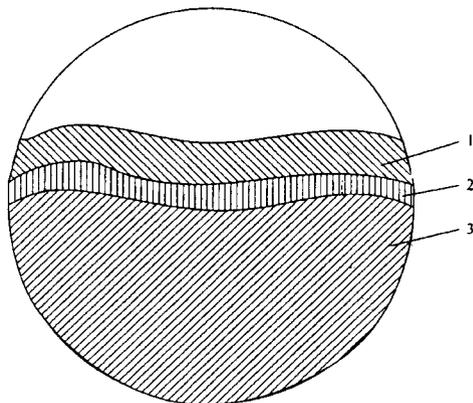


Рис. 2.4.4. Зоны термического влияния после ЭЭО

среды, в частности углерод и элементы, входящие в состав электрода-инструмента. У остальных заготовок в этой зоне образуются карбиды железа, которые способствуют упрочнению поверхности.

Если металл обрабатывают импульсами высокой энергии, то в начале разряда нагревается и плавится металл на поверхности; затем теплота проникает вглубь. Для нагрева внутренних слоев требуется какое-то время. Поскольку время разряда невелико, а мощность его значительна, то возникает большая разница температур по глубине. Наружные слои, как более нагретые, расширяются больше, внутренние - меньше. Однако металл в зоне лунки в начале разряда не обладает достаточной пластичностью, поэтому в нем возникают значительные внутренние напряжения, вызывающие разрыв. В конце импульса под действием резкого охлаждения нагретого металла жидкой рабочей средой вновь возникает большой перепад температур под лункой и появляются внутренние напряжения, которые тоже вызывают трещинообразование. Особенно склонны к растрескиванию хрупкие материалы, например твердые сплавы. Толщина измененного слоя после серии импульсов значительно превышает высоту неровностей. Она зависит от теплофизических свойств материала заготовки, температуры, при которой происходят фазовые превращения обрабатываемого металла, и других причин.

Глубина  $H$  измененного слоя зависит от тех же факторов, что и параметры шероховатости:

$$H = k_T A_n^p.$$

В зависимости от материала заготовки коэффициент  $k_T = (1,8 \dots 4)k_n$ .

При обработке в воздушной среде длительность импульсов обычно больше, чем при процессе в жидкости, поэтому глубина измененного слоя получается значительно больше. После электроконтактного разрезания в воздушной среде на заготовке наблюдается литая структура.

**Глубина  $H$  (мм)** измененного слоя для стальных заготовок в зависимости от вида обработки:

Черновая обработка (на электроимпульсном режиме) . . . . .	0,1 ... 0,4
Чистовая обработка (на электроискровом режиме) . . . . .	0,004 ... 0,1
Шлифование в жидкости . . . . .	0,005 ... 0,08
Разрезание в жидкости . . . . .	0,5 ... 0,1
Электроконтактная обработка на воздухе . . . . .	$\leq 5$

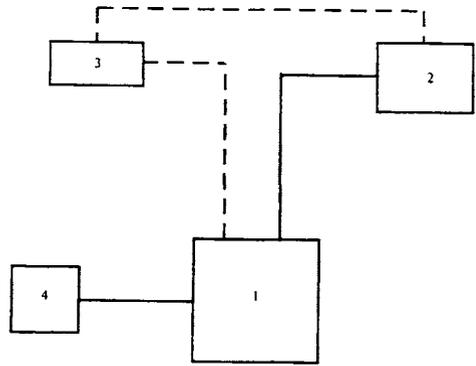
Если  $H \geq 0,1$  мм, у всех сплавов, как правило, наблюдаются микротрещины. Нагрев заготовки перед обработкой позволяет снизить толщину измененного слоя в несколько раз, однако при этом необходимо использовать негорючие рабочие среды, что усложняет конструкцию станков и их обслуживание.

**Состояние поверхностного слоя** определяет износостойкость, прочность и другие свойства детали в механизме. После электроэрозионной обработки поверхностный слой приобретает свойства, по-разному влияющие на эксплуатационные характеристики деталей. Положительными являются повышение твердости поверхности при сохранении вязкости сердцевины, большое количество лунок на поверхности, плавное их сопряжение. К недостаткам следует отнести возможность появления трещин, растягивающих напряжений, трудность получения поверхности с малой шероховатостью.

**2.4.3. ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ**

Станки для электроэрозионной обработки в отличие от механообрабатывающих имеют генератор импульсов, систему очистки и подачи рабочей среды в зону обработки, средства регулирования и управления процессом. На рис. 2.4.5 показана типовая структура электроэрозионного станка.

*Механическая часть 1* включает рабочий стол для установки и закрепления приспособлений или заготовки, ванну для рабочей жидкости, устройство для закрепления электроинструмента, механизмы его перемещения, следящие элементы систем регулирования и управления процессом.



**Рис. 2.4.5. Структурная схема электроэрозионного станка**

Генератор импульсов 2 может быть как встроенным, так и вложенным в виде автономного блока.

Электрошкаф 3 включает электрические узлы — пускатели, рубильники, предохранители и др. Рабочая жидкость хранится в ванне 4, которая комплектуется насосом и устройством для очистки среды от продуктов обработки. В большинстве электроэрозионных станков ванну помещают внутри механической части, сокращая потребную для размещения станка производственную площадь.

Электроэрозионное оборудование выпускается серийно или изготавливается по индивидуальным заказам. Оно может быть универсальным, специализированным и специальным. В нем используют унифицированные узлы — генераторы, приводы, регуляторы, — пригодные для комплектования различных видов станков.

**Генераторы импульсов.** При расчете и выборе генератора исходят из условия получения формы и мощности импульса, необходимых для обеспечения требуемых технологических показателей процесса. Черновую и чистовую обработку обычно ведут от одного и того же генератора. В электроэрозионных станках используют релаксационные, машинные, магнитонасыщенные, ламповые и полупроводниковые генераторы.

В машинных генераторах энергия импульсов достигает больших значений, что позволяет проводить обработку крупных заготовок с высокой производительностью. Однако данный тип генераторов практически не применяется на производстве из-за повышенного уровня шума при работе.

В релаксационных (RC, RLC, RCL, CL, LC — схемы) генераторах значительная часть энергии теряется на нагрев резистора и другие потери. Поэтому КПД таких генераторов

не превышает 25 %. Мощность RC-генераторов обычно ограничивают 5 ... 7 кВт, т.е. используют их в основном для чистой обработки. Включением в зарядную цепь индуктивного элемента L (RLC-генератор) удается ускорить процесс зарядки конденсатора и увеличить напряжение на нем.

За счет сокращения времени прохождения тока через резистор снижаются потери на его нагрев, поэтому КПД RLC-генераторов значительно выше.

RLC-генераторы используют для чистовых операций, где необходимо сохранить без изменений форму электрода-инструмента.

С целью повышения КПД создают генераторы, в которых вообще исключен токоограничивающий резистор. Так, в LC-схеме в зарядную цепь введен электромагнитный вибратор. Это усложняет настройку, поэтому LC-схема используется для какого-либо одного режима. Благодаря большой мощности эти генераторы применяют в основном на черновых операциях.

В релаксационных генераторах не удается добиться высокой производительности процесса, так как с ростом энергии импульса возрастает время накопления заряда и падает частота импульсов. Большие возможности повышения производительности имеют ламповые и магнитонасыщенные генераторы.

К недостаткам ламповых генераторов относятся низкий КПД, необходимость применения источников питания с напряжением до нескольких тысяч вольт, необходимость принудительной прокачки жидкости через промежутки, ограничения энергии импульса.

Более высокая энергия импульса может быть получена в *магнитонасыщенных генераторах*.

**Использование управляемых полупроводниковых приборов** позволяет создать генераторы с широким диапазоном режимов обработки, у которых частота следования импульсов не зависит от свойств межэлектродного промежутка. Известно два вида генераторов этого типа: на основе *инверторов*, в которых управляемые тиристоры регулируют период зарядки и разряда конденсатора в релаксационных генераторах, и *широкодиапазонные генераторы импульсов*.

Широкодиапазонные генераторы вырабатывают импульсы с частотой 1 ... 880 кГц и выходным током 16 ... 180 А, т.е. дают возможность работать на любых режимах электроэрозионной обработки. Кроме того, они вырабатывают импульсы такой формы, при которой износ электрода-инструмента становится минимальным.

Характеристики некоторых видов генераторов приведены в табл. 2.4.1.

**2.4.1. Генераторы импульсов**

Модель	Назначение	Частота, Гц	Длительность импульсов, мкс	Ток, А	Износ, %, инструмента		Масса, кг
					из графита	из меди	
Тиристорный генератор ТГ-100-3/3	Для многоконтурной обработки	0,1; 0,4; 1,0; 3,0	—	100	—	1,2	1200
Тиристорный генератор ТГ-250-0,15	Для копировально-прошивочных станков	0,15	2000-4400	300	—	—	600
Генератор коротких импульсов ГКИ-250	Для среды на базе воды с добавками	8-22	—	10	—	—	100
Широкодиапазонный генератор ШГИ-63-44/3-2	Для создания импульсов гребенчатой и прямоугольной формы	1; 3; 8; 22; 44	—	63	0,5	1,0	600
Широкодиапазонный транзисторный генератор ШГИ-16-880Б	Создание импульсов с регулируемой групповой скважностью	3; 8; 22; 44; 88; 200; 440; 880	0,4-220	16	0,2	10	150

**Системы управления процессом.** Имеются системы ЧПУ и адаптивные системы, которые работают на базе процессоров. Они позволяют оптимизировать работу всех систем станка: назначать наиболее выгодную подачу, скорость подвода и торможения электрода инструмента, параметры импульсов, регулировать вибрацию, расход рабочей среды через промежутки. Такие системы целесообразно создавать на базе малых управляющих ЭВМ. Они позволяют на 20 ... 30 % повысить производительность, в 2 раза увеличить глубину прошивания, на 20 % снизить износ электро-

да-инструмента, улучшить качество обработанной поверхности. Однако адаптивные системы дороги, сложны в изготовлении и настройке, еще недостаточно надежны. Адаптивные системы наиболее применимы в мелкосерийном производстве, где требуется частая перенастройка режимов и невозможна их оптимизация по результатам изготовления партий деталей.

Характеристики оборудования для электроискровой обработки приведены в табл. 2.4.2.

**2.4.2. Характеристики оборудования**

Модель	Назначение	Размеры стола, мм	Производительность, мм <sup>3</sup> /мин	Параметр шероховатости детали по стали Ra, мкм	Мощность, кВт	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7
Копировально-прошивочный 4Г721М	Для обработки полостей, отверстий	360×200	250	1,25	4,5	490
Универсальный копировально-прошивочный 4Е723	Для изготовления штампов, пресс-форм, кокилей, фильер, лопаток ГТД и др.	630×400	3000 (черновая) 60 (чистовая)	5	20	2450
Копировально-прошивочный повышенной точности 4Д722АФ3	Для изготовления многоступенчатых сопрягаемых пресс-форм, кокилей, штампов	400×630	500	1,25-0,63	10	2220
Специальный координатный ОФ-80	Для обработки узких щелей, малых отверстий, изготовления фильер, волок, пресс-форм, матриц	200×125	70	0,63	3,2	333
Прошивочный 4610	Для извлечения сломанного инструмента	160×220	Минутная подача 2 мм	—	1,1	120
Специальный МЭ302М	Для обработки валков мукомольных машин	Размеры валков: диаметр до 300 мм; длина до 1000 мм	Время обработки двух валков 1-1,5 ч	Rz20	11,1	2000
Вырезной с ЧПУ 4531Ф3	Изготовление проволочным электродом инструмента с точностью 0,01 мм	Размер заготовки до 120×75×40	18 мм <sup>2</sup> /мин	1,25	2,75	700

Продолжение табл. 2.4.2

1	2	3	4	5	6	7
Электроконтактный карусельный МЭ-301	Для разделения заготовок, обработки тел вращения	Диаметр планшайбы 2800	Черновой режим 0,1 кг/мин Чистовой 0,01 кг/мин	Rz1000  Rz40	96	63000
Станок со следящей системой ЕЛФА-731	Для упрочнения легирования, восстановления деталей машин	500×300	1 мм <sup>2</sup> /с	—	5	500

Небольшие станки и установки, работающие с негорючими средами, можно встраивать в технологические линии. Однако целесообразнее выделять электроэрозионные станки в участки, размещенные в отдельных помещениях. Прецизионные станки следует отделять от тех, которые предназначены для черновой обработки. Создание участков открывает возможность многостаночного (до трех-пяти станков на одного оператора) обслуживания. В случае концентрации оборудования облегчается его обслуживание, сокращается номенклатура приспособлений, улучшаются условия хранения и учета электродов-инструментов. На участке должно быть помещение для изготовления электродов-инструментов. Там следует иметь необходимые металлорежущие станки и измерительные приборы. Участки должны иметь линии холодной и горячей воды, сжатого воздуха для очистки обработанных деталей. Для установки и снятия крупных заготовок необходимы подъемно-транспортные механизмы. Желательно иметь место для централизованного приготовления рабочих сред. Для станков с ЧПУ должен быть центр подготовки программ.

Имеются системы, работающие в комплексе с электронными управляющими машинами. Такие системы могут работать автономно, без присутствия оператора. Данные о выполняемых операциях вводят в память электронной машины, где могут храниться сведения для нескольких деталей. В память машины необходимо ввести информацию о точках, в которых изменяется направление перемещения электрода-инструмента относительно заготовки, траектории отдельных участков, сведения, необходимые для коррекции движения проволоки. ЭВМ обрабатывает информацию о ходе процесса и в соответствии с программой задает требуемые режимы обработки. Возможно изменение масштаба про-

филя, изготовление деталей, зеркально отображающих одна другую. Использование систем с ЭВМ открывает широкие возможности автоматизации изготовления деталей сложного контура из любых металлов и позволяет одному оператору обслуживать участок из 10 ... 12 станков.

**Инструмент** имеет форму, обратную обрабатываемому контуру на детали, его размеры берутся с учетом межэлектродных зазоров. Исключением являются непрофилированные электроды, для проектирования которых требуется определить только диаметр и материал проволоки или стержня. В этом случае рассчитывают проволоку на растяжение, а стержень — на устойчивость при условиях обработки. Все виды электродов-инструментов изнашиваются, и это следует учитывать при определении их начальных размеров.

При проектировании необходимо учесть возможность создания электродов-инструментов для черновой и чистовой обработки, их количество, оценить целесообразность использования на черновых операциях инструмента, ранее применяемого для чистовой обработки. Если предусматривается доводка, электроды-инструменты корректируют на размер припуска последующей операции.

При проектировании следует учитывать требования к материалам, из которых изготовлен электрод-инструмент, их стоимость и дефицитность. Если площадь обрабатываемой поверхности  $S > 5 \cdot 10^5$  мм<sup>2</sup>, то для снижения массы электрод-инструмент выполняют пустотелым (для так называемой схемы *обработки-тренажии*).

В случае принудительной прокачки рабочей жидкости в электроде должны быть предусмотрены каналы, выходящие в зону обработки.

Если электрод-инструмент имеет небольшие габариты, то его изготавливают цельным из материала, применяемого для рабочей части.

**Материалы.** Для чистовой обработки, осуществляемой обычно на электроискровом режиме, наиболее часто используют инструменты из обычной и пористой меди, латуни. Медь должна быть без примесей, так как даже минимальные включения других элементов резко снижают электроэрозионные свойства, повышают износ. Для черновых операций, выполняемых на электроимпульсном режиме, в качестве материала электродов-инструментов применяют графитовые и медно-графитовые композиции, алюминий, цинковые сплавы. Графитовые сплавы стремятся выбирать мелкозернистой структуры — они обладают повышенной механической прочностью. Из таких материалов можно создать инструменты с острыми углами и тонкими перемычками, эффективные на чистовых операциях. К недостаткам следует отнести повышенную стоимость по сравнению с материалами с более крупными зернами и более низкую производительность процесса. Для чистовых операций чаще применяют дешевые и стойкие графитовые материалы с укрупненным зерном.

Для изготовления мелких отверстий используют инструменты из вольфрама, молибдена, латуни. Вольфрам и молибден обладают высокой эрозионной стойкостью в широком диапазоне режимов. Но это дорогие, дефицитные, трудно поддающиеся обработке материалы.

Для электроконтактной обработки применяют инструменты из меди, латуни, чугуна, дешевых марок стали. Возможно применение и обычных эрозионно-стойких материалов. Серый чугун имеет удовлетворительную эрозионную стойкость при обработке на всех режимах. Он хорошо обрабатывается, недорог, из него выполняют электроды-инструменты для чистовых операций.

Непрофилированные электроды-инструменты обычно изготавливают из вольфрамовой или латунной проволоки. Вольфрамовая проволока имеет большую удельную прочность, но низкую удельную проводимость и применяется для электродов диаметром до 0,08 мм.

**Конструкция.** В зависимости от назначения и материала электроды-инструменты могут быть цельными или сборными.

При прошивании применяют электроды-инструменты в виде стержней и трубок из проката различных сечений. В них рабочая и технологическая части объединены. Отверстия в трубках могут быть круглыми, прямоугольными, винтовыми и др. Медные стержни и трубки выпускают серийно: их минимальный наружный размер 0,2 мм; допустимая погрешность  $\pm 0,01$  мм. Аналогичные электроды-

инструменты могут быть выполнены из латуни, алюминия и его сплавов.

Для прошивания отверстий используют проволоку диаметром  $d_{пр} = 0,025 \dots 1,5$  мм, с погрешностью не более  $\pm 1,5$  % от номинального размера.

Для прошивания полостей применяют сплошные или сборные электроды-инструменты из графитовых материалов. Иногда корпус электрода-инструмента выполняют из дешевого конструкционного материала, а на рабочую часть гальваническим методом или напылением наращивают эрозионно-стойкий слой.

Сборные электроды-инструменты могут быть выполнены, например, из набора стержней или трубок.

При электроэрозионном шлифовании в качестве инструмента используют металлический или графитовый диск; для отрезания применяют диски из листового материала с толщиной от 0,3 ... 0,5 мм до нескольких миллиметров или стальную ленту, перемещающуюся по шкивам. Толщина ленты не превышает 1 ... 1,5 мм.

**Инструменты** из меди, алюминия и их сплавов обычно изготавливают штамповкой, вытяжкой, прокаткой. Точность изготовления соответствует 8 ... 10-му качеству, параметр шероховатости поверхности  $Ra = 2,5 \dots 5$  мкм. Для придания электродам-инструментам прямолинейности их правят в специальных приспособлениях.

Заготовки для электродов-инструментов, имеющих сложную объемную форму, выполняют литьем. Это экономически целесообразно, если требуется значительное количество одинаковых инструментов. Например, при литье в оболочковые формы их должно быть не меньше 50. Вследствие усадки литые заготовки имеют невысокую точность и требуют дополнительной механической обработки лезвийным и абразивным инструментом (точение, фрезерование, сверление, шлифование и др.). Для точного базирования электрода-инструмента в станке его обрабатывают совместно с электродержателем, используя в качестве установочных баз присоединительные к станку элементы электрододержателя.

При механической обработке меди, алюминия и их сплавов передние углы инструмента должны быть невелики. Скорость резания для твердосплавных резцов и фрез достигает 5 м/с, подача на оборот — до 0,3 мм. В случае обработки графитовых материалов желательно использовать твердосплавный инструмент с передним углом  $10 \dots 12^\circ$  при скорости резания до 6 м/с, подаче при фрезеровании до 10 мм/с, глубине резания на чистовых операциях порядка 0,5 ... 2 мм. Инст-

рументы из графитовых материалов шлифуют. При этом необходимо оснащать станки местной вытяжной вентиляцией или пылеуловителями.

Цельные электроды из графитовых материалов можно изготовить методом вихревого копирования.

Графитовые, медно-графитовые, вольфрамокобальтовые электроды-инструменты можно получать по технологии порошковой металлургии. Так изготавливают пустотелые и сплошные конструкции. Форма рабочей поверхности таких инструментов повторяет конфигурацию пресс-форм. Этот процесс рентабелен только при выпуске значительных партий одинаковых электродов-инструментов. К недостаткам процесса следует отнести неравномерность свойств материала после прессования, особенно при сложной конфигурации электрода-инструмента.

Нанесение на рабочую поверхность эрозионно-стойкого материала возможно электродуговой, плазменным, газоплазменным напылением. В этом случае вместо корпуса часто применяют модели многократного использования из керамики, графита, сталей, алюминия, чугуна. Модели могут быть сборными, что упрощает их изготовление. Напыление проводят в две стадии: сначала наносят основу из коррозионно-стойкой стали, затем слой эрозионно-стойкого материала толщиной 1,5 ... 2 мм. Полученную оболочку снимают, крепят к электрододержателю и устанавливают на станок. При гальваническом методе формообразования рабочей части можно применять модели из металлов, пластмасс, гипса, легко поддающихся обработке. На нетокопроводящие модели сначала осаждают химическим путем токопроводящий слой, далее его наращивают до требуемой толщины эрозионно-стойким материалом. Предельная толщина слоя 2 ... 5 мм. Модели могут быть одно- и многоразового использования. После гальванического осаждения металла рабочая поверхность имеет высокую точность размеров, малые параметры шероховатости и не нуждается в дальнейшей обработке. Площадь рабочей части может достигать сотен квадратных сантиметров. Недостатками методов являются зависимости толщины слоя от формы модели и большая длительность процесса (до 100 ч на 1 мм толщины).

Для изготовления рабочего профиля используют также электрохимический, электроэрозионный, ультразвуковой методы. Так, электроды-инструменты, предназначенные для изготовления сеток с мелкими прямоугольными отверстиями, целесообразно выполнять непрофилированным проволочным электродом. С этой целью торцовую поверх-

ность заготовки разрезают вдоль оси взаимно перпендикулярными пазами.

Электроды-инструменты для шлифования получают механической обработкой и прессованием, электроды-инструменты для отрезания — штамповкой из листа с последующей термомофиксацией (круглые) или сваркой концов ленты (ленточные).

Кроме того, при изготовлении электродов-инструментов используют пайку, склеивание и другие технологические процессы, применяемые в машиностроении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотых Б.Н., Любченко Б.М. Инженерные методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение. 1981. 51 с.
2. Коваленко В.С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. Киев: Виш. шк. 1983. 176 с.
3. Лазаренко Б.Р. Электрические способы обработки металлов и их применение в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 40 с.
4. Смоленцев В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом. М.: Машиностроение, 1967. 158 с.
5. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение, 1988. 719 с.
6. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 80 с.
7. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В.П. Смоленцева. Т.1. М.: Высш. шк. 1983. 247 с.
8. Электроэрозионная и электрохимическая обработка / Под ред. А.Л. Лившица, А. Роша, ч.1. М.: НИИМАШ, 1980. 224 с.

## Глава 2.5

### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

#### 2.5.1. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Электрохимическая обработка (ЭХО) осуществляется в среде электролита за счет анодного растворения металла.

**Классификация технологических методов и схем:**

1. Обработка с неподвижными электродами.

По этой схеме выполняют:

1.1. Безразмерную обработку (электрохимическое полирование).

1.2. Размерное формообразование при высоких плотностях тока, достигаемых размещением инструмента (катода) и заготовки (анода) на расстоянии десятых и сотых долей миллиметра путем локализации процесса (трафаретами, диэлектрическими покрытиями). Этим методом удается получить мелкие (в пределах миллиметра) углубления, выполнять безразмерную чистовую обработку поверхностей, изготовлять отверстия, удалять заусенцы, наносить информацию. По мере обработки межэлектродный зазор возрастает и процесс затухает.

2. *Обработка с подвижными электродами*, при которой межэлектродный зазор поддерживается постоянным путем сближения электродов на глубину, равную толщине удаленного металла. При такой схеме требуются достаточно сложные системы регулирования зазора, однако обеспечивается возможность поддержания стационарного режима обработки и стабильного анодного растворения металла на любой глубине. Это снимает ограничения по величине удаляемого с заготовки припуска.

Рассматриваемая схема реализуется в следующих методах обработки:

2.1. Прошивание углублений. Если отверстия имеют малое сечение, то в качестве инструмента может использоваться струя электролита, подаваемая через сопло от катода-инструмента к детали. Процесс протекает при высоких (до нескольких сот вольт) напряжениях в химически активных электролитах (щелочах, кислотах). Этот метод позволяет получить, в основном, круглые отверстия диаметром до 2 мм и примерно такой же глубины.

Для отверстий с диаметром более 0,5 мм применяют метод прошивки трубчатым электродом-инструментом, через который прокачивают электролит на базе нейтральных солей

(хлорида натрия, нитрата натрия и др.). На электроды подают безопасное для работающего напряжение. Межэлектродный зазор поддерживают обычно постоянством плотности тока или стационарной подачей инструмента. Частным случаем метода является формообразование криволинейных отверстий с постоянным радиусом кривизны.

При большом отношении (больше 1) площади обрабатываемой поверхности к глубине обработки метод имеет название: электрохимическое копирование. К его особенностям относится: необходимость в сложных системах электрода-инструмента, в проектировании системы щелей и отверстий для подвода электролита. Этим методом изготавливают рабочие поверхности лопаток энергетических машин, межлопаточные каналы цельных роторов, гравюры ковочных штампов. Технологические процессы электрохимической обработки лопаток и ковочных штампов находят наибольшее использование в машиностроении и успешно заменяют традиционные методы механической обработки на этих операциях.

2.2. Точение наружных и внутренних поверхностей (рис. 2.5.1).

При такой схеме электрод-инструмент 1 выполняет роль резца, но в отличие от обработки на токарных станках он не имеет механического контакта с заготовкой 2, а находится от нее на расстоянии  $s$  (межэлектродный зазор). Электрод-инструмент может работать по схеме врезания с подачей поперек заготовки со скоростью  $v_n$  продольного точения, с подачей вдоль заготовки со скоростью  $v'_n$  или с одновременным перемещением в обоих направлениях. Межэлектродный зазор может поддерживаться с помощью системы регулирования (рис. 2.5.1, а) или путем установки диэлектрических прокладок 3 (рис. 2.5.1, б) с толщиной, равной величине межэлектродного зазора.

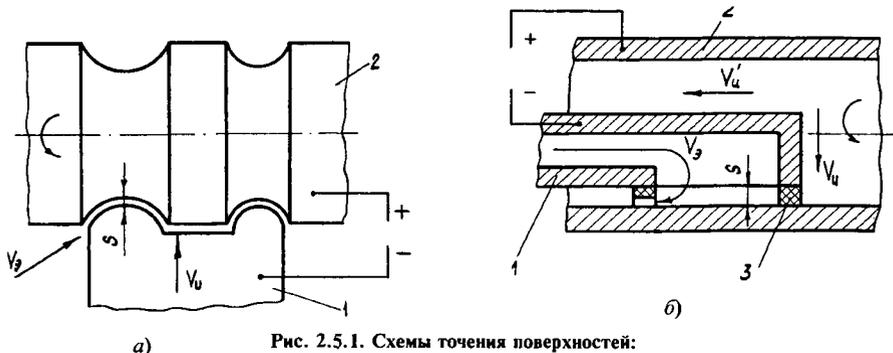


Рис. 2.5.1. Схемы точения поверхностей:

а - наружных; б - внутренних

2.3. Протягивание наружных и внутренних поверхностей (рис. 2.5.2) выполняется с перемещением со скоростью  $v_n$  электрода-инструмента 1 вдоль заготовки, как правило, с предварительно обработанной поверхностью. Заготовка может иметь прямую или изогнутую ось и различную форму сечения. Если заготовка круглая, то возможно ее вращение в процессе обработки. Протягиванием выполняют чистовую обработку отверстий, нарезание канавок, резьб, шлицев.

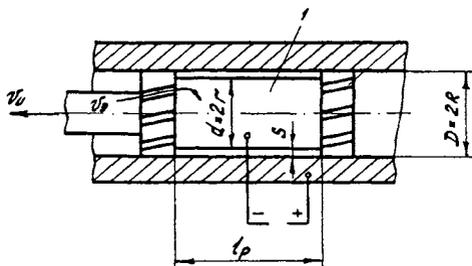


Рис. 2.5.2. Схема протягивания:  
 $l_p$  — длина рабочей части электрода

2.4. Разрезание заготовок может выполняться прошиванием пластиной, вращающимся диском (рис. 2.5.3, а) или проволокой (рис. 2.5.3, б). Электрод-инструмент 1 подают к заготовке 2 со скоростью  $v_n$ , поддерживая постоянный межэлектродный зазор  $s$ . Заготовка может оставаться неподвижной или вращаться (при обработке диском). Электролит может поступать через сопло (рис. 2.5.3, б) поливом или через электрод-инструмент. Скорость его движения  $v_3$ . Диск можно разрезать заготовки с плоским торцом, проволокой — получать фасонные профили. Оба инструмента позволяют получать пазы, щели, подрезать пружины и другие нежесткие детали.

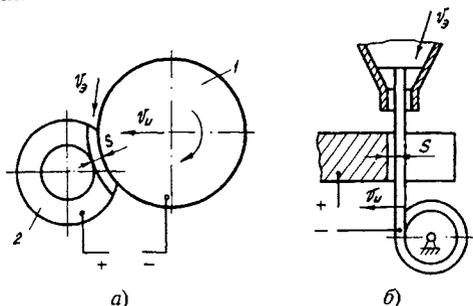


Рис. 2.5.3. Схемы резания заготовок:  
а — диском;  
б — непрофилированным электродом-проволокой

2.5. Шлифование (рис. 2.5.4). В качестве инструмента используют металлический диск 1, который перемещается вдоль заготовки 2 со скоростью  $v_n$ , поддерживаемой регулятором. Электрохимическое шлифование происходит без контакта инструмента с заготовкой и применяется для чистовой обработки нежестких, хрупких, вязких материалов, пакетов пластин роторов и статоров электродвигателей, жаропрочных сплавов.

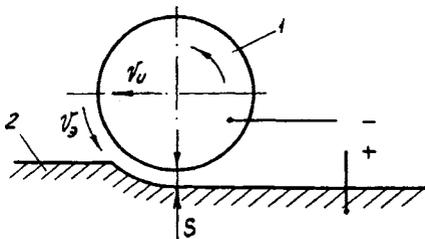


Рис. 2.5.4. Схема шлифования

2.6. Гравирование выполняется торцом трубки или стержня, перемещаемых вдоль заготовки без касания электродов. Электролит подают вдоль стержня или через трубку. Используя имеющиеся копировальные устройства, можно получать тексты, рисунки на хрупких, труднообрабатываемых сплавах.

**Технологические параметры процесса.**  
**Напряжение источника.** Постоянное напряжение выбирают в зависимости от обрабатываемых материалов, технологических операций и потерь в подводящих сетях. Нижний предел напряжения составляет 4 ... 5 В, верхний — около 30 В. При большом значении наступают пробой и нарушения стабильности процесса. Для большинства технологических операций применяют напряжение 10 ... 12 В, кроме обработки титановых сплавов, где напряжение достигает 30 В и шлифования (6 ... 8 В). Исключение составляет струйный метод, где напряжение выбирается в пределах 100 ... 800 В.

При импульсном напряжении его величина возрастает до тысяч вольт, но пробоя не происходит из-за кратковременности импульса.

Часть напряжения, поступающего на электроды, теряется за счет потерь на нагрев, образования газов, побочных реакций. Приближенно можно принять для электролитов на базе хлорида натрия потери 1,7 ... 2,4 В, на базе нитрата натрия 3,2 ... 4,5 В.

**Состав и скорость подачи электролита.** Электролит определяет скорость растворения металла. Он должен обеспечивать высокую скорость съема припуска, требуемое качество поверхности и точность обработки.

Состав электролита выбирают в зависимости от обрабатываемого материала или осо-

бых требований, предъявляемых к детали (например, получение шероховатости заданного профиля, маркирования).

В качестве электролитов чаще используют водные растворы неорганических солей с добавками, которые снижают коррозию, поддерживают постоянство химического со-

става, снижают гидравлические потери, ускоряют очистку электролита.

В табл. 2.5.1 приведены составы электролитов для различных обрабатываемых сплавов, а в табл. 2.5.2. — добавки к электролитам.

### 2.5.1. Составы электролитов

Обрабатываемый материал	Состав электролитов		Концентрация насыщения, г/л	Средняя удельная проводимость, См·мм <sup>-1</sup>	Выход по току, %
	Основные компоненты	Содержание, г/л			
Конструкционные стали	Хлорид натрия	100—200	359	0,015—0,02	0,82—0,83
Инструментальные стали	Хлорид натрия	100—300	359	0,015—0,02	0,77—0,80
	Нитрат натрия	20—100	876		0,30—0,40
	Хлорид натрия	150—250	359	0,012—0,011	0,77—0,80
Жаропрочные сплавы	Хлорид натрия	50—200	359	0,010—0,020	0,83—0,85
	Нитрат натрия	100—300	876	0,008—0,015	0,86—0,96
Чугуны	Нитрат натрия	100—200	876	0,008—0,012	0,30—0,35
Титановые сплавы	Хлорид натрия	80—100	359	0,012—0,015	0,30—0,35
	Хлорид натрия и бромистый калий	80—100 10—12	652	0,012—0,015	0,30—0,35
Алюминиевые сплавы	Нитрат натрия	150—200	876	0,01—0,012	1—1,1
	Нитрат натрия и лимонная кислота	150—200 10—13	Нет св.	0,012—0,015	1,1—1,25
Медные сплавы	Соли азотной кислоты	Нет св.	Нет св.	0,02—0,021	0,5—0,6
Материалы из металлических порошков на основе железа	Хлорид натрия	100—120	359	0,006—0,01	0,92—0,96
	Углекислый натрий	50—60	218		

### 2.5.2. Добавки к электролитам

Обрабатываемый материал	Наименование добавок	Содержание, г/л	Рекомендации по применению
Стали конструкционные, инструментальные	Нитрит натрия	0,2—0,5	Ингибитор коррозии
Алюминиевые сплавы, стали, чугуны	Борная кислота, соляная кислота, лимонная кислота	10—15 16—18 10—13	Снижение защелачивания электролита, поддержание свойств
Титановые сплавы	Бромид калия, йодистый калий	10—30 10—20	Снижение пассивирующего действия окисной пленки
Все сплавы	Моющие жидкости ОП-7, ОП-10 и др.	1—3	Снижение гидравлических потерь и устранение кавитации, улучшение смачиваемости поверхности детали; ускорение осаждения продуктов обработки
	Полиакриламид	1—5	

Особые требования предъявляются к рабочим средам для нанесения информации на сплавы: обеспечение контрастности штрихов, четких границ, формирование устойчивого

цветного изображения. В табл. 2.5.3 приведены составы рабочих сред, применяемые для нанесения информации.

### 2.5.3. Составы электролитов для маркирования

Компоненты	Содержание компонентов в водном растворе, %	Особенности приготовления или использования
<b>Сталь углеродистая, легированная</b>		
Нитрит или нитрат натрия	15	Для деталей из чугуна
Хлористый натрий	5–15	
Нитрит или нитрат натрия	10–20	
Кальцинированная сода	2–4	
Хлористый цинк	33	Для высокоточных деталей с полированной поверхностью
Фосфорная кислота	20	
<b>Коррозионно-стойкие и жаропрочные материалы</b>		
Нитрит или нитрат натрия	10–18	Для инструментальных сталей
Нитрит натрия	8–10	
Нитрат натрия	0,5–1,0	
Хлористый натрий	1,5–2,5	
<b>Титан и его сплавы</b>		
Спирт	90–92	Для инструментальных сталей
Дистиллированная вода	100	Для плоских поверхностей (отклонение от плоскостности не более 0,02 мм)
<b>Медь, бронза</b>		
Кальцинированная сода	7–9	—
Сернистый калий	1,5–2,5	
Нитрит натрия	20–25	
Натронная известь	3–10	
<b>Латунь</b>		
Сернистый калий	3–4	—
Жидкое стекло	2,5–3,5	
<b>Алюминий и его сплавы</b>		
Хлористый натрий	12–15	—
Бромистый калий	6–7	
Бромистый калий	5–10	
Азотнокислый алюминий	5–10	
<b>Металлокерамические твердые сплавы</b>		
Кальцинированная сода	3–5	Для сплавов типа Т15К6
Нитрит натрия	25	Для сплавов группы ВК;
Натронная известь	3–10	для цветных сплавов

**Скорость движения электролита** в межэлектродном пространстве должна обеспечить вынос всех продуктов обработки, что позволяет стабилизировать условия протекания процесса. Однако повышение скорости сверх расчетной или рекомендуемой величины нежелательно, так как возрастают мощности на прокачку жидкости, начинаются кавитацион-

ные явления, нарушающие качество обработанной поверхности. Приближенные величины скорости прокачки электролита и требуемые напоры приведены в табл. 2.5.4. Для стабилизации потока на выходе из зоны обработки в ряде технологических схем применяют дросселирование потока, создающее противодавление.

**2.5.4. Параметры потока электролита**

Схема и метод обработки	Рекомендуемый диапазон скорости электролита, м/мин	Напор на выходе, м	Потери напора на выходе за счет противодавления, м
<b>Обработка неподвижными электродами</b>			
Безразмерная обработка	Перемешивание	—	—
Размерное формообразование		5–40	0–20
<b>Обработка подвижными электродами</b>			
Прошивание углублений:			
мелких полостей, отверстий	6–10	100–150	10–15
крупных полостей	10–16	30–80	5–8
глубоких отверстий	10–26	80–250	0–20
профиля пера лопаток	10–20	30–50	0–5
<b>Точение</b>			
Предварительно вскрытых отверстий	10–12	40–80	0–5
Наружных поверхностей	12–15	30–50	0–5
<b>Протягивание</b>			
	10–15	40–80	2–5
<b>Разрезание</b>			
Дисковым электродом	10–12	Полив,	Нет
Проволочным электроном	60–100	150–250	
<b>Шлифование</b>			
	10–12	Полив	Нет
<b>Гравирование</b>			
	4–6	5–15	Нет

**Межэлектродный зазор** является определяющим параметром процесса: чем меньше его величина, тем выше скорость съема металла, меньше погрешности копирования, лучше показатели качества поверхности. Однако с уменьшением зазора усложняется процесс его регулирования, возрастают энергозатраты на прокачку электролита, усложняется проектирование инструментов.

Для обработки неподвижными электродами используют начальные зазоры:

- при нанесении информации - 0,005 ... 0,015 мм;
- при полировании - 0,05 ... 0,3 мм;
- при удалении заусенцев - не менее высоты заусенца;
- при округлении кромок - 0,1 ... 0,3 мм.

В случае использования подвижных профилей электродов:

- при прошивании отверстий - 0,02 ... 0,2 мм;
- при изготовлении полостей - 0,1 ... 0,5 мм;
- при обработке профиля лопаток - 0,08 ... 0,5 мм.

Для точения - 0,1 ... 0,3 мм.

В случае использования схемы протягивания - 0,1 ... 0,4 мм.

При разрезании, шлифовании и гравировании - 0,05 ... 0,3 мм.

**Проектирование технологических процессов.** Технико-экономический анализ применения электрохимической обработки взамен существующего метода. Алгоритм укрупненной

оценки области эффективного использования электрохимического метода можно сформулировать на основании анализа чертежа детали. Последовательность анализа можно представить в следующем виде:

1. *Является ли выполняемая операция уникальной, осуществляемой только электрохимическим методом?* При положительном ответе не требуется проводить какое-либо обоснование, так как иначе невозможно получить деталь требуемой формы. К таким операциям можно отнести прошивку межлопаточных каналов в цельных роторах энергетических машин, отверстий с криволинейной осью, глухих углублений с переменным периметром сечения и др.

2. *Поддается ли обрабатываемый материал резанию лезвийным инструментом?* Если ответ отрицательный, то электрохимический метод имеет неоспоримые преимущества и поиск может быть продолжен только среди других нетрадиционных методов.

3. *Обладает ли обрабатываемый материал особыми свойствами: повышенной вязкостью, хрупкостью и др.?* К этой группе относят жаропрочные, титановые, магнитные сплавы. Однако следует учитывать ограничения: невыгодно применять электрохимический метод для деталей простой формы с небольшой программой выпуска. Например, при полировании внутренней поверхности втулок операция электрохимической обработки рентабель-

на, если обеспечивается полная загрузка хотя бы одного станка в течение смены без перенастройки, которая значительно сложнее, чем для металлорежущего оборудования.

4. *Имеются ли технологические затруднения при обработке деталей из конструкционных сталей?* К ним можно отнести формообразование каналов в длинномерных деталях при условии многосменной загрузки оборудования без перенастройки.

5. *Затруднен ли доступ инструмента в зону обработки детали, если она выполнена из легких сплавов (алюминия, магния и др.) или цветных материалов (латуни, меди и др.)?* Электрохимический метод рентабелен, если количество выпускаемых деталей обеспечивает загрузку оборудования без перенастройки в течение нескольких смен. Здесь обычно целесообразно создавать новое оборудование, выгоднее применять уже имеющееся.

6. *Опасны ли для жизни и здоровья персонала частицы снимаемого с заготовки металла?* Известно, например, что при обработке бериллия возникает опасность отравления и заболевания оператора, а магний способен возгораться. Применение для обработки таких материалов закрытых камер с электролитом, возможность автономного протекания исключает нежелательные явления.

При положительных результатах технико-экономического анализа следует составить **исходную информацию** для проектирования (табл. 2.5.5).

2.5.5. Исходная информация

Параметр	Характеристики	Ограничения	Источник информации
1	2	3	4
Свойства обрабатываемого материала	Марка	Должен быть токопроводящим	Чертеж детали
	Состав Плотность Твердость Нетокопроводящие структурные составляющие или включения Нетокопроводящие участки поверхности (окалина, загрязнения, масла и др.)	— — Не ограничена Не допустимы	Справочники —" —" —"
Геометрия детали	Габаритные размеры	Требуется полное удаление загрязнений (промывкой, очисткой, травлением и др.)	Чертеж детали, осмотр детали
	Припуск на обработку	Возможность размещения на столе станка	Чертеж детали. Паспорт станка
	Допуски на размеры	Наличие гарантированного припуска и его неравномерность Возможность получить деталь без последующих операций	Табл. 2.5.6. Чертеж детали и заготовки Табл. 2.5.6. Чертеж детали

Продолжение табл. 2.5.5

1	2	3	4
Геометрия детали	Параметры шероховатости	Обеспечить требуемые в чертеже детали параметры шероховатости после обработки	Табл. 2.5.7. Чертеж детали
Оборудование	Назначение	Соответствие выполняемой операции	Паспорт оборудования
	Наличие	Возможность дополнительной загрузки	Планы производства
Инструмент	Наличие	Возможность использования без доработки	Чертежи инструмента
	Возможность приобретения	Наличие требуемого инструмента	Каталоги
	Возможность изготовления	Наличие мощностей	Характер оборудования
Технологическая подготовка производства	Наличие заготовок	Возможность получения	Материальные ведомости
	Наличие обученного персонала	Наличие опыта у рабочих и инженеров	Документы о переподготовке
	Возможность изготовления продукции на стороне	Экономическая целесообразность	Экономический анализ
	Наличие специфических контрольных приборов и кадров	Подготовка эталонов продукции	Чертеж детали
		Обучение контролеров	Документы о переподготовке

Припуски и погрешности обработки приведены в табл. 2.5.6.

## 2.5.6. Припуски и погрешности обработки

Схема и метод обработки	Припуск, мм	Общая погрешность		
		мм	Квалитет точности	
1	2	3	4	
<b>Обработка неподвижными электродами</b> безразмерная размерное формообразование	Не ограничены в пределах погрешности заготовки			
	Не ограничен	10 % от глубины обработки		
<b>Обработка подвижными электродами</b> прошивание углублений полостей, отверстий крупных полостей глубоких отверстий профиля пера лопаток с длиной:	до 100 мм	0,5-0,6	0,03-0,15	
	от 100 до 200	0,5-0,8	0,1-0,3	
	от 200 до 300	0,6-1,0	0,2-0,5	
	свыше 300	0,8-2,0	0,3-0,8	
		—	—	3-10
		—	—	12-14
		—	—	10-12

Продолжение табл. 2.5.6

1	2	3	4
Точение	0,4-0,8	—	8-10
Протягивание	0,3-0,6	0,04-0,08	8-10
Разрезание	—	—	9-10
Шлифование	0,2-0,6	0,05-0,07	7-9
Гравирование	0,1	0,03-0,05	—

**План проектирования технологического процесса.** После изучения чертежей заготовки, детали, технологических возможностей ЭХО проектируют технологический процесс:

1. Выбирают схему ЭХО, учитывая форму обрабатываемой поверхности, исходя из наличия оборудования и инструмента.

2. Оценивают технологичность детали и вносят необходимые изменения в чертежи с учетом применения ЭХО.

3. Разрабатывают маршрутный процесс ЭХО и уточняют его место в общем технологическом процессе изготовления детали.

4. Намечают способы защиты необрабатываемых поверхностей от анодного растворения: создание повышенных межэлектродных зазоров, использование диэлектрических покрытий.

5. Разрабатывают операционные карты с указанием режимов обработки.

6. Разрабатывают контрольные карты и инструкции контроля с учетом специфики ЭХО. Выдают технические задания на проектирование электродов-инструментов и приспособлений.

ЭХО обычно включается как составная часть в процесс механической обработки или сборки деталей. При выполнении операций ЭХО следует предусматривать этапы, которые могут быть самостоятельными операциями или переходами: подготовительный, обработки на станке, промывки и консервации детали, ее контроля.

**Подготовительный этап** включает очистку заготовок от консервирующих смазок, создание базовых поверхностей для установки заготовки и подвода тока, удаление неэлектродпроводных участков и покрытий, проверку размеров.

Расконсервацию заготовок, например после транспортировки, хранения на складе, проводят, помешая их в горячее масло ( $T = 370 \dots 390 \text{ K}$ ) на 10 ... 15 мин.

Если на детали не предусмотрены базовые поверхности, то их изготавливают на операциях, предшествующих ЭХО. Параметры шероховатости таких поверхностей не ниже  $Ra = 5 \text{ мкм}$ , точность 8-10 квалитет. Размеры

участков для подвода напряжения рассчитывают в зависимости от силы тока, применяемого при обработке. Для этого вычисляют площадь участка как отношение силы требуемого для протекания процесса тока к его плотности в местах контакта деталей.

**Плотность тока ( $\text{A}/\text{мм}^2$ )** выбирают в зависимости от материала токопроводящего элемента станка:

Медь . . . . .	$\leq 3$
Бронза, латунь . . . . .	$\leq 0,8$
Алюминиевые сплавы . . . . .	$\leq 1,5-2$
Коррозионно-стойкие стали . . . . .	$\leq 0,3$

Заготовки очищают от загрязнений и окислы пескоструйной обработкой, химическим травлением в ваннах, зачисткой металлическими щетками, абразивным инструментом. Затем заготовку подвергают химическому обезжириванию в течение 15 ... 20 мин в ваннах с раствором каустической соды концентрацией 100 ... 150  $\text{кг}/\text{м}^3$ , нагретым до температуры 350 ... 370 K. После обезжиривания заготовку промывают водой с температурой 350 ... 370 K в течение 1 ... 2 мин и сушат на воздухе. Места подвода тока протирают ветошью, смоченной бензином или другим органическим растворителем.

В процессе подготовительного этапа необходимо предусмотреть **входной контроль** заготовки. Выборочно на одном-двух экземплярах из партии контролер обязан проверить соответствие марки материала, указанной в чертеже. На нескольких заготовках из партии в начале изготовления деталей и периодически в дальнейшем следует измерять размеры припусков по сечениям и наименьшее значение припуска.

Перед обработкой партии заготовок следует проверить состояние электрода-инструмента, соответствие его цехового номера и размеров чертежу, отсутствие коротких замыканий, состояние диэлектрического покрытия.

Если используется специальное приспособление, то следует проверить соответствие цехового номера оснастки чертежу, правильность закрепления приспособления на станке,

правильность подключения полюсов источников питания, места подвода электролита, отсутствие коротких замыканий между деталями. Этот контроль обязан выполнять оператор.

Перед началом смены оператор должен проверить состояние станка: измерить объем, плотность, температуру электролита в ванне, проконтролировать начальное и конечное положения электродов, герметичность гидравлических узлов.

**Обработка на станке** включает установку заготовки, ее крепление и крепление токоведущих проводов к защитным участкам, установку электрода инструмента в исходное положение, обработку в расчетном режиме, снятие и контроль детали. Механизмы станка приводят в действие в такой последовательности: 1) вентиляция; 2) вспомогательные движения детали или электрода-инструмента (вращение, подвод и др.); 3) подача электролита; 4) рабочее напряжение; 5) подача электрода-инструмента.

Режим ЭХО контролируют по приборам, установленным на станке. Оператор обязан проверить соответствие напряжения требованиям операционной карты, следить за силой тока, давлением электролита, температурой и расходом электролита.

Выключение подачи инструмента и напряжения обычно осуществляется концевыми выключателями. Подачу электролита и привод вращения заготовки или инструмента включает оператор с пульта управления станком. Электрод-инструмент следует периодически очищать от загрязнений, оседающих на нем из потока электролита.

**Промывка и пассивация.** После обработки на станке детали из конструкционных сталей в течение 8 ... 15 мин промывают и подвергают пассивации, чтобы избежать коррозии. Промывку выполняют проточной водой в течение 3 ... 5 мин; при этом желательнее удалить загрязнения с помощью щетки. Затем деталь промывают в течение 5 ... 8 мин в горячей воде при  $T = 330 \dots 350$  К. Изделия пассивируют в слабом растворе каустической соды при температуре не ниже 330 К в течение 0,5 ... 1 мин. Для пассивации можно применять также растворы мыла, промывочные жидкости. После этого деталь сушат и смазывают маслом. Если деталь поступает на склад, то применяют более густые смазки.

В случае ЭХО коррозионно-стойких сталей, латуни применяют только промывку проточной водой для удаления остатков солей и загрязнений.

**Приемочный контроль** включает в себя оценку соответствия линейных и угловых размеров детали чертежу, сравнение обработанных поверхностей с эталоном шероховатости, визуальный осмотр на отсутствие при-

жогов от коротких замыканий, коррозии, проверку качества консервации.

При контроле может обнаружиться местное проявление структуры материала и рисунок перемещений инструмента на предшествующих операциях. Это не является дефектом, и в чертежах следует указывать допустимость таких явлений.

Кроме того, при освоении в производстве новых изделий может потребоваться специальный контроль эксплуатационных характеристик деталей после ЭХО. Это могут быть металлографические исследования материала, позволяющие выявить микрорастравливание и изменение химического состава поверхностного слоя, механические испытания при различных видах нагрузок, испытания стандартных образцов и натуральных деталей на выносливость. Эти виды контроля выполняют на специальном оборудовании в лабораториях завода.

#### 2.5.2. ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ

Параметры качества поверхности характеризуются шероховатостью после обработки, физическими (микротвердость, обезуглероженный слой и др.) показателями слоев материала, прилегающего к поверхности.

Шероховатость (микрорельеф) формируется без контакта инструмента с деталью, поэтому ее величина зависит от структуры материала, режимов обработки, припуска заготовки, формы неровностей после предшествующей операции. Так, требуемая величина припуска на электрохимическую чистовую обработку после предшествующей операции штамповки и очистки поверхности меньше, чем для такой же заготовки после точения. Время формообразования конечной поверхности — в пределах нескольких секунд. На обработанных участках неровности, как правило, образуются на границах зерен и определяются, главным образом, размерами. На этот показатель оказывают влияние температура электролита, форма и плотность рабочего тока, структура металла заготовки. Измерение параметров шероховатости после электрохимической обработки рекомендуется выполнять шуповым методом. Применение для этой цели оптических приборов вносит большие погрешности из-за специфического профиля неровностей после анодного растворения.

Микроуглубления на границе зерна имеют форму клиновидной щели, поэтому измерительный шуп профилографа не может достичь донной части углубления. Полная глубина впадины составляет дефектный измененный слой, определяющий эксплуатационные характеристики изделий.

Качество поверхности материалов приведено в табл. 2.5.7.

## 2.5.7. Качество поверхности после электрохимической обработки

Обрабатываемый материал	Схема и метод	Электролит	Вид тока	Параметр шероховатости поверхности Ra, мкм	Глубина растравленного слоя $h$ , мкм
Конструкционные стали	Электрохимическое полирование	Кислоты	Постоянный Импульсный	0,04-0,18 0,03-0,12	Нет сведений  Не наблюдается
		Хлорид натрия	Постоянный Импульсный	0,16-0,32 0,1-0,2	
	Нитрат натрия			Постоянный Импульсный	
Коррозионно-стойкие, жаропрочные сплавы	Размерное формообразование	Хлорид натрия	Постоянный	1,25-2,5	15-30
			Импульсный	0,63-1,25	10-15
		Нитрат натрия	Постоянный	0,63-1,25	10-15
			Импульсный	0,32-0,63	8-10
Чугуны	Размерное формообразование	Хлорид натрия	Постоянный	1,25-2,5	2-5
Титановые сплавы	Размерное формообразование	Хлорид натрия	Постоянный	1,25-2,5	5-40
		Хлорид натрия бромистым калием	Постоянный	0,63-1,25	30-40
Алюминиевые сплавы	Химическое полирование	Кислоты	Постоянный	0,1	Нет сведений
	Электрохимическое полирование	Кислоты	Постоянный	0,16	То же
	Размерное формообразование	Нитрат натрия	Постоянный	0,32-1,25	Не наблюдается
Медные сплавы	Химическое полирование	Кислоты	Постоянный	0,1	Нет сведений
	Электрохимическое полирование	Кислоты	Постоянный	0,16-0,63	
Материалы из металлических порошков	Размерное формообразование	Хлорид натрия	Постоянный	0,16-0,32	Не наблюдается  То же
			Импульсный	0,1-0,16	
		Хлорид натрия	Постоянный	0,32-0,63	
			Импульсный	0,16-0,32	

**Физические свойства поверхности.** Отсутствие высоких температур в зоне обработки и контакта инструмента с деталью обеспечивают стабильность химического состава, микротвердости поверхностного слоя и сохранение их свойств относительно сердцевины. В отли-

чие от механической обработки в рассматриваемом случае не имеется наклепа поверхности.

Форма микроуглублений вызывает появление остаточных напряжений в поверхностном слое (табл. 2.5.8). Максимальная глубина

## 2.5.8. Остаточные напряжения

Обрабатываемый материал	Электрохимическая обработка в растворах нейтральных солей		Механическая обработка	
	Наибольшая величина напряжения, МПа	Наибольшая глубина залегания напряжений, мм	Наибольшая величина напряжения, МПа	Наибольшая глубина залегания напряжений, мм
Конструкционные стали	30-40	0,02-0,05	130-220	0,10-0,12
Титановые сплавы	500-600	0,10-0,15	700-800	0,10-0,15
Алюминиевые сплавы	50-60	0,05-0,08	70-120	0,05-0,08

залегания остаточных напряжений после электрохимической обработки не превышает аналогичного показателя после базового варианта обработки шлифованием, а величина напряжений в несколько раз ниже по сравнению с базовым вариантом.

С повышением плотности тока, снижением температуры электролита величина и глубина залегания остаточных напряжений снижается.

В процессе анодного растворения выделяется водород, который при определенных условиях может вызвать наводороживание (см. табл. 2.5.9) обрабатываемой поверхности, что вызывает повышенную хрупкость материала и снижает сопротивление усталости сплава. Снизить наводороживание можно изменением режимов, повышением скорости протекания электролита, что ускоряет вынос из межэлектродного промежутка газообразных продуктов обработки.

## 2.5.9. Содержание водорода в поверхностном слое после электрохимической обработки в растворах нейтральных солей

Обрабатываемый материал	Вид обработки	Содержание водорода в слое, %	Изменение содержания водорода относительно базового варианта, % ("+" — возрастание, "-" — снижение)
Сталь 40ХНМА	Шлифование (базовый вариант)	0,00025	—
	Электрохимическая обработка при температуре, К:	307	0
		313	-15
		323	-20
Сталь 30Х3МФА	Шлифование	0,00022	—
	Электрохимическая обработка при 292 К	0,00020	-9
Титановый сплав ВТ3-1	Шлифование	0,010	—
	Электрохимическая обработка при 313-320 К	0,019	+90

Имеются стандарты на предельное содержание водорода в поверхностном слое. После электрохимической обработки превышение содержания водорода наблюдается для титановых сплавов, причем этот показатель изменяется в широких пределах не только с помощью режимов обработки, но и в течение времени после окончания процесса анодного

растворения. Так, содержание водорода в материале ВТ3-1 через 50-60 дней снижается до предела, допустимого стандартом. Аналогичный эффект дает вакуумный отжиг.

Имеются способы (табл. 2.5.10) снижения содержания водорода в поверхностном слое путем последующей обработки.

## 2.5.10. Изменение содержания водорода при последующей обработке

Обрабатываемый материал	Содержание водорода, %, при обработке			
	электрохимическим методом (ЭХО)	ЭХО с последующим упрочнением	ЭХО с последующим шлифованием и упрочнением	полированием с припуском около 0,02 мкм
Сталь 40ХНМА	0,00025	0,00018	0,0002	0,00018
Титановый сплав ВТЗ-1	0,019	0,0155	0,019	0,015

## 2.5.3. ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТ

Электрод-инструмент проектируют и изготавливают, как правило, для каждого типоразмера детали. Точность формы и размеров его рабочего профиля должна быть на один квартал выше, чем обрабатываемой детали (6-8-й квартал точности). Шероховатость поверхности рабочей части не влияет на качество обрабатываемой поверхности, но определяет характер течения электролита, интенсивность загрязнения зазора продуктами обработки. Параметр шероховатости рабочей поверхности  $Ra \leq 2,5$  мкм. Для снижения износа диэлектрических направляющих электродов-инструментов, например, при протягивании, параметр шероховатости их поверхности  $Ra \leq 1,25$  мкм. При проектировании электродов-инструментов необходимо предусмотреть, чтобы электролит протекал плавно, без резких поворотов, поскольку это приводит к срывам потока и проявлению местных необработанных участков. При разработке рабочей части следует учитывать возможность многократной ее корректировки по результатам экспериментов и оставлять припуск для ремонта после коротких замыканий.

Электроды-инструменты проектируют по результатам расчета профиля рабочей части. Заготовками для них могут служить: стандартный прокат, отливки, штампованные

изделия, поковки, формы, полученные гальванопластикой и напылением.

Для электродов-инструментов необходимо выбирать сплавы, обладающие коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью, хорошей сопротивляемостью местному разрушению при коротких замыканиях, высокой адгезией к диэлектрическим покрытиям, достаточной механической прочностью и обрабатываемостью, низкой стоимостью (табл. 2.5.11).

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют медь, медные сплавы, коррозионно-стойкие стали; в меньшей степени – титановые сплавы. Медь и ее сплавы имеют высокую электропроводность, свариваемость, удовлетворительную адгезию к покрытиям, достаточную механическую прочность. Главным их недостатком является высокая чувствительность к коротким замыканиям, при которых выплавляются большие участки рабочей поверхности, что затрудняет их восстановление. Если заготовку электрода-инструмента получают литьем, то в качестве материала используют латунь или бронзу.

Электроды-инструменты повышенной прочности изготавливают из коррозионно-стойкой стали, например, 12Х18Н9Т, которая не разрушается при коротких замыканиях, имеет предел прочности в 2-3 раза выше, чем медь, обладает высокой адгезией с покрытиями. При этом следует учитывать низкую

## 2.5.11. Материалы для рабочей части инструмента

Характеристика материалов	Медь	Латунь	Бронза	Коррозионно-стойкая сталь
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м/мм <sup>2</sup>	0,0175	0,062	0,021	0,75
Проводимость относительно меди, %	100	32	83	2-3
Предел прочности, МПа	200-300	350-650	180-210	540-560
Адгезия с покрытиями	Удовлетворительная	Удовлетворительная	Удовлетворительная	Хорошая

удельную электрическую проводимость (в 30-50 раз меньше, чем у меди). Поэтому контактные участки для подвода напряжения у таких инструментов должны быть большими.

На часть электрода наносят диэлектрические материалы. Они используются:

1) в виде покрытий толщиной 0,05 ... 0,5 мм;

2) в виде механически обработанных конструктивных элементов (стержней, брусьев, листов, плит), которые либо закрепляются на обрабатываемой поверхности, либо составляют часть электрода-инструмента.

**Покрытия** должны обладать высокой адгезией к металлу, механической прочностью, хорошей износостойкостью в условиях трения, стабильными диэлектрическими свойствами. Технология нанесения их на поверхность металла должна быть простой. Покрытия должны создавать плотную беспористую пленку, исключающую проникновение электролита к металлу, не разбухать под действием жидкости. В качестве покрытий используют эпоксидные смолы, лаки, керамические эмали, капрон в порошке, полиэтилен. Поверхность детали предварительно обрабатывают для повышения шероховатости: царапают металлическими щетками, обдувают дробью, обкатывают канавки.

Смолы, лаки и эмали наносят кистями, распылителями или окунанием. Капрон, полиэтилен, другие пластмассы наносят в псевдокипящем слое. Эффективно использование в качестве изоляционного покрытия оксидной пленки металла электрода-инструмента, полученной непосредственно на электроде путем его специальной термообработки.

Если покрытия наносят на нерабочие поверхности электрода-инструмента, то обычно используют специальную резину с повышенной адгезией к металлам, пластмассу типа АСТ-Т, стиракрил. Для улучшения адгезии перед нанесением покрытий в детали предварительно сверлят отверстия под различными углами к поверхности. Покрытие заполняет отверстия и прочно удерживается на детали. Иногда в отверстия запрессовывают короткие штифты, которые также служат для закрепления покрытия.

Резину и герметики на ее основе используют для нанесения покрытий на участки деталей, имеющих замкнутый контур. Вследствие упругих свойств такое покрытие прочно удерживается на поверхности даже при больших скоростях течения электролита.

**Конструкционные элементы** из диэлектриков применяют для переходников, крепежных частей, направляющих для электродов-инструментов, работающих по схеме протягивания, упоров и других деталей. Они

должны быть прочны, способны работать при высоких температурах (свыше 320 К), обладать слабой водопоглощаемостью. Чаще всего применяют резину, стеклотекстолит, фторопласт, капролон. Стеклотекстолит и текстолит, несмотря на хорошие характеристики, набухают в электролите. Для ликвидации недостатка изготовленные из них детали до сборки проваривают в масле в течение 3 ... 5 ч. Резина может работать при температуре не выше 325 ... 330 К. При коротких замыканиях температура превышает 15000 К и резина разрушается. Кроме того, резиновые детали не позволяют точно базировать заготовку, поскольку материал упругий и изменяет форму при усилиях закрепления.

Фторопласт обладает удовлетворительной прочностью, хорошо работает при температурах до 530 К, но из-за большой массы конструкции из него тяжелы, и это может влиять на точность обработки.

Форма обработанной поверхности неэквидистантна форме электрода-инструмента. Это объясняется, во-первых, непостоянством режима обработки из-за колебания температуры, защелоченности электролита, напряжения и др. Во-вторых, даже при плоских параллельных поверхностях заготовки и инструмента электрическое поле в межэлектродном зазоре неоднородно вблизи краев. Здесь плотность тока и сьем металла будут другими, чем на основной детали. Такое отличие будет тем заметнее, чем дальше отстоят друг от друга заготовка и электрод-инструмент.

Приблизить форму детали к требуемой чертежом можно либо нанесением слоя изоляции на электрод-инструмент или заготовки, либо коррекцией формы рабочей поверхности инструмента по результатам расчетов и экспериментов. При расчете формы электрода-инструмента в общем случае принимают режим обработки стабильным, а начальный (до корректировки) профиль инструмента эквидистантным профилю детали. Методика расчета выбирается в зависимости от схемы ЭХО.

**При схеме с неподвижными электродами** корректировка формы рабочей поверхности инструмента не дает положительных результатов, так как из-за постоянного возрастания межэлектродного зазора условия обработки во времени меняются. В этом случае используют диэлектрические покрытия. На рис. 2.5.5. приведены примеры нанесения покрытий 2 на поверхность электрода-инструмента 1. Если размеры электропроводной части электрода-инструмента совпадают с размерами заготовки 3 (рис. 2.5.5, а), то искажение поля будет лишь в непосредственной близости от кромок и профиль детали будет близок к форме рабочей поверхности инструмента

(показано штриховой линией на рисунке). Если же размеры заготовки 3 отличаются от размеров рабочей части инструмента 1, ограниченной изоляцией 2 (рис. 2.5.5, б), то электрическое поле в зазоре будет неравномерным и форма детали около границ обрабатываемого контура искажается (штриховая линия на рисунке).

Если наносить диэлектрик на заготовку 3 (рис. 2.5.5, б), то плотность тока возрастает вблизи границ изолятора 2. В этих местах независимо от размеров инструмента 1 будет увеличиваться съем металла (штриховая линия на рисунке) — возникает погрешность по глубине обработки.

Для большинства операций ЭХО неподвижными электродами погрешность по глубине не является определяющей. Поэтому целесообразно наносить изоляцию на заготовку. Покрытия наносят на заготовку с помощью масок или фотолитографии. После ЭХО покрытия удаляют шлифованием, полированием или химическим травлением. Однако при этом покрытие используется только один раз и усложняется подготовка заготовок к ЭХО. Чтобы избежать чрезмерного повышения трудоемкости операции, изготавливают диэлектрический трафарет обрабатываемой поверхности, который плотно накладывается на деталь. Толщина трафарета должна быть не более 20 ... 60 % от размера начального межэлектродного зазора. При большей толщине ухудшаются условия течения электролита и снижается точность обработки. В качестве

материала для трафарета используют полиэтиленовую или лавсановую пленку, специальную бумагу, гетинакс, органическое стекло, винипласт толщиной 0,1 ... 0,5 мм. Размеры отверстий в трафарете должны быть меньше, чем размеры обрабатываемых участков, чтобы компенсировать боковое растворение углублений на заготовке:

$$b_T = b_d - (0,1 \dots 0,5)h$$

где  $b_T$  — ширина отверстия в трафарете;  $b_d$  — ширина отверстия в детали по чертежу;  $h$  — глубина растворения металла (если отверстие сквозное, берут толщину заготовки).

Трафареты изготавливают различными методами. Наиболее распространено гравирование отверстий по копирам фрезой с высокой скоростью резания.

Изоляционные покрытия можно наносить на инструмент или заготовку с использованием технологии фотолитографии или фотохимии.

**Электроды-инструменты для прошивания** изготавливают в зависимости от вида обработки: изготовление отверстий металлическим инструментом или струйным методом; образование углублений с постоянными и изменяющимися параметрами, конических, сферических и других поверхностей; кольцевая вырезка (трепанация) и др.

Отверстия при прошивании могут быть цилиндрическими, коническими, сквозными

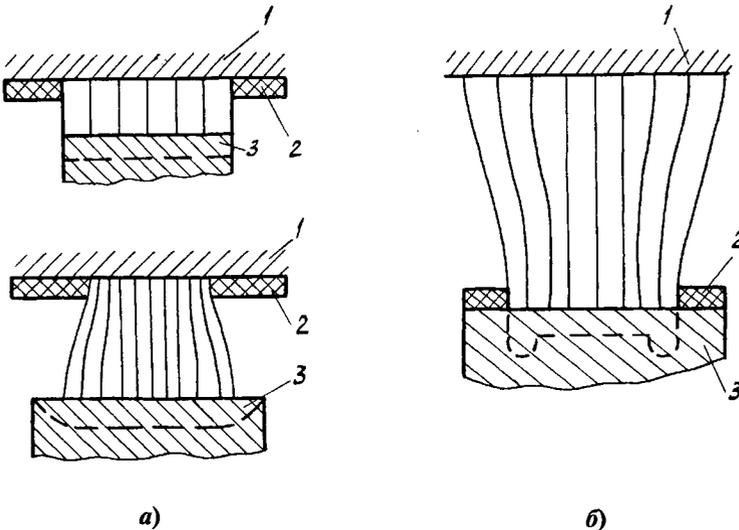


Рис. 2.5.5. Схемы нанесения покрытия:  
а - на электрод-инструмент; б - на заготовку

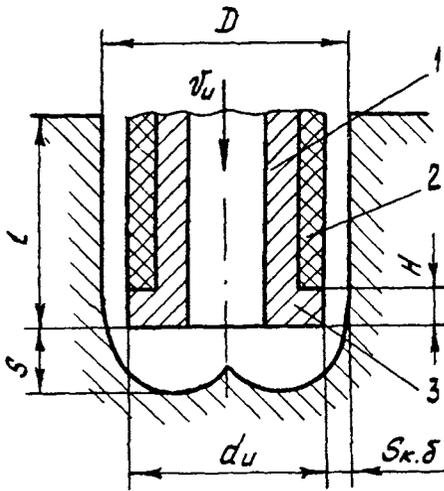


Рис. 2.5.6. Электрод для прошивания круглых отверстий:

$S_{x.б.}$  - боковой зазор;  $S$  - торцовый зазор;  $l$  - глубина обработки;  $v_u$  - скорость подачи электрода

или глухими. В большинстве случаев электрод (рис. 2.5.6) выполняют в виде трубки 1, изолированной снаружи покрытием 2. Со стороны рабочего торца обычно делают бурт 3, предохраняющий покрытие 2 от разрушений струей электролита и продуктами обработки. Если отверстие круглое, то электроду-инструменту придают дополнительное вращение, позволяющее повысить точность размеров сечений. При расчете электрода-инструмента необходимо найти диаметр  $d_u$ , обеспечивающий получение отверстия диаметром  $D$ .

Для получения прецизионных отверстий высота бурта  $H$  должна быть как можно меньше, однако по возможностям технологии

$$H \geq 0,2 \dots 0,3 \text{ мм.}$$

У электродов-инструментов с толстыми стенками вместо изоляции боковой поверхности можно наружный диаметр инструмента уменьшить на 1,5-2 мм по сравнению с диаметром бурта.

Длина электрода

$$l = k_{рем} (l_d + l_3 + l_b),$$

где  $l_d$  - глубина отверстия;  $l_3$  - длина участка для закрепления электрода в электрододержателе;  $l_b$  - длина выхода инструмента (при прошивании сквозных отверстий);  $k_{рем} = 1,2 \dots 2$  - коэффициент, учитывающий сокращение длины электрода при ремонте.

Если  $l_d \geq (10 \dots 12)D$ , то инструмент следует рассчитывать на жесткость; при этом повышенные требования предъявляют к технологической системе в целом.

Электроды изготавливают в такой последовательности:

- 1) рассчитывают диаметр  $d_u$ ;
- 2) трубку необходимого диаметра рихтуют, для чего ее в нагретом состоянии растягивают вдоль оси;
- 3) отрезают кусок трубки длиной  $l$ ;
- 4) шлифуют и протачивают наружную поверхность на глубину слоя изоляции, сохраняя бурт и участок для закрепления электрода-инструмента в электроде-держателе;
- 5) наносят слой изоляции;
- 6) зачищают рабочую часть электрода-инструмента от изоляции и других нетокопроводящих частиц;
- 7) осуществляют контроль электрода-инструмента.

Прошивание полостей применяют для изготовления кованых штампов, литейных форм, пресс-форм, лопаток энергетических машин (газотурбинных двигателей, гидроагрегатов) и др. При проектировании электрода-инструмента и положения щелей и отверстий для подвода электролита в зону обработки, чтобы определить форму рабочей поверхности, сначала по чертежу обрабатываемой поверхности детали строят эквидистантный профиль электрода-инструмента с зазором, равным установившемуся зазору, а затем находят действительную форму электрода-инструмента. Известны три метода нахождения его размеров:

- 1) аналитический и графоаналитический;
- 2) метод моделирования электрическим полем;
- 3) производственный.

**Аналитический расчет** формы инструмента выполняют методом решения стационарных задач с использованием функций Грина или методом разделения контура на отдельные участки, описываемые плоскими, цилиндрическими и сферическими поверхностями. Такие расчеты проводят с применением ЭВМ.

Метод решения стационарных задач даже с использованием современной вычислительной техники применим для определения инструмента только в случае простой его формы. Поэтому на практике обычно используют метод разделения контура на отдельные участки. При этом находят отклонения формы инструмента от эквидистантной для каждого участка поверхности и определяют требуемые размеры инструмента.

Форма рабочей поверхности электрода может быть найдена графически. Тогда метод расчета будет относиться к **графоаналитическому**. Здесь вычисленные значения зазоров откладывают в выбранных сечениях по нормали к поверхности детали и получают участок профиля электрода-инструмента.

Для определения формы инструмента используют **метод моделирования**. В случае идеального процесса форма и положение обрабатываемой поверхности в любой момент времени совпадают с эквипотенциальной поверхностью поля. Положение этих поверхностей определяется градиентом потенциала. Следовательно, возможно однозначное решение задачи.

Для нахождения формы электрода-инструмента рассматривают статические и стационарные (неподвижные и не изменяющиеся по времени) электрические поля, поле скорости жидкости, движущейся в капиллярно-пористом теле и т.д.

Известен метод непрерывного моделирования, при котором берут капиллярно-пористое тело, например, фильтровальную бумагу, которую накладывают на подставку, пронизанную капиллярами. Часть капилляров можно перекрыть элсктрической, повторяющей по форме начальную обрабатываемую поверхность. Подставку помещают в жидкость, которая через свободные капилляры смачивает фильтровальную бумагу. Процесс смачивания и последующего распространения жидкости по фильтровальной бумаге фиксируют с помощью видеокамеры, кино- или фотоаппарата. Получаемая картина подобна изменению формы обрабатываемой поверхности при ЭХО.

Методы моделирования не находят широкого применения из-за слишком грубого приближения к результатам реального процесса ЭХО.

**Производственный метод.** Все рассмотренные выше методы нахождения формы электрода-инструмента не учитывают гидродинамики потока электролита, изменения его температуры и других факторов, поэтому расчет и моделирование дают приближенные результаты. Их уточняют путем экспериментов на промышленном оборудовании. В производстве используют два метода: обратного копирования и последовательных приближений.

При методе обратного копирования электрод-инструмент изготавливают методом ЭХО, где в качестве инструмента используется выполненная слесарно-механическим методом модель детали. Метод дает хорошие результаты при небольшой толщине слоя металла, удаляемого с рабочей части электрода-

инструмента при схеме обработки с неподвижными электродами. При удалении значительных припусков этот метод может использоваться для предварительной обработки.

Окончательную доводку рабочего профиля электрода-инструмента выполняют методом последовательных приближений путем уточнения формы после обработки пробной партии деталей. Уточнение ведут до получения деталей, соответствующих требованиям чертежа.

**Изготовление электродов-инструментов** для прошивания полостей ведется в такой последовательности:

1. По результатам расчетов изготавливают шаблоны с профилем, обратным профилю рабочей части электрода-инструмента. Количество шаблонов выбирают таким, чтобы можно было контролировать все сечения.

2. По шаблонам (как по модели) выполняют литейные формы, отливают заготовку с каналами для подвода электролита. Если каналы в электроде-инструменте не предусмотрены, заготовку выполняют из стандартного проката или из поковки.

3. С помощью механической обработки изготавливают посадочные поверхности и доводят рабочий профиль электрода-инструмента по шаблонам.

4. Формируют щели и отверстия. Ширина щели 1 ... 2 мм, длина на 10 ... 12 мм меньше длины электрода-инструмента. Диаметр отверстий 1,5 ... 3 мм.

5. Изготавливают на электрохимическом станке полость в образце из материала заготовки и контролируют точность профиля углубления.

6. Скругляют кромки щелей и отверстий и полируют рабочую поверхность. Если углубление в образце не соответствует проекту, то рабочий профиль изготавливают методом обратного копирования и доводят его слесарно-механической обработкой.

7. Покрывают изоляцией нерабочие участки. При серийном производстве целесообразно уточнить профиль шаблонов по окончательной форме электрода-инструмента и использовать их в дальнейшем для изготовления рабочей части.

Если необходимо получить отверстия большего диаметра или обработать снаружи крупную заготовку, то из листа изготавливают трепанирующий электрод-инструмент. Лист изгибают по форме обрабатываемого контура в детали. Нерабочие поверхности покрывают слоем изоляции. Для предохранения такого покрытия от разрушения потоком электролита с рабочего торца предусматривают бурт, аналогичный тому, который используют для прошивания отверстий.

**Электроды-инструменты для электрохимического точения.** По схеме точения обрабатывают как наружные, так и внутренние поверхности.

Электрод-инструмент для точения внутренней поверхности изготавливают в форме вала с центральным отверстием для подвода электролита. На наружной поверхности электрода-инструмента, используемого при обработке внутренней поверхности, часто устанавливают выступающие из корпуса диэлектрические упоры, которые регулируют размер межэлектродного зазора. Высота упоров должна быть близка к размеру зазора. Изготавливают такие электроды-инструменты из проката. Упоры и вкладыши крепят винтами или клеем. Наружную поверхность упоров обрабатывают на токарных станках после сборки электрода-инструмента.

Если отверстие имеет переменный по длине диаметр или некруглое поперечное сечение, то электрод-инструмент может быть выполнен в виде перемещаемой по трубе каретки, несущей рабочую часть инструмента.

**Электроды-инструменты для работы по схеме протягивания.** По такой схеме обрабатывают внутренние и наружные поверхности круглого и некруглого сечения с плавным переходом между сечениями. Для повышения точности круглого цилиндрического отверстия детали придают вращательное движение с частотой вращения 0,5 ... 1,5 с<sup>-1</sup>.

**Электроды-инструменты для схемы разрезания** рассчитывают, исходя из обеспечения требуемой жесткости, так как колебания электрода в пазе вызывают прижоги на заготовке. Электрод-инструмент выполняют в форме диска с буртиком на рабочей части.

При разрезании заготовок непрофилированным электродом-инструментом используют проволоку диаметром 0,2 ... 2,0 мм из латуни или стержни диаметром 0,5 ... 2,5 мм из вольфрама, латуни. Использование проволоки предпочтительнее: вследствие более высокой жесткости она обеспечивает повышенную точность обработки.

#### 2.5.4. ОБОРУДОВАНИЕ

По структуре станки для ЭХО близки к агрегатным. Они включают стандартные узлы: источник питания, насос, ванны для хранения электролитов и промывочно-пассивирующих жидкостей, устройство для очистки электролита, элементы управления. Механическая часть станка всегда оригинальна, она содержит элементы для установки и крепления деталей, механизмы подачи электродов-инструментов, системы подвода рабочего напряжения и электролита. Для проектирования любого электрохимического станка необходимо рассчитать параметры источника питания, насоса, ванны для электролита, выбрать средства очистки жидкости от продуктов обработки, разработать элементы механической части станка, выбрать систему регулирования межэлектродного зазора, стандартные узлы обычно рассчитывают из числа серийно выпускаемых. Нестандартные узлы и детали также рассчитывают, проектируют и изготавливают для конкретного вида обрабатываемых поверхностей и схемы обработки.

Большинство электрохимических станков выпускается малой серией или по заказам предприятий, и имеет характеристики, приведенные в табл. 2.5.12.

#### 2.5.12. Технические характеристики типового оборудования для электрохимической обработки

Модель	Назначение	Наибольшие размеры обрабатываемых заготовок, мм	Скорость съема металла, мм/мин	Сила тока, А, не более	Напряжение, В	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7
ЛСВХ-2	Прошивание отверстий $\varnothing$ 5-12 мм, глубиной 800 мм	100×100×800	1,5-60	3000	6-12	—
4422	Формообразование полостей	250×300×160	0,3-12	3200	16	4500
4А423ФЦ	Формообразование полостей	480×350×400	12000 мм <sup>3</sup> /мин	3200	16	4500
ЭХО-2	Обработка пера лопаток	Длина до 300	0,2-1,0	10000	12	3000
4412ФЦ	Обработка тел вращения	Длина до 250	3000 мм <sup>3</sup> /мин	3200	6-12	1800

Продолжение табл. 2.5.12

1	2	3	4	5	6	7
ЭХТ-1500	Протягивание (возможно вращение заготовки)	Отверстия $\varnothing 10-80$ , длина детали 300-1600	Подача инструмента 1-5 мм/с	3200	12-18	2500
3Е711Э Ф2-1	Плоское и профильное шлифование	200×320×400	—	1600	6-12	4200
3Э110	Шлифование отверстий токопроводящим инструментом	$\varnothing 10-25$ , длина до 180	—	1600	2-10	2600
38220Э	Хонингование отверстий	$\varnothing 8-30$ , длина до 80	—	630	12	2760
СЭП906	Обработка штампов и других деталей непрофилированным стержнем по программе (трехкоординатной)	400×800	2000 мм <sup>3</sup> /мин	6000	5-12	6000
Штемпель-ручка ЭМ3	Мелкое маркирование крупногабаритных деталей	Не ограничены	Время маркирования 1-2 с	До 0,5	36	0,15
Переносной прибор УПЭК-901	Мелкое маркирование металлических деталей по трафарету и профильными знаками. Шрифт более 1,5 мм	Не ограничены	Время маркирования 2-3 с	До 2	2-16	8
Автоматы для маркирования цилиндрических отверстий	Мелкое маркирование колец, сверл и др.	Детали до $\varnothing 160$ мм	Время маркирования 1-1,5 с	До 2	4-10	450
СЭХО-902	Глубокое (более 0,02 мм) маркирование по трафарету или профильным инструментом	Площадь маркируемой поверхности до 300 см <sup>2</sup>	Время маркирования до 60 с	До 10	0-18	300
Гибкий модуль КМЭ-1	Глубокое и мелкое маркирование в зоне до 2 м по трафарету, сплошным и растровым инструментом	До 2 м от модуля	Время маркирования 1 ... 30 с	До 10	0-24	110
4407	Удаление заусенцев и скругление кромок	630×630	Время обработки до 60 с	2000	До 22	4400

**Источники питания (ИП)** электрохимических станков преобразуют напряжение электрической сети в постоянное или униполярное импульсное. В отдельных случаях для ЭХО используют и переменный ток. Во всех случаях, кроме обработки струйным методом,

выходное напряжение источника питания обычно не превышает 36 В. Сила тока может достигнуть 30000 А (в зависимости от мощности ИП). Источники могут быть со ступенчатым и плавным регулированием силы тока или напряжения, со стабилизацией выходных пара-

метров. Источники бывают двух видов: электромеханические и статические.

**Электромеханический ИП** представляет собой механически связанные электродвигатель и генератор, вырабатывающий ток требуемого напряжения. При работе генератора возникают шум, вибрации; электромеханические ИП сложны в обслуживании, имеют низкий КПД и используются редко.

Благодаря использованию выпрямительной техники были созданы **статические ИП** на селеновых кремниевых выпрямителях. Наиболее перспективными являются источники с управляемыми выпрямителями, называемыми тиристорными преобразователями, с системами защиты от перегрузок. Некоторые преобразователи позволяют менять полярность напряжения на выходе, их называют *реверсивными*.

Все источники должны быть защищены от перегрузок. В качестве простейшего устройства для защиты от перегрузок можно использовать обычное тепловое реле, которое реагирует на изменение силы тока выше предельной, необходимой для нормального про-

текания процесса ЭХО. Недостатком таких реле является большое время срабатывания. Для защиты от перегрузок чаще используют быстродействующие электронные схемы на транзисторах. Время срабатывания таких систем составляет 0,008 с, поэтому отключение источника питания происходит до контакта электродов.

Простейшими статическими источниками питания являются селеновые неуправляемые выпрямители типа ИПП (табл. 2.5.13), состоящие из трансформатора и выпрямителя. Серийно выпускаются тиристорные источники питания типа ВАК (выпрямительный агрегат кремниевый), и ВАКР (реверсивный) с силой выходного тока 25000 А. Они имеют устройства для автоматического поддержания заданной силы тока, напряжения, плотности тока, дают возможность регулировать напряжения от нескольких вольт до 36 или 48 В. Чтобы получить импульсное напряжение, используют специальные источники питания или приставки, подключаемые к источникам питания с постоянным напряжением.

### 2.5.13. Характеристики источников питания

Тип	Сила тока, А	Напряжение, В		Мощность на выходе, кВт	Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч, не менее
		1 ступень	2 ступени		
ВАКР-100-12У4	100	6-12	3-6	1,2	Не требуется
ВАКР-320-18У4	320	9-18	3-9	5,76	0,2
ВАКР-630-24У4	630	12-24	3-12		0,2
ВАКР-1600-24У4	1600	12-24	3-12	38,4	0,4
ВАКР-3200-12У4	3200	6-12	3-6	38,4	0,96
ИПП-5000/14	5000	18,16	14	—	—
ВАКР-6300-12У4	6300	6-12	3-6	75,6	0,9
ВАКР-12500-12У4	12500	6-12	3-6	150	1,8
ВАКР-25000-24У4	25000	12-24	3-12	600	5,0
ИППС-30000/18	30000	36; 27	21; 18	—	—

Если процесс ЭХО протекает в течение нескольких секунд, например, при маркировке деталей по схеме с неподвижными электродами, то электролит не успевает загрязниться продуктами обработки. В этих условиях электролит не прокачивают. При времени процесса до 8-10 с для перемещения электролита могут быть использованы ультразвуковые или низкочастотные вибрации электродов или влажные ленты, перемещаемые

через межэлектродный зазор. Если обрабатывают детали, предназначенные для перемещения газов или жидкостей (крыльчатки компрессоров, насосов, шнеков и др.), то электролит можно перемещать за счет вращения самой заготовки. Жидкость протекает по зазору между электродами со скоростью, регулируемой частотой вращения заготовки. В остальных случаях используют насосы, характеристики которых приведены в табл. 2.5.14.

## 2.5.14. Характеристики насосов

Тип, модель	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Напор, м	Потребляемая мощность, кВт	Габариты, мм
1,5X-6E-1	5,4-12	20	4,5	405×490×940
ЭКН-10/1-11	10	90	6,0	390×485×910
2X6E-1	12-29	35	7,5	485×540×1196
3MC10	34	69	11	—
		92	15	—
4MC10	60	66	20	—
		99	25	—
3KM6	45	54	17	—
ЭПХКН-3	50	80	35	—
5MC10	105	98	50	—
10MC10	105	147	75	—

Наиболее широко применяются центробежные насосы, выполняемые из коррозионно-стойкой стали. Они не боятся загрязнения перекачиваемой жидкости и надежны в работе.

**Ванны** служат для хранения и приготовления электролита, промывки, консервации и пассивации деталей. Форма и размеры ванн для хранения электролита обусловлены необходимостью отстоя продуктов обработки, периодического их удаления, стабилизации температуры жидкости. В ваннах устанавливают теплообменники для нагрева и охлаждения электролита. Регулирование температуры и состава жидкости осуществляют автоматическими системами.

Ванны обычно изготавливают из коррозионно-стойкой стали или химически стойких диэлектриков. Они могут иметь одну или несколько секций. Для удобства транспортировки и монтажа ванны вместимостью до 1,5 м<sup>3</sup> обычно делают односекционными, более вместительные - двухсекционными. При большом числе станков электролит хранят в бетонных емкостях или бассейнах. Бассейны удобны тем, что в них электролит методом отстаивания очищается от продуктов обработки, имеет стабильный состав, температуру. Бассейны чистят не чаще одного раза в год.

Открытые бассейны занимают большую площадь, велика длина трубопроводов, трудно регулировать состав и температуру жидкости. Нагрев и охлаждение больших емкостей требуют дополнительных затрат энергии, занимают много времени, а зимой бассейны замерзают. Поэтому для хранения больших масс электролита чаще всего используют бетонные

емкости, расположенные в закрытых помещениях. Если число станков не превышает 10-12, то используют индивидуальные ванны.

Максимальная сила тока, необходимая для обработки деталей связана с объемом ванны  $V$  соотношением

$$J_T = V/v,$$

где  $v$  - удельный объем ванны. В зависимости от объема ванны удельный объем имеет следующие значения:

Объем ванны $V$ , м <sup>3</sup> . . . . .	1	1 ... 2,5	>2,5
Удельный объем $v$ , м <sup>3</sup> /А .	(0,5±0,6) × 10 <sup>-2</sup>	(0,3±0,35) × 10 <sup>-3</sup>	0,3 · 10 <sup>-3</sup>

При ЭХО в электролите происходит накопление продуктов обработки. При малых межэлектродных зазорах в загрязненном электролите между электродом-инструментом и деталью происходят пробой промежутка и короткое замыкание.

Очистка электролита может выполняться несколькими способами. Наиболее часто применяют отстой. Однако для ванн объемом  $V > 0,4 \dots 0,5$  м<sup>3</sup> отстой занимает слишком много времени и его используют в комбинации с другими способами: центрифугированием, очисткой пресс-фильтрами и вакуумными фильтрами, электрофлотацией или осаждением продуктов обработки с помощью коагуляторов.

Для отдельных станков и небольших участков (до трех-четырех станков) используют центрифугирование.

Характеристики центрифуг приведены в табл. 2.5.15.

## 2.5.15. Характеристики центрифуг

Тип	Оптимальная производительность, м <sup>3</sup> /ч	Эффективность, %	Мощность, кВт	Технологический ток, А	Габариты, мм
ОМД-802Н-1	0,8-1,0	80-90	4,5	До 5600	108×1240×1630
ОГШ-202К-3	0,8-1,0	70-80	5,5	До 5000	730×1085×1700
ОГШ-325К-1	1,8-2,0	80-90	7,5	До 15000	715×1095×1550

Центрифуги должны быть оснащены устройством для автоматической выгрузки отходов. Серийно выпускают отстойные центрифуги периодического действия типа ОМД, ОТН, шнековые осадительные центрифуги непрерывного действия типа ОГШ, НОГШ. Они обеспечивают очистку электролита в концентрации продукта обработки до 3 кг/м<sup>3</sup>. Если на участке работает более пяти станков, то целесообразно применять вакуумный фильтр. Вакуумные фильтры надежны в работе, позволяют получить отходы, пригодные для дальнейшей переработки: гидроксиды металлов, содержащиеся в продуктах обработки, успешно используются в качестве сырья для порошковой металлургии. Применение вакуумных фильтров позволяет создавать автоматические системы очистки электролита. Загрязненность электролита после очистки в таких устройствах не превышает 0,5 кг твердого вещества в 1 м<sup>3</sup> жидкости.

Пресс-фильтры представляют собой систему уловителей (фильтровальной ткани, бумаги), через которую под давлением прокачивают электролит. Такие агрегаты имеют высокую производительность, полностью механизированы, позволяют получить высокую чистоту электролита (содержание примесей 0,05 ... 5 кг/м<sup>3</sup>). К их недостаткам следует отнести большие габариты, необходимость замены фильтрующих элементов после их загрязнения.

Очистка электрофлотацией заключается в отделении продуктов обработки с помощью электрического поля, создаваемого в ванне, после чего продукты обработки вместе с частью электролита сливают в отстойник или центрифугируют. Процесс длится несколько десятков секунд. Способ позволяет получить электролит с загрязненностью в пределах 0,05 ... 0,2 кг/м<sup>3</sup>. К сожалению, этот способ недостаточно надежен и требует дополнительных затрат энергии на флотацию. Для удаления продуктов обработки используются химические вещества - коагуляторы, способствующие их переходу в нерастворимое состояние и выпадению в осадок. Коагуляторы вызывают появление пены, которая может

нарушать стабильность процесса анодного растворения, поэтому для больших ванн (объемом более 1 м<sup>3</sup>) их не используют. Электрохимические станки могут комплектоваться также тарельчатыми сепараторами, пластинчатыми отстойниками и другими устройствами для очистки электролитов.

## 2.5.5. УТИЛИЗАЦИЯ ШЛАМА

Утилизация вторичных продуктов ЭХО-шламов позволяет создать безотходные технологии и возвращать в сферу производства ценнейшее вторичное сырье. В результате может быть достигнут большой экономический эффект и эффект, связанный с улучшением экологии окружающей среды (ликвидация отвалов, улучшение воздушного бассейна и т.д.).

Шлам представляет собой смесь мелкодисперсных частиц, образующихся в процессе электрохимической обработки. Размер частиц обычно не превышает 1 мкм.

Химический состав шлама зависит от состава обрабатываемого сплава.

Основные компоненты никелевого шлама (никель, кобальт, железо) находятся в виде гидроокисей. Вольфрам и молибден при низких температурах в кислых электролитах весьма инертны, поэтому более вероятно, что они находятся в шламе в качестве металлов и частично в виде молибдена и вольфрамата натрия.

По данным рентгеноструктурного анализа шлама после ЭХО сплавов на основе алюминия в электролите на основе азотнокислотного натрия основными кристаллическими фазами в нем являются гидрат окиси алюминия и селитра.

По химическому составу исходный титановый шлам представляет собой окись титана. Определение кристаллической модификации окиси титана рентгеноструктурным анализом показало, что даже после проковки при 670 К окись титана находится в аморфном состоянии.

Утилизация шлама вызывает трудности, так как из-за его специфических свойств

обычные методы вторичной переработки металлов не дают удовлетворительных результатов. Осадок, получаемый при разделении суспензий, имеет очень низкое содержание основного металла (до 8 ... 10 %). Кроме того, высокое содержание влаги и соли в шламе исключает его прямую пирометаллургическую переработку, при которой происходит интенсивное и почти полное выгорание металла.

Утилизация возможна по двум типовым направлениям. Первое связано с окончательной переработкой шлама и выделением из него исходных металлов. Но оно может быть проведено только на специализированных заводах вторчермета.

В условиях машиностроительного завода может проводиться первичная обработка шлама, т.е. получение практически сухого обогащенного концентрата, свободного от хлористых и азотнокислотных соединений, удобного для транспортировки и пригодного для окончательной утилизации. При этом отходы сплавов на никелевой основе подвергаются первичной переработке путем растворения шлама в серной кислоте, фильтрации полученной суспензии, нейтрализации отфильтрованного раствора солей, повторной фильтрации, сушки осадка никелевого концентрата.

При выщелачивании 1 кг шлама расход серной кислоты составляет 275 г, расход воды 2 л. При нейтрализации расход соды 240 г, температура реакции 350 ... 360 К, сушка концентрата выполняется при температуре 470 К.

Для отходов сплавов на основе титана их подвергают предварительной сушке, высаливанию, фильтрации, сушке полученного концентрата.

Предварительная сушка исходного шлама выполняется при температуре 470 К, высаливание при соотношении жидкости к сухому осадку 50 : 1, отмывка при температуре 290 К, фильтрация, сушка готового продукта при температуре 470 К.

В случае переработки шламов по указанной технологии никель и титан на 90 ... 95 % извлекаются в концентрат. Относительная простота методов не требует специального дорогостоящего оборудования. Содержание никеля в получаемом концентрате повышается до 40 ... 45 % против 10 % в исходном шламе. Содержание двуокиси титана возрастает до 30 ... 35 % против 5 % исходных, концентраты не содержат вредных хлорных соединений и имеют низкую влажность.

Другим направлением утилизации шлама является его использование в качестве сырьевых компонентов при изготовлении красок, различных паст, абразивов, шлакосо-

таллов для гражданского и промышленного строительства, производства бетона, изделий стекольной промышленности. При этом в ряде случаев возможно применение необогащенного влажного шлама, неотмытого от ионов хлора и натрия, что облегчает процесс утилизации и представляет практический интерес для производства. Шлам обычно проходит фильтрацию на фильтр-прессах, высушивается на воздухе или при 370 К, затаривается и отправляется на вторичную переработку.

В качестве добавок при получении чистящих средств используется шлам алюминиевых сплавов (до 5 ... 10 % по объему).

Шлам после электрохимической обработки хромоникелевых сплавов направляется на металлургические заводы для вторичного переплава.

Шлам из титановых материалов является прекрасным сырьевым материалом для получения титановых белил в лакокрасочной промышленности и для выпуска новых видов абразивных материалов - легированных электрокорундов.

Применение титанового шлама (в количестве 3 ... 6 %) позволяет наладить производство бесфтористых шлакоситаллов. Его использование позволяет заменить кремнефтористый натрий, что снимает выделение вредных газообразных примесей и значительно улучшает экологию окружающей среды. Шлакоситаллы позволяют получить качественные облицовочные материалы, обладающие высокими декоративными свойствами после шлифования и полирования. Они применяются для облицовки внутренних и наружных частей зданий, покрытий для полов, футеровки емкостей в химической, угольной, горнорудной промышленности. По внешнему виду и физико-химическим свойствам созданные составы близки к природным облицовочным материалам (граниту и мрамору), но дешевле их в 2-3 раза.

#### 2.5.6. УЧАСТКИ И ЦЕХА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Станки для ЭХО состоят из автономных блоков (источника питания, ванны, насоса, агрегата очистки электролита и др.), которые можно установить в различных помещениях. Желательно изолировать источники питания, системы регулирования и другие блоки, содержащие электронные схемы, от гидравлических агрегатов, так как под действием влаги и паров электролита электрические цепи могут выйти из строя.

Используется несколько вариантов размещения оборудования.

*1 вариант.* При включении электрохимических станков в поточную линию их уста-

навливают в цехе между станками для механической обработки по ходу технологического процесса. Такой вариант позволяет сократить транспортные расходы на перевозку заготовок, снизить площади под оборудование, сократить потери энергии в линиях подачи тока и электролита. К недостаткам этого варианта следует отнести пониженную надежность работы электронных устройств станков, опасность коррозии соседнего оборудования и деталей при попадании на них электролита, сложность систем вентиляции. Кроме того, возможно попадание в линии и источники питания стружки от близрасположенного механического оборудования, что может вызвать короткие замыкания и выход станков из строя.

**2 вариант.** Размещая единственный станок в отдельное помещение, удастся предельно сократить длину линии для подвода тока и электролита. Схема такой планировки приведена на рис. 2.5.7.

Около механической части 4 установлены насос 3, ванна 5 для электролита, центрифуга 6, источник питания 7, промывочные ванны 1, пульт управления 2, стеллаж 9 для электродов и другой оснастки, электрошкаф 8 станка.

Помещение следует оборудовать инженерными коммуникациями: подвести воду к ваннам и к системе охлаждения источника питания, предусмотреть стоки для слива электролита и воды, подвести сжатый воздух. Стены и пол помещения облицовывают плиткой, предусмотрев для пола уклоны, необходимые для стекания жидкостей в канализацию. Следует также установить вытяжной вентилятор, отсасывающий газообразные продукты обработки из ванны с электролитом и помещения.

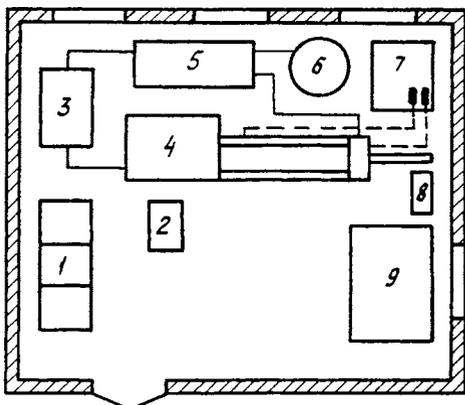


Рис. 2.5.7. Схема размещения единичного станка в отдельном помещении

**3 вариант.** Размещение группы станков с установкой в отдельное помещение агрегатов подачи и очистки электролита (рис. 2.5.8).

В машинном зале 1 установлено несколько электрохимических станков 1 с источниками питания 2, стеллажи для оснастки 3, промывочные ванны 4. В электролитной II, отделенной стенкой, размещены ванна 5 с электролитом, насосы 6, смеситель 7 для регулирования состава электролита, агрегат 8 очистки электролита, емкости 9 для хранения химических компонентов электролита.

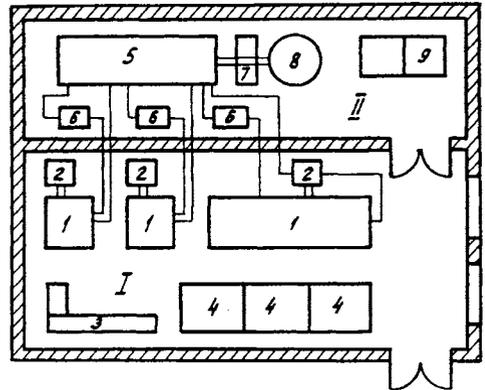


Рис. 2.5.8. Схема размещения группы станков в помещениях

Инженерные коммуникации аналогичны варианту 2. Приведенная планировка позволяет снизить уровень шума в машинном зале, поскольку насосы и агрегаты очистки электролита вынесены в другое помещение. При этом машинный зал не загрязнен химикатами и растворами.

**4 вариант.** Если в цехе расположены десятки станков, то электролитную целесообразно разместить в изолированном помещении. При этом удастся использовать большие емкости для хранения электролита, организовать совершенную систему его очистки, выполнять ремонт оборудования без остановки участка. Применение больших емкостей позволяет стабилизировать температуру, степень загрязнения и засащивания электролита.

Среди других вариантов известно централизованное размещение агрегатов для очистки электролита, который поступает по трубам от нескольких участков или цехов с электрохимическими станками.

Площадь, которую необходимо предусмотреть для установки каждой единицы оборудования, составляет для станков с неподвижными электродами 5 ... 12 м<sup>2</sup>, для прошивочных - 15 ... 50 м<sup>2</sup>, для станков для точения - 10 ... 18 м<sup>2</sup>, протягивания - 16 ... 30 м<sup>2</sup>, разрезания и шлифования - 12 ... 25 м<sup>2</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Житников В.П., Зайцев А.Н.** Математическое моделирование электрохимической размерной обработки. Уфа: УГАТУ. 1996. 222 с.
2. **Комбинированные** методы обработки / Под ред. В.П. Смоленцева. Воронеж: ВГТУ. 1996. 69 с.
3. **Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов** / М.В. Щербак, М.А. Толстая, А.П. Анисимов, В.Х. Постановов. М.: Машиностроение. 1981. 263 с.
4. **Основы повышения точности электрохимического формообразования** / Ю.Н. Петров, Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман, Б.П. Саушкин. Кишинев: Штиинца. 1977. 152 с.
5. **Румянцев Е.М., Давыдов А.Д.** Технология электрохимической обработки металлов. М.: Высш. шк. 1984. 159 с.
6. **Седыкин Ф.В.** Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение. 1976. 302 с.
7. **Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Садыков З.Б.** Электрохимическое маркирование деталей. М.: Машиностроение. 1983. 72 с.
8. **Смоленцев В.П.** Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей. М.: Машиностроение. 1978. 176 с.
9. **Справочник** по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение. 1988. 719 с.
10. **Технология и экономика электрохимической обработки** / В.В. Любимов и др. М.: Машиностроение. 1980. 192 с.
11. **Технология электрохимической обработки деталей в авиационной промышленности** / В.А. Шманев, В.Г. Филимошин, А.Х. Каримов и др. М.: Машиностроение. 1986. 168 с.
12. **Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов.** Т. 1 / Под ред. В.П. Смоленцева, М.: Высш. школа. 1983. 247 с.

## Глава 2.6

## ЛАЗЕРНЫЕ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

## 2.6.1. ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА

Громадная концентрация энергии лазерного излучения, существенно превосходящая другие источники нагрева, позволяет не только увеличить производительность обработки, но и получать принципиально новые результаты.

Лазерная резка материалов осуществляется тепловым воздействием излучения, вызывающего процессы испарения материала, плавления и удаления расплава из зоны реза, химические реакции горения и термодеструкции и др.

Процесс лазерной резки металлов в режиме испарения проводится с высокими плотностями мощности излучения, достигающими порядка  $10^7 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и обеспечивающими интенсивное испарение металла в зоне действия луча и последующее удаление продуктов реза в виде пара или конденсата. Этот процесс обеспечивается импульсно-периодическими лазерами.

Доля жидкой фазы в канале реза незначительна, так как высокие плотности мощности излучения обеспечивают быстрый нагрев обрабатываемого участка до температуры кипения. Вследствие этого обеспечивается высокое качество поверхностей реза. Однако лазерная резка металлов в режиме испарения требует большого энергетического вклада и не обеспечивает высокой производительности процесса. В связи с этим резка металлов в режиме испарения не находит широкого самостоятельного применения, но может оказаться перспективным процессом в сочетании с лазерной резкой плавлением при резке по сложным криволинейным контурам. В этом случае резка с малой кривизной проводится на высокопроизводительном режиме плавления с использованием непрерывного излучения, а на участках с большой кривизной рез осуществляется в режиме испарения и с использованием импульсно-периодического излучения.

Для осуществления резки ряда неметаллических материалов органического происхождения (пластмассы, полимерные пленки, ткани и др.) в режиме испарения требуются значительно меньшие плотности мощности (порядка  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>), что позволяет эффективно применять для их резки непрерывное излучение.

Наиболее широкое применение в промышленности находит лазерная резка металлов в режиме плавления и удаления расплава из зоны реза. Получение глубоких резов сопряжено с образованием достаточно большого количества расплава. Действие избыточного давления паров оказывается недостаточным для полного удаления расплава из зоны воздействия лазерного излучения. В этом случае сквозной рез может заплываться, поэтому для эвакуации расплава используют дополнительную струю газа, подаваемого коаксиально излучению в зону обработки.

В отличие от резки в режиме испарения лазерная резка с плавлением и выдуванием

расплава требует на порядок меньшего энергетического вклада.

При использовании вместо инертного газа какого-либо активного газа (кислород и др.) и при достижении температуры горения материала появляется дополнительный источник нагрева в результате протекания экзотермической реакции. Кроме того, струя кислорода способствует предварительному окислению металла и снижению отражательной способности, а также выполняет гидродинамическую функцию по очистке зоны резания. Энергетические затраты процесса лазерной резки в струе активного газа приблизительно в два раза меньше, чем при резке в инертном газе.

На процесс газолазерной резки большое влияние оказывают свойства металлов. Применение струй кислорода при резке углеродистых и коррозионно-стойких сталей значительно эффективнее по сравнению с использованием инертного газа либо воздуха; в частности, при этом существенно увеличивается глубина реза.

При газолазерной резке титановых сплавов необходимо учитывать, что активная реакция окисления при воздействии кислорода на расплавленный металл интенсивно развивается не только в направлении резки, но и в сторону. Тем самым значительно увеличивается ширина реза. Лучшие результаты по качеству реза получаются при использовании инертных газов (аргон, гелий) или сжатого воздуха.

Резка металлов с высокой теплопроводностью представляет определенную трудность.

Поверхность сплавов алюминия покрыта пленкой окисла с высокой температурой плавления, поэтому требуется более высокая плотность мощности по сравнению с резкой стали. Еще большая плотность мощности при прочих равных условиях требуется для резки сплавов меди, обладающих высокой теплопроводностью.

Результаты исследований качественных показателей процесса газолазерной резки показывают, что ширина реза практически не зависит от рода металла и давления режущего газа и уменьшается с увеличением скорости резки.

Важным показателем качества резки является шероховатость поверхности реза Rz. Величина Rz около верхней кромки реза почти не зависит от толщины разрезаемого металла. При резке пластин, толщиной менее 2 мм, Rz практически не изменяется по толщине. Однако с увеличением толщины Rz нижней кромки значительно выше, чем верхней. Минимальная шероховатость, обеспечивающая качественный рез, достигается при оптимальных скоростях обработки. Скорость обработки для получения качественных резов ( $Rz < 40$  мкм) значительно ниже максимальных значений для достижений глубокого реза с низким качеством.

Для получения высококачественных резов с отсутствием грат необходимо строго соблюдать оптимальные параметры режимов газолазерной резки. В табл. 2.6.1 приведены оптимальные режимы и параметры лазерной резки материалов.

2.6.1. Параметры и режимы лазерной резки материалов

Материал	Толщина, мм	Тип лазера	Мощность, Вт	Скорость, м/мин	Ширина реза, мм	Газ	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
Низкоуглеродистые стали	1	CO <sub>2</sub>	450	2 - 3	0,2-0,3	O <sub>2</sub>	—
	5	CO <sub>2</sub>	800	2 - 2,5	0,2-0,5	O <sub>2</sub>	
	10	CO <sub>2</sub>	800	1	—	O <sub>2</sub>	
	2	CO <sub>2</sub>	2000	5 - 7	—	N <sub>2</sub>	
	2	АИГ-неп	120	0,8	0,18	O <sub>2</sub>	
	2,2	CO <sub>2</sub>	900	4,0	0,44	O <sub>2</sub>	
	2,2	CO <sub>2</sub>	900	5,0	0,43	O <sub>2</sub>	Хорошее качество, высокая производительность
Коррозионно-стойкие стали	2,5	CO <sub>2</sub>	1000	3,8	0,3	O <sub>2</sub>	F <sub>и</sub> = 10 Гц; F <sub>и</sub> - частота
	9	CO <sub>2</sub>	800	0,3 - 0,4	—	O <sub>2</sub>	
	4	АИГ-имп	100 (средняя)	0,1	0,5	O <sub>2</sub>	

Продолжение табл. 2.6.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Титан	2	CO <sub>2</sub>	900	1,4	0,4	Ag	—
	1,2	CO <sub>2</sub>	2000	12	—	Воздух	—
Сплавы алюминия	2	CO <sub>2</sub>	900	0,2	0,38	O <sub>2</sub>	—
	5	CO <sub>2</sub>	3000	1,4	0,5	N <sub>2</sub>	—
Медь	0,6	АИГ-имп	100 (средняя)	0,1	0,5	O <sub>2</sub>	$F_{и} = 10$ Гц
Латунь	1,3	АИГ-имп	100 (средняя)	0,1	0,5	O <sub>2</sub>	$F_{и} = 10$ Гц
Никель	1,0	CO <sub>2</sub>	2000	7,9	—	O <sub>2</sub>	—
Молибден	4,0	CO <sub>2</sub>	4000	0,5	—	O <sub>2</sub>	—
Вольфрам	3	CO <sub>2</sub>	4000	0,3	—	O <sub>2</sub>	—
Плексиглас	10	CO <sub>2</sub>	900	3,5	0,6	N <sub>2</sub>	—
	30	CO <sub>2</sub>	900	0,5	1,0	N <sub>2</sub>	—
Фанера	7	CO <sub>2</sub>	850	5,2	0,8	N <sub>2</sub>	—
Стекло-текстолит	10	CO <sub>2</sub>	2000	0,7	0,4	CO <sub>2</sub>	—
	2	CO <sub>2</sub>	1000	1,5	0,2	CO <sub>2</sub>	—
Асбоцемент	5	CO <sub>2</sub>	500	0,05	0,5	N <sub>2</sub>	—
Стекло	4	CO <sub>2</sub>	400	0,8	—	Воздух	—
Кварц	4	CO <sub>2</sub>	200	2,5	0,1	Воздух	—
Резина	3	CO <sub>2</sub>	200	1,2	—	N <sub>2</sub>	—
Текстиль	0,5	CO <sub>2</sub>	200	15-30	0,2-0,4	N <sub>2</sub>	—
Кожа	1,5	CO <sub>2</sub>	200	10-15	0,2-0,4	N <sub>2</sub>	—

Дальнейшее повышение плотности мощности лазерного излучения обеспечивает при резке металла увеличение глубины реза и снижение его ширины. С этой целью рекомендуются лазерные установки с минимально возможным диаметром луча на выходе из резонатора, работающие в одномодовом режиме генерации излучения.

Неметаллические материалы, резка которых может быть выполнена лазерным излучением, разделяются на две группы:

1) материалы, в которых под действием лазерного излучения происходит термическая деструкция: пластмассы, дерево, текстиль, кожа, бумага, резина и др.; эти материалы могут быть разрезаны лазерным лучом без использования дополнительного поддува газа;

2) материалы, которые под действием лазерного излучения расплавляются: горные породы, керамика, стекло и др. В этом случае для удаления расплава в зону обработки необходимо подавать газ.

Энергоемкость лазерной резки материалов первой группы, как правило, меньше, чем второй. Однако ряд слоистых пластиков со связующей в виде терморезистивных смол требуют значительно больших энергозатрат по сравнению с термопластами и даже с металлами. Это объясняется образованием эрозивного факела, экранирующего лазерное излучение, а также разложением реактопластов с образованием коксового остатка (свободного углерода), для испарения которого требуется существенный энергозатрат.

Хорошие результаты обеспечивает лазерная резка кварцевого стекла, заключающаяся в возгонке окиси кремния при температуре, близкой к температуре плавления стекла. Поверхности реза отличаются высоким качеством.

Резка обычного стекла вызывает некоторое затруднение. Для предотвращения трещин резка осуществляется на оптимальных режимах; также рекомендуется дополнительный нагрев стекла до температур порядка 600 °С.

Показатели качества поверхности при резке неметаллов существенно выше, чем при резке металлов. В частности, шероховатость поверхности реза на древесине и изготовленных на ее основе слоистых клеенных материалов находится на уровне  $Rz = 0,1 \dots 1,6$  мкм. Стенки при резке термопластичных материалов (плексиглас, винипласт) представляют собой полированные поверхности.

Характерные режимы газолазерной резки ряда неметаллических материалов, обеспечивающих сочетание высокого качества поверхности реза и высокой производительности процесса, приведены в табл. 2.6.1.

Газолазерная резка обеспечивает эффективные результаты, экономически оправданные при резании металлов толщиной до 10 мм и неметаллических материалов толщиной до 40 ... 50 мм. Наиболее перспективно использование этого процесса при вырезке небольших партий деталей сложной конфигурации.

Широкое практическое применение газолазерной резки обуславливает необходимость промышленного выпуска автоматизированных лазерных технологических комплексов, включающих наряду с надежным лазерным излучателем технологическую оснастку с автоматизированной системой управления и компьютерным устройством.

### 2.6.2. ЛАЗЕРНАЯ ПЕРФОРАЦИЯ ОТВЕРСТИЙ

Выполнение отверстий диаметром до 1 ... 3 мм традиционным сверлением связано с определенными трудностями вследствие частой замены инструмента, дефицитностью сверл малого диаметра, сложностью их заточки. Особого усложняется эта задача при выполнении отверстий в труднообрабатываемых материалах.

Для изготовления отверстий малых диаметров значительный интерес представляют электроэрозионная, электрохимическая, ультразвуковая и электронно-лучевая обработка, но эти методы не обеспечивают высокой производительности процесса. Лазерная обработка отверстий является более производительным процессом, хотя по удельному расходу энергии она превышает механические и электрофизические методы.

При воздействии лазерного излучения в виде отдельного импульса образование отверстия происходит за счет плавления и испарения материала. Большое значение в формировании отверстий при обработке плавящихся материалов единичным импульсом имеет перераспределение жидкой фазы до момента затвердевания. В результате этого форма отверстия может значительно отличаться от той, которая в момент окончания импульса опре-

делялась геометрией луча, кинетикой испарения и гидродинамикой выброса части материала в жидкой фазе. Образование большого объема жидкой фазы и ее неполное удаление из отверстия являются, как правило, неблагоприятными и трудноуправляемыми факторами, существенно снижающими эффективность и точность сверления единичным импульсом лазерного излучения. С этой точки зрения высокое качество отверстий обеспечивается при сверлении испаряющихся (сублимирующихся, возгоняющихся) неметаллов, при разрушении которых под действием лазерного излучения жидкая фаза практически отсутствует.

Основным методом повышения точности и качества лазерной размерной обработки является многоимпульсная обработка материалов (МИО). Сущность МИО заключается в том, что отверстия формируются за серию импульсов излучения лазера определенной энергии и длительности, последовательно доводящих размеры отверстий до необходимых.

При многоимпульсной обработке отверстие растет в глубину постепенно за счет послойного испарения материала каждым импульсом. Окончательная глубина отверстия в этом случае определяется суммарной энергией серии импульсов, а его диаметр — усредненными параметрами отдельного импульса излучения в серии. Кроме того, диаметр отверстия зависит от размера светового пятна в зоне обработки и формы каустики.

Толщина снимаемого каждым импульсом слоя может быть достаточно малой, поэтому при обработке сравнительно глубоких отверстий ( $h > 1$  мм) процессы истечения и перераспределения жидкой фазы в меньшей степени влияют на форму отверстий, чем в случае получения отверстий одним импульсом.

Многоимпульсная обработка позволяет получать отверстия серий коротких импульсов, период следования которых значительно больше времени остывания материала. В этом случае характерный размер зоны термического влияния определяется длительностью отдельного короткого импульса. Осуществляя импульс с высокой плотностью энергии излучения, можно добиться резкого снижения доли расплава в продуктах разрушения.

Использование для МИО импульсов малой длительности позволяет получать отверстия в хрупких материалах без их растрескивания, что обусловлено более равномерным (по отношению к одноимпульсной обработке) распределением остаточных напряжений по толщине материала, а также ростом динамической прочности при уменьшении продолжительности термического удара.

МИО используется для решения двух различных технологических задач: получения отверстий с  $h > 2$  мм особо жестких требований к их точности и получения высокоточных отверстий.

МИО в этих случаях различаются в основном режимами обработки. Если первому из них соответствует получение в каждом импульсе максимального приращения глубины к диаметру ( $h/d > 1$ ), то во втором случае наиболее благоприятным режимом является такой, когда приращение глубины лунки за импульс меньше диаметра ( $h/d < 1$ ). В результате, в первом случае обработка проводится при сравнительно большом удельном выносе, причем диаметр отверстия формируется уже в первом импульсе, а последующие импульсы лишь углубляют отверстие, незначительно изменяя диаметр. Во втором случае обработка проводится при небольшом удельном выносе в режиме нестационарного испарения вещества, когда количество образующегося на стенках расплава можно сделать минимальным, устранив или уменьшив действие многих неблагоприятных факторов: тепловода в стенке, расфокусировки пучка, чрезмерной длительности импульса.

Если обработка ведется в цилиндрической световой трубке, в которую вырывается световой конус при  $\text{tg}(\varphi/2) = 0$ , то дополнительно исключается оплавление стенок за счет непосредственного поглощения ими лазерного излучения. В итоге продукты разрушения будут в минимальной степени участвовать в формировании отверстия. Тем самым создаются все предпосылки для получения точных отверстий, размеры которых определяются и регулируются параметрами оптической системы и излучения.

При получении глубоких отверстий в режиме многоимпульсной обработки основными факторами, влияющими на соотношение глубины и диаметра отверстия, являются величина  $\text{tg}(\varphi/2)$ , характеризующая ход каустики после фокальной плоскости оптической системы, и количество импульсов в серии  $n$ , необходимое для получения заданных размеров отверстия. При значениях глубины отверстия больше диаметра отверстия ( $h > d$ ) относительная глубина отверстия

$$\frac{h}{d_{\text{отв}}} = \frac{1}{2 \text{tg}(\varphi/2)} n^{1/3}.$$

Для определения предельной глубины сверления лазерным излучением можно в первом приближении воспользоваться формулой

$$h_{\text{max}} \approx \frac{r_f}{\text{tg}(\varphi/2)} \left( \frac{E_f}{E_n} \right)^{1/2},$$

где  $r_f$  - радиус лунки на поверхности образца,  $\varphi$  - угол раствора;  $E_f$  - плотность мощности импульса излучения;  $E_n$  - пороговая плотность мощности.

Плотность мощности  $E_f$  можно выразить через энергию в импульсе  $w$  и длительность импульса  $\tau_n$ :

$$E_f = \frac{\bar{w}}{\pi r_f^2 \tau_n}.$$

Пороговая плотность мощности  $E_n$  определяется из условия закипания поверхности материала:

$$E_n = (c\rho) T_n \left( \frac{\alpha}{\tau_n} \right)^{1/2},$$

где  $(c\rho)$  - коэффициент объемной теплоемкости материала;  $c$  - абсолютная теплоемкость;  $\rho$  - плотность материала;  $T_n$  - температура испарения материала;  $\alpha$  - температуропроводность материала.

При уменьшении длительности импульса, но при постоянной энергии,  $E_f$  растет быстрее  $E_n$ , поэтому максимальное значение глубины отверстия увеличивается. Если уменьшать одновременно энергию и длительность импульса так, что мощность в импульсе остается постоянной, то в этом случае  $E_f$  не изменяется, а  $E_n$  растет и, следовательно,  $h_{\text{max}}$  падает.

На практике для повышения производительности процесса импульсы излучения необходимо повторять с достаточно высокой частотой. В случае, если средняя мощность излучения, вводимая в материал, оказывается достаточно высокой, взаимное влияние импульса будет велико. Прежде всего это приведет к повышению температуры образца вблизи возникающего отверстия. При большой частоте повторения поверхность лунки во время паузы не успевает остыть, поэтому нагрев стенок отверстия в каждом импульсе происходит от температуры, большей, чем при нормальных условиях. Очевидно, что при любом механизме разрушения повышение температуры должно приводить к росту глубины отверстия с увеличением частоты при одинаковой полной энергии. С ростом частоты эффект взаимного влияния импульсов проявляется прежде всего вблизи дна, где тепловыделение максимально. На стенках же такое влияние оказывается слабее. Вследствие этого материал, удаляемый со дна лунки, частично задерживается на боковых стенках и

объем удаляемого материала с увеличением частоты растет медленнее, чем глубина отверстия.

Несколько иной подход к выбору параметров режима лазерной обработки при получении прецизионных отверстий. Оптимальный режим при высокоточной обработке материала должен обеспечивать минимальное оплавление стенок и дна отверстия в процессе его получения. Это возможно при выполнении следующих двух условий, которые определяют область допустимых режимов обработки:

$$\tau_n \leq r_f^2 / \alpha; \quad h(\tau_n) \leq 2r_f.$$

Первое условие означает, что в течение импульса мал боковой теплоотвод, т. е. значительно уменьшено оплавление стенок за счет теплопроводности. Второе условие накладывает ограничение на действие остальных факторов, способствующих образованию жидкой фазы.

Плотность мощности импульса лазерного излучения, необходимая для реализации прецизионного режима многоимпульсной обработки:

$$E_f = v_n L_n \rho \approx \frac{2L_n \alpha \rho}{r_f} \left( 1 + 3 \ln^{-1} \frac{c_{зв} r_f}{7a} \right),$$

где  $v_n$  - скорость испарения материала;  $L_n$  - скрытая теплота испарения;  $\rho$  - плотность материала;  $c_{зв}$  - средняя скорость звука в твердом теле.

Зная  $E_f$ , легко определить остальные параметры режима обработки: длительность импульса  $\tau_n = r_f^2 / \alpha$ ; энергию излучения в импульсе  $\bar{w}_n = \pi r_f^2 E_f \tau_n$  и число импульсов  $n$  в серии для формирования отверстия глубиной  $h$ :  $n = h / (2r_f)$ .

Значительное влияние на геометрию отверстия, а также на характер разрушения материала оказывают условия фокусировки излучения. В сходящемся световом пучке характерным является конический профиль отверстия, а в расходящемся - цилиндрический. За счет неравномерности распределения излучения по сечению светового пятна и во времени в течение импульса, а также вследствие теплопроводности и гидродинамических явлений, профиль отверстия, задаваемый ходом лучей, искажается. В частности, появляется характерная воронка на входе и плавный переход от дна к стенкам, а при больших расфокусировках профиль отверстия становится параболическим.

Степень фокусировки, соответствующая наибольшей глубине и наименьшему диаметру, различна. Наибольшая глубина отверстий достигается при фокусировке лазерного луча на некоторое расстояние вглубь от поверхности материала. Наименьший диаметр обеспечивается при размещении фокальной плоскости на поверхности обрабатываемого материала.

Если бы механизмом разрушения было испарение вещества, то условия получения отверстия максимальной глубины  $h_{max}$  за один импульс с энергией  $w_n$  и длительностью  $\tau_n$  соответствовали бы фокусировке излучения на поверхность обрабатываемой детали, обеспечивая минимальный диаметр лунки. Наличие оплавления стенок в расходящемся пучке изменяет условия оптимальной фокусировки излучения таким образом, что для получения максимальной глубины требуется сфокусировать лазерный пучок на некотором расстоянии  $l_0$  от поверхности вблизи материала.

Смещение фокуса  $l_0$  зависит не только от параметров фокусирующей системы, но и от диаметра лазерного пучка на выходном зеркале лазера  $d$ , его расходимости  $\theta$  и расстояния  $z_0$  от выходного зеркала. При удалении линзы от лазера (или уменьшении выходной апертуры пучка) глубина отверстия может значительно увеличиться при оптимальном смещении фокуса линзы по сравнению с глубиной, обеспечиваемой при фокусировке на поверхность материала.

При использовании многоимпульсного метода обработки за счет того, что импульсы в серии разделены временными интервалами, реализуется возможность изменения взаимного расположения обрабатываемой детали и фокусирующей оптической системы в процессе получения одного отверстия. При относительном смещении оптической системы и образца перед очередным импульсом на величину, равную толщине слоя, испаренного за предыдущий импульс, плотность мощности лазерного излучения на движущейся границе испарения по всей глубине отверстия сохраняется практически постоянной. Такое смещение можно проводить и непрерывно, согласуя скорость движения с частотой следования импульсов.

Прежде чем применять лазерную технологию обработки отверстий в том или ином частном случае, необходимо решить:

можно ли получить требуемые отверстия традиционными способами?

в чем будут сказываться преимущества применения лазера: в уменьшении стоимости изделий, в качестве, надежности, универсальности и т. д.?

можно ли осуществить эту операцию в рамках современной лазерной технологии?

Лазерная обработка применяется главным образом для получения отверстий диаметром до 0,5 мм и глубиной до 5 мм. Применение многоимпульсной обработки (МИО) позволяет расширить технологические возможности лазерной прошивки и получить отверстия с соотношением  $h/d_{\text{отв}}$  до 50. Кроме того, правильный выбор режимов обработки позволяет перейти от получения черновых отверстий к получению чистовых, точность размеров и формы которых достигают 7-го качества.

С помощью рубинового лазера можно пробивать в керамике, кремнии, германии

отверстия диаметром 10 ... 100 мкм с соотношением  $h/d_{\text{отв}} = 20 \dots 50$ . Такое отношение выше достижимых отношений при изготовлении отверстий малого диаметра в керамике обычными методами.

Применение МИО обеспечивает: получение отверстий диаметром 50 мкм в ситалловых подложках интегральных схем толщиной 0,6 мм для осуществления монтажа; получение отверстий в изолирующих керамических прокладках для прецизионных коаксиальных кабелей.

Параметры отверстий, полученных методом МИО в некоторых материалах, и использованные режимы обработки представлены в табл. 2.6.2.

2.6.2. Параметры отверстий и режимы МИО

Материал	Параметры отверстия				Режимы обработки			
	$d_{\text{отв}}$ , мкм	$h$ , мм	$h/d_{\text{отв}}$	Допуск на $d$ , мкм	$w$ , Дж	$\tau_{\text{и}} \cdot 10^4$ , с	$E_{\text{ф}}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$n$
Керамика	200	3,2	16	—	1,4	5	$4 \cdot 10^6$	40
	200	1,0	5	+30	1,6	10	$5 \cdot 10^6$	1
Рубин	10	0,4	40	—	0,1	Модуляция добротности	—	—
Ситалл	50	0,6	12	—	0,3	1	$5 \cdot 10^7$	3-5

Наиболее широкое применение многоимпульсный метод обработки отверстий лазерным излучением нашел в производстве алмазных волок и часовых камней. Использование лазерной технологии в этих областях носит массовый характер.

Для волочения проволоки диаметром от 10 мкм до 1,2 мм применяются волоки из природных и синтетических алмазов. Их стойкость превышает стойкость волок из твердых сплавов. Это делает возможным получение проволоки с более жесткими допусками, повышает скорость волочения, позволяет снизить расход сырья. Волочение проволоки диаметром менее 0,2 мм возможно только с помощью алмазных волок. Низкая стойкость волок из других материалов не обеспечивает нормального ведения процесса в производстве такой проволоки.

В производстве алмазных волок значительную часть трудоемкости их изготовления составляет получение отверстий.

Одна из методик обработки алмазов предусматривает их предварительное закрепление в окончательной оправке. Это позволяет с высокой производительностью получать сквозные черновые отверстия диаметром от 100 мкм до 1,5 мм в алмазах толщиной

1,5 ... 3,0 мм с небольшим риском раскалывания кристаллов. Недостатками такого подхода являются невозможность контроля профиля отверстия и большие припуски на окончательную обработку. Это не дает возможности получать отверстия диаметром менее 100 мкм, хотя волоки с такими отверстиями составляют основную массу волок, потребляемых промышленностью.

Получило также распространение лазерная обработка алмазных волок, не закрепленных в оправке. Этот метод позволяет осуществлять непрерывный контроль за формированием отверстия в процессе его обработки при любых диаметрах, вплоть до нескольких микрометров. Непрерывный контроль в процессе лазерной обработки обеспечивает наибольшую точность и делает возможным оставлять минимальные припуски на окончательную обработку отверстия.

Отверстие алмазной волоки имеет сложную форму и состоит из входной распушки, смазочного конуса, рабочего канала и выходной распушки. Заготовка волоки представляет собой кристалл алмаза массой 0,1–4 карат.

Перед лазерной обработкой кристалл подвергают огранке так, чтобы получить две параллельные грани, перпендикулярные оси

будущего отверстия, и одну грань, параллельную этой оси, для визуального контроля формы отверстия в процессе обработки.

Обработку отверстия осуществляют по-операционно, комбинируя с ультразвуковой обработкой. Ввиду хрупкости алмаза сверление ведут многоимпульсным методом. Вследствие большого коэффициента поглощения материала пластины для начала ее обработки требуется значительно меньшая энергия излучения, чем для начала обработки алмаза. Так, в зоне обработки пластины развивается высокая температура, контактирующий с ней участок поверхности алмаза графитизируется и начинает эффективно поглощать излучение. В результате образуется начальная лунка будущего отверстия. Для получения начального отверстия требуется один импульс с энергией 0,5 Дж. Применение пластины из хорошо поглощающего материала позволяет значительно снизить пороговую энергию обработки алмаза, что предотвращает его раскалывание.

После обработки начальной лунки кристалл переворачивают и обрабатывают входную распушку и смазочный конус. Обработку ведут импульсами с энергией 0,1 ... 1 Дж (в зависимости от размеров кристалла) при частоте следования 1 Гц с одновременным вращением кристалла со скоростью 10 ... 20 мин<sup>-1</sup>. На этой операции применяют плоскосферический резонатор и объектив с фокусным расстоянием 38 мм. Обработку ведут без телескопической системы.

Контролируя форму отверстия с помощью бокового микроскопа, сначала углубляют начальную лунку, затем смещают луч и ведут обработку по окружности, постепенно увеличивая ее радиус и глубину отверстия. Для образования входной распушки и смазочного конуса общей глубиной 0,7 мм и с входным диаметром 0,6 мм требуется 50 ... 100 импульсов.

Далее с помощью ультразвукового инструмента проводят чистовую обработку входной распушки и смазочного конуса. Затем сверлят рабочий канал. Его обработку осуществляют при плоских зеркалах резонатора с применением телескопической системы и объектива с фокусным расстоянием 24 мм. Для сверления рабочего канала диаметром 0,05 мм и глубиной 0,15 ... 0,2 мм обычно требуется 1–2 импульса с энергией 0,3 ... 0,5 Дж.

После обработки рабочего канала кристалл переворачивают и проводят обработку выходной распушки. Заключительными операциями являются обработка выходной распушки и рабочего канала ультразвуковым инструментом и полирование рабочего канала.

Возможности повышения производительности сверления часовых камней механическими методами в настоящее время практически исчерпаны. Перспективным в этом направлении оказалось применение лазеров.

На одно отверстие диаметром 0,05 ... 0,08 мм в рубиновой заготовке часового камня толщиной 0,45 мм требуется четыре-пять импульсов энергией 0,2 ... 0,3 Дж при частоте следования 5 Гц и семь-восемь импульсов с энергией около 0,1 Дж при частоте следования 10 Гц. Смена заготовки на рабочей позиции осуществляется автоматически подавателем за время около 0,2 с, в течение которого излучение автоматически перекрывается затвором с электромагнитным приводом. Производительность установки — один камень в секунду. Многоимпульсный метод позволил полностью исключить раскалывание заготовок в процессе обработки и обеспечил высокую точность и воспроизводимость размеров отверстий. Глубина структурно измененной зоны вблизи стенок отверстия не превышает 1 ... 2 мкм, что позволяет оставлять минимальный припуск на чистовую обработку.

Лазеры также используются для прошивки отверстий в пластике, предназначенном для обшивки стен в салонах самолетов, для перфорирования бумаги, в целях более легкого ее разделения, для сверления дозирующих отверстий в аэрозольных соплах. Одноимпульсная обработка применяется для получения системы отверстий:

- в пластмассовых деталях теплообменных установок, трубах противопожарной системы и системы антиобледенения самолета и для разбрызгивания воды;

- в полиэтиленовых пакетах медицинской промышленности;

- в контактных линзах, изготовленных из полиметилметакрилата.

Многоимпульсная обработка кроме перечисленных выше случаев применяется для получения:

- системы отверстий в платах печатного монтажа, изготавливаемых из фольгированного стеклотекстолита и гетинакса;

- отверстий связи в оптических элементах (призмы, линзы, зеркала);

- наклонных отверстий в смотровых люках из стекла, кварца, сапфира.

### 2.6.3. ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ

При воздействии на материалы концентрированным потоком лазерного излучения возникающее температурное поле характеризуется высокими градиентами. Вследствие этого в зоне воздействия развиваются значительные напряжения, вызванные крайне не-

равномерным распределением температур. Если значения напряжений в локальном объеме достигнут предела прочности, то в материале возникают трещины, которые при определенных условиях распространяются вслед за лучом при его перемещении вдоль поверхности.

Необходимым условием появления трещин в материале является нагрев до температуры, превышающей предел термостойкости, но не доходящей до значений температуры стеклования  $T_c$ . В случае лазерного термораскалывания предел термостойкости оценивается выражением

$$\Delta T = \frac{\sigma(1 - \nu)}{\alpha_T E},$$

где  $\sigma$  - предел прочности материала на разрыв;  $\alpha_T$  - коэффициент линейного термического расширения;  $E$  - модуль упругости;  $\nu$  - коэффициент Пуансона.

При локальном температурном воздействии на стекло его термостойкость при охлаждении увеличивается в 1,5 раза по сравнению со значением, определяемым по приведенной формуле, а при локальном нагреве, что имеет место при лазерном термораскалывании, в 3 раза. Поэтому для получения истинного значения предела термостойкости для стекла необходимо правую часть приведенной формулы умножить на 3.

Температура стеклования соответствует такому значению температуры, при котором физические свойства материала изменяются наиболее резко. Ниже нее материал находится в твердой, а выше — в жидкой фазе.

Режим термораскалывания характерен для ряда хрупких неметаллов: керамики, ситалла, стекла и некоторых других.

Вследствие низкой теплопроводности материалов, подверженных хрупкому разрушению, объем нагретого материала в начальный момент времени очень мал. Однако для гарантированного разрушения образца необходимо, чтобы достаточно быстро прогрелся существенный объем материала. Скорость распространения напряжений по глубине материала зависит от скорости теплопередачи, определяемой механизмом теплопроводности. Низкие значения теплопроводности хрупких материалов обуславливают небольшие скорости распространения термонапряжений по сравнению с возможными скоростями перемещения лазерного луча по поверхности образца, что приводит к запаздыванию разрушения относительно траектории луча.

В случае разрушения стекла различают две стадии: первую — начальную, характеризующуюся ничтожно малой скоростью рас-

пространения трещины (около  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  м/с), и вторую — быструю стадию, при которой скорость распространения трещины в стекле постоянна и достигает 50 ... 60% скорости распространения поперечных упругих волн (для стекла эта скорость  $2 \cdot 10^3$  м/с). Для процесса лазерного термораскалывания наибольший интерес представляют скорости разрушения, обеспечиваемые на второй стадии и позволяющие получить приемлемую для промышленного применения производительность. Для этого необходимо прикладывать к материалу термические нагрузки значительно большие, чем соответствующие значения энергии образования новой поверхности при необходимых уровнях скорости раскрытия трещины (для стекла скорости разрушения порядка  $10^{-1} \dots 1,0$  м/с соответствуют энергии образования новой поверхности больше  $8 \dots 10$  Дж/м<sup>2</sup>).

Для обеспечения достаточно быстрого разрушения материала необходимо, чтобы напряжения в нем были максимальны. Чем значительнее возникающие в материале напряжения будут превышать предел термостойкости, тем больше вероятность его разрушения. Следовательно, градиенты температуры, возникающие в хрупком материале под воздействием лазерного излучения, должны быть максимально большими. Температурный градиент определяется двумя факторами: максимальной температурой нагрева и минимальной областью нагрева материала, зависящими от концентрации энергии и от скорости перемещения лазерного луча, которая в данном случае определяется свойствами материала.

Требование обеспечить максимальный градиент температур в стекле накладывает определенные ограничения на перечисленные факторы: область нагрева материала должна быть минимальной, следовательно, нагрев должен осуществляться достаточно быстро, а максимальная температура нагрева стекла не должна превышать температуру стеклования, при которой напряжения в стекле резко снижаются. Поэтому наиболее легко термораскалывание осуществляется в стеклах с максимальным отношением температуры стеклования к пределу термостойкости. Для определения температуры, до которой нагревается поверхность материала под воздействием лазерного излучения, можно воспользоваться выражением для неподвижного кругового гауссова источника. При условии, что процесс происходит достаточно быстро, температура нагрева в центре пятна будет определять градиент, приводящий к термораскалыванию (если он превышает предел термостойкости материала). В этом случае, когда  $z = 0$  и  $r = 0$ ,

в системе координат, движущейся вдоль радиального направления луча со скоростью  $v$ , температурное поле принимает вид

$$dT = \frac{Qr_0^2 dt}{\lambda_\tau(4\alpha t + r_0^2)} \left(\frac{\alpha}{\pi t}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{4\alpha t + r_0^2}\right),$$

где  $Q$  - количество теплоты, выделенной мгновенным источником теплоты в объеме материала;  $r_0$  - расстояние от оси луча до точки, где плотность мощности изменяется в  $e$  раз по сравнению с его значением на оси пучка с гауссовым распределением плотности мощности;  $\lambda_\tau$  - теплопроводность материала;  $t$  - продолжительность лазерной обработки;  $\alpha$  - температуропроводность материала.

Для стационарного случая при интегрировании приведенного выражения по времени можно получить приближенно аналитическую формулу для температуры обрабатываемой поверхности на оси подвижного луча:

$$T = 1,8q_0 \left(\frac{r_0}{\pi\lambda_\tau(c\rho)v}\right)^{1/2}, \quad (2.6.1)$$

где  $q_0$  - плотность мощности поглощенного поверхностью лазерного излучения на расстоянии  $r_0$  от оси луча;  $(c\rho)$  - коэффициент объемной теплоемкости материала;  $c$  - абсолютная теплоемкость;  $\rho$  - плотность материала.

Анализ термонапряжений, возникающих в хрупком материале под действием лазерного излучения, показывает, что из трех составляющих напряжений - продольной, поперечной и в направлении толщины в материале, полезной для данного случая, является поперечная составляющая  $\sigma_y$ . Под действием этой составляющей осуществляется разделение стекла вдоль направления движения лазерного луча, так как в процессе его перемещения поперечные составляющие складываются, образуя поперечное усилие, разрывающее материал.

Наличие продольной составляющей напряжений  $\sigma_x$  играет отрицательную роль, так как при достаточной ее величине, превышающей предел прочности материала, в нем образуются трещины, направленные под различными углами к направлению разделения. Это приводит к уходу линии разделения от траектории перемещения луча и к возникновению мелких трещин в разделяемых боковых поверхностях материала.

Составляющая напряжений  $\sigma_z$  в направлении толщины материала не играет существенной роли в рассматриваемой плоской задаче.

Благодаря локальности воздействия лазерного луча в момент разделения материала почти все напряжения в нем снимаются. Поэтому можно предположить, что для качественного термораскалывания достаточно, чтобы поперечная составляющая напряжений в материале превышала продольную составляющую, т. е.

$$\sigma_y/\sigma_x > 1.$$

Учитываем, что

$$\sigma_y = \frac{\alpha_\tau E^*}{1-v} \frac{1}{r^2} \left(-\int Trdr\right),$$

$$\sigma_x = \frac{\alpha_\tau E^*}{1-v} \frac{1}{r^2} \left(\int Trdr - Tr^2\right).$$

Отсюда можно записать:

$$-\int Trdr > \int Trdr - Tr^2 \quad \text{или} \quad Tr^2 > 2 \int Trdr.$$

Продифференцировав почленно последнее неравенство, получим следующее условие:

$$r^2 dT/dr > 0.$$

Полученное неравенство означает, что для качественного термораскалывания материала под действием лазерного излучения производная температуры по радиусу должна быть положительной. Такое условие может быть обеспечено в том случае, если сечение лазерного луча имеет вид кольца (луч трубчатой формы). Тогда на оси лазерного луча, где его интенсивность равна нулю, температура будет меньшей, чем при удалении от оси по радиусу. В конфигурации термонапряжений, создаваемых излучением в материале, должна преобладать по интенсивности составляющая, перпендикулярная направлению разделения. Данное условие обеспечивается при эллипсоподобной форме сечения лазерного луча, которая является оптимальной в этом случае по отношению к лучу, обладающему круговой симметрией. Длинная ось эллипса должна располагаться вдоль направления разделения, а плотность мощности лазерного излучения должна изменяться вдоль этой оси, достигая максимума посередине и снижаясь по краям.

Вид колебаний оптического резонатора лазера, генерирующего луч трубчатой формы, является вырожденным. Распределение плотности мощности по сечению пучка этого вида колебаний можно получить в простейшем случае при сложении двух мод в следующем виде:

$$E(r) = E_0 4 \left( \frac{r^2}{r_0^2} \right) \exp \left( - \frac{r^2}{r_0^2} \right),$$

где  $E_0$  - плотность мощности на расстоянии  $r_0$  от оси излучения.

Кроме листовых материалов, методом управляемого термораскалывания могут разделяться хрупкие материалы, изготовленные в виде труб. В общем виде термораскалывание хрупких материалов трубчатой формы выглядит следующим образом. При вращении трубы относительно неподвижного лазерного луча каждая точка поверхности трубы вдоль линии обработки нагревается до температуры  $T$ . Вследствие относительно низкой теплопроводности хрупких материалов при уходе луча в процессе относительного перемещения образец достаточно медленно охлаждается, пока лазерный луч не приходит снова в рассматриваемую точку при следующем обороте. Нагрев поверхности трубы скачкообразно повторяется, пока градиент температур в осевом направлении трубы вдоль всей линии обработки не превысит предел термостойкости материала. В этот момент на одном из наиболее значительных дефектов материала вдоль линии воздействия лазерного излучения возникает начало трещины, приводящей к раскалыванию трубы по намеченному контуру.

В результате воздействия лазерного излучения прогревается очень тонкий поверхностный слой материала. В нагретом слое возникает термонапряжение сжатия в осевом направлении, а на внутренней части трубки под линией обработки - напряжение растяжения. Благодаря окружной симметрии трубки возникшие в ней механические напряжения направлены вдоль оси и стремятся разорвать ее по линии лазерной обработки.

Разрушение стекла происходит с некоторым запаздыванием относительно движущегося вдоль обрабатываемой поверхности лазерного пучка. Для вычисления этого запаздывания необходимо описать движущуюся картину температурного поля.

Используя выражение для мгновенного значения температуры, до которой нагревается материал под воздействием поверхностного точечного источника теплоты, можно получить условия изменения температуры в  $e$  раз, которое имеет вид  $z^2 = 4\alpha t$  и подтверждает, что на глубине, равной  $(4\alpha t)^{1/2}$ , температура материала в  $e$  раз меньше, чем на поверхности.

Есть основание предположить, что разрушение хрупкого материала или, в данном случае, появление трещины в стекле под действием лазерного излучения должно наступить

в тот момент, когда температурный перепад в  $e$  раз устанавливается по всей толщине стекла, т.е.

$$(4\alpha t)^{1/2} = H. \quad (2.6.2)$$

Данное допущение в рамках инженерного расчета справедливо по следующим соображениям. Как правило, термостойкость стекла составляет приблизительно одну треть от температуры стеклования (или размягчения). Следовательно, если поверхность стекла в процессе обработки лазерным излучением нагревается до температуры, близкой к температуре размягчения, то через время  $t$  при выполнении условия (2.6.2) практически по всей толщине стекло будет разогрето до температуры, превышающей предел термостойкости.

Условие (2.6.2) позволяет определить технологическую скорость протекания процесса управляемого термораскалывания. Пока стекло прогревается до такой степени, чтобы обеспечить условие (2.6.1), лазерный луч успевает уйти на расстояние, равное произведению скорости перемещения луча на время, определяемое по (2.6.1):  $l = vt$ . Подставляя значения  $t$  из (2.6.2), получаем выражение для расстояния начала зарождения трещины от подвижной точки облучения поверхности стекла:

$$L = H^2 v / (4\alpha). \quad (2.6.3)$$

Чем больше запаздывает начало трещины по отношению к положению движущегося следа луча на поверхности стекла, тем меньше вероятность ее следования за лучом, особенно при наличии заметных дефектов, неоднородностей в стекле, а также внешних механических воздействий, способных увести трещину в сторону от траектории перемещения лазерного луча. Поэтому величина отставания трещины должна задаваться условиями обеспечения заданной траектории и точностью разделения. Таким образом, задаваясь значением  $l$  из (2.6.3), можно получить выражение для определения скорости управляемого термораскалывания стекла:

$$v = 4\alpha l / H^2.$$

С другой стороны, скорость  $v$  определяется уровнем мощности или плотности мощности лазерного излучения, которую необходимо обеспечить для создания условий термораскалывания стекла. Скорость термораскалывания прямо пропорциональна теплопроводности и обратно пропорциональна квадрату его толщины. Следовательно, никакими изменениями параметров лазерного излучения, в том числе и повышением мощ-

ности излучения, увеличить эту скорость не представляется возможным.

Уровень мощности лазерного излучения, необходимый для обеспечения управляемого термораскалывания, можно определить при анализе приближенного выражения для температуры обрабатываемой поверхности на оси подвижного луча. Для удобства практического использования необходимо выразить плотность мощности  $E$  и радиус лазерного пучка  $r$  через реально измеряемые параметры лазерного излучения. Учитывая, что оптимальным для качественного термораскалывания является луч трубчатой формы, полную мощность лазерного излучения  $P$  можно выразить через плотность мощности  $E$ , вычисляя интеграл по радиусу:

$$P = \int_0^{\infty} 2\pi r dr E(r) = 4\pi r_0^2 E_0.$$

Выражая теперь  $E_0$  через  $P$  и подставляя в (2.6.1), получаем зависимость максимальной температуры поверхности материала, обрабатываемой излучением лазера, перемещающегося вдоль его поверхности со скоростью  $v$ :

$$T = \frac{0,45P}{\left[ (\pi r_0)^3 \lambda_T (cp) v \right]^{1/2}}.$$

Термонапряжения возрастают с повышением температуры до тех пор, пока она не достигнет значения температуры стеклования. При более высокой температуре стекло размягчается и напряжения в нем резко снижаются. Таким образом, для наиболее эффективного термораскалывания стекла лазерным излучением максимальная температура стекла должна равняться температуре стеклования  $T_c$ .

Учитывая сказанное, окончательное выражение мощности лазерного излучения, необходимой для обеспечения управляемого термораскалывания стекла с заданной скоростью, записывается в виде:

$$P = 2,22T_c \left[ (\pi r_0)^3 \lambda_T (cp) v \right]^{1/2}.$$

Таким образом, зная размеры и характеристики подлежащего обработке стекла, можно рассчитать режим управляемого термораскалывания.

Анализ результатов показывает, что скорость управляемого термораскалывания относительно мала и одним из методов ее увеличения для обеспечения технико-экономической рентабельности рассматриваемого технологического процесса является воздейст-

вие на стекло вдоль одной линии термораскалывания двумя лазерными лучами, направляемыми с противоположных сторон образца материала. Поскольку в этом случае тепловая энергия распространяется в объеме стекла от двух источников навстречу друг другу, условие термораскалывания примет следующий вид:

$$(4\alpha t)^{1/2} = H / 2,$$

а выражение для скорости термораскалывания:

$$v = 16\alpha l / H.$$

Таким образом, при одновременном воздействии лазерного излучения с двух противоположных сторон вдоль одной линии разрушения скорость управляемого термораскалывания при прочих равных условиях увеличивается в 4 раза. Кроме того, это особенно важно при термораскалывании толстых стекол, при односторонней обработке которых с необлучаемой стороны могут появляться сколы и неровности. При двухсторонней обработке вероятность получения ровной кромки среза значительно повышается. Представленный метод расчета режимов управляемого термораскалывания с помощью лазерного излучения не накладывает ограничения на свойства обрабатываемого материала и его можно использовать для расчета режимов термораскалывания не только стекла, но и других хрупких материалов: ситалла, керамики и т.п., - при условии непрозрачности обрабатываемого материала в диапазоне длин волн лазерного излучения. В работах Г. А. Мачулки было показано, что для обеспечения термораскалывания по строго заданному контуру отставание начала трещины от подвижной точки попадания луча должно быть вполне определенным.

Наиболее важно сохранить заданное отставание трещины на начальном и конечном участках линии разделения. Трещина зарождается на срезе, обычно имеющем много различных дефектов - микротрещин, сколов, царапин и т.д. При этом трудно гарантировать, что по соседству с линией разделения будут отсутствовать более крупные дефекты, способные более легко зародить трещину в стороне от точки набегания луча на край пластины. На некотором расстоянии от пластины обычно направление трещины совмещается с направлением перемещения луча. При этом трещина искривляется.

Для устранения такого искривления необходимо применять специальные меры. Можно, например, снижать скорость перемещения лазерного луча на начальном участке,

увеличивая тем самым степень воздействия на стекло. В некоторых случаях это приводит к более точному разделению. Известны также другие меры - изменение степени фокусировки луча с переходом на скрайбирование на начальном участке, предварительное нанесение царапин, легкое обкалывание кромки, прикосновение острого охлажденного инструмента.

Особенно трудно зарождается термотрещина на кромке стекла, полученной в результате лазерного термораскалывания. Высокое качество кромки стекла, обеспечиваемое в результате его разделения рассматриваемым методом, в данном случае затрудняет раскрой стекла во взаимно пересекающихся направлениях.

На конечном участке линии разделения термораскалывание облегчается и часто здесь трещина обгоняет лазерный луч, что приводит к потере контроля над ходом процесса. Для устранения этой причины искривления линии термораскалывания можно повысить скорость перемещения лазерного луча на конечном участке разделения или снизить его мощность. Во многих случаях это позволяет устранить обгон и обеспечить контролируемое распространение термотрещины по всей линии разделения.

Результаты экспериментальных работ по управляемому термораскалыванию некоторых хрупких материалов ( $\lambda = 10,6$  мкм) приведены в табл. 2.6.3.

2.6.3. Данные по термораскалыванию некоторых материалов

Материал	Размеры образцов, мм		Мощность лазерного луча, Вт	Скорость перемещения, мм/с	Отставание трещины, мм
	Толщина	Поперечные размеры			
Оконное стекло	1,0	60×50	10	2,0	1,0
	1,0	60×50	10	10,0	4,9
	2,5	250×50	15	1,7	5,0
Ситалл СТ50	1,0	60×50	30	5,0	—
Поликор	1,0	35×30	30	33,0	1,0
Алюмооксидная керамика	0,635	—	100	50,8	—

Приведенные в табл. 2.6.3 данные по управляемому термораскалыванию керамики типа "Поликор" представляют интерес с двух точек зрения. Во-первых, скорость термораскалывания этого материала в десятки раз выше, чем стекла. Поэтому рассматриваемый процесс наиболее выгодно использовать при разделении прежде всего такого материала. Во-вторых, значительное ускорение процесса является следствием теплофизических свойств поликора. Благодаря высокой теплопроводности температуропроводность этой керамики примерно на два порядка превышает температуропроводность стекла. Тем самым экспериментальные данные по разделению методом управляемого термораскалывания этого материала подтверждает теоретическое предположение о том, что скорость управляемого термораскалывания непрозрачных хрупких материалов с помощью лазерного излучения определяется их температуропроводностью.

Лазерное термораскалывание стеклянных труб имеет много общего с управляемым термораскалыванием листового стекла. Одна-

ко одно принципиальное отличие приводит к необходимости рассмотреть этот процесс отдельно. При управляемом термораскалывании листового стекла начало трещины находится на краю стеклянной пластины, имеющей обычно много заметных дефектов, способствующих достаточно легкому образованию начала линии термораскалывания по заданному направлению разделения, которое далее относительно легко направляется лазерным лучом по заданной конфигурации разделяемого изделия.

Стеклянная труба имеет замкнутый периметр. Она также имеет достаточно большое количество дефектов, способных дать начало трещине. Однако эти дефекты в большинстве случаев не выражены явно и не могут иметь свободы для образования локального зазора. Поэтому при лазерном термораскалывании стеклянных труб место начала трещины не определено.

Принципиально возможны две схемы лазерного термораскалывания стеклянных труб, также как и труб из других хрупких

материалов. Первая схема - преобразование формы лазерного луча в радиально сходящийся (или радиально расходящийся - при обработке изнутри) лучевой диск. При равенстве длины лазерно-лучевой ленты длине контура резания на обрабатываемом стекле образуется линия, вдоль которой возникает напряжение в материале и которая задает контур термораскалывания. На этой линии всегда найдется достаточно заметный дефект стекла, способный зародить трещину, которая практически мгновенно распространяется по описанному лазерным излучением контуру. Однако осуществить такую технологию не всегда возможно из-за сложности оптической системы. Кроме того, надежность и повторяемость процесса термораскалывания стеклянных труб при однократном воздействии теплового источника невысоки.

Наиболее надежное и качественное разделение стекла обеспечивается при использовании второй схемы термораскалывания - при многократном воздействии лазерного излучения на стекло вдоль линии разрушения. Наиболее легко термораскалывание стеклянных труб можно осуществить их вращением относительно лазерного луча (или наоборот).

Для осуществления термораскалывания стеклянных труб необходимо обеспечить нагрев стекла вдоль всей линии обработки до температуры, превышающей предел термостойкости. При этом необходимо учитывать, что температура нагрева в рассматриваемом случае является неравномерной: в текущей точке непосредственного облучения она значительно превышает предел термостойкости. Для предотвращения растрескивания поверхности и связанного с этим ухудшения качества разделяемых изделий максимальная температура нагрева поверхности стекла не должна достигать, как и в процессе управляемого термораскалывания листовых материалов, температуры стеклования.

Другим условием качественного разделения хрупких материалов лазерным излучением в результате непосредственного термораскалывания независимо от формы разделяемых образцов является обеспечение равенства диаметра  $d_f$  лазерного луча толщине  $H$  стеньки разделяемого материала:

$$d_f \approx H. \quad (2.6.4)$$

Учитывая условие (2.6.4), а также подставляя вместо линейной скорости взаимного перемещения разделяемого материала и лазерного луча более удобную при разделении труб угловую скорость вращения, из (2.6.4) можно получить выражение для максимальной температуры, до которой нагревается поверхность стекла под воздействием подвижного лазерного источника:

$$T_0 = \frac{0,2P}{\left[DH^3n\lambda_r(\text{ср})\right]^{1/2}}, \quad (2.6.5)$$

где  $n$  - частота вращения изделия,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D$  - наружный диаметр трубы;  $P$  - мощность лазерного источника.

До определяемой по (2.6.5) температуры нагревается поверхность стекла в текущей точке, непосредственно облучаемой в момент времени. При уходе луча в процессе вращения трубы эта температура в результате отвода теплоты вследствие теплопроводности стекла начинает снижаться до прихода луча в эту же точку на следующем обороте. С каждым последующим оборотом линия обработки будет прогреваться до все более высокой температуры. Суммарный нагрев поверхности обрабатываемого материала может быть определен как сумма мгновенной температуры  $T_0$  непосредственно в точке облучения и средней температуры стекла  $\bar{T}$ , которую можно определить как результат стационарного нагрева усредненным во времени источником нагрева. Для средней температуры нагрева тонких ( $H \ll D$ ) стеклянных труб справедливо выражение:

$$\bar{T} = \frac{P(\alpha t)^{1/2}}{\pi^2 \lambda_r DH}. \quad (2.6.6)$$

Для обеспечения термораскалывания по заданному контуру средняя температура нагрева по всей линии разделения должна достигнуть предела термостойкости стекла:

$$\bar{T} \geq \Delta T_H,$$

где  $\Delta T_H$  - интервал температур, определяющий термостойкость стекла.

Это условие позволяет непосредственно из (2.6.6) получить формулу для расчета времени, необходимого для нагрева стекла вдоль линии разделения до предела термостойкости. Поскольку в этот момент должно наступить термораскалывание, это значение можно принять в качестве времени резки стеклянной трубы:

$$t = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\pi^2 \lambda_r DH \Delta T_H}{P} \right)^2. \quad (2.6.7)$$

Для инженерных расчетов необходимо использовать экспериментальное понятие термостойкости стекла  $\Delta E_p$ , основанное на наборе статистических данных по его прочности при воздействии температурного градиента. Учитывая это, следует иметь в виду, что экспериментальные значения термостойкости

зависят от толщины стекла в соответствии с формулой

$$\Delta E_p = \Delta T_H H^{-1/2},$$

в которой толщина образца выражается в мм.

Минимальное значение мощности лазерного излучения, необходимое для обеспечения термораскалывания и определяемое из условия, что область заметного прогрета стекла не должна иметь протяженность более толщины стенки стекла, определяется неравенством

$$P_{\min} \geq 2\pi\lambda_{\tau} D \Delta T_H. \quad (2.6.8)$$

Для надежного термораскалывания уровень мощности излучения должен превышать устанавливаемый (2.6.8) предел. Для установления ограничения по допустимому уровню мощности лазерного излучения следует использовать условие (2.6.2), введенное для термораскалывания листового стекла и имеющее в данном случае смысл: для осуществления термораскалывания стеклянной трубки необходимо, помимо описанных условий, чтобы температура стекла по всей его толщине превысила предел термостойкости. Использование условия (2.6.2) позволяет определить минимальный промежуток времени, необходимый для обеспечения условий термораскалывания стеклянной трубки:

$$t_{\min} = H^2 / (4\alpha). \quad (2.6.9)$$

Подставляя (2.6.9) в (2.6.7), можно определить максимально допустимый уровень мощности лазерного излучения, превышение которого исключает возможность качественного термораскалывания стеклянной трубки:

$$P_{\max} = 2\pi^2 \lambda_{\tau} D \Delta T_H = \pi P_{\min}^2. \quad (2.6.10)$$

Для обеспечения качественного термораскалывания стеклянных труб уровень мощности излучения должен выбираться между пределами, определяемыми (2.6.8) и (2.6.10).

Следует также учесть, что при достаточной большой толщине стенки ( $H > 10$  мм) в условиях поверхностного нагрева в материале не может быть создан градиент температуры, гарантирующий контролируемое разрушение материала.

Для расчета режимов термораскалывания необходимо также определить максимальную скорость перемещения лазерного луча относительно обрабатываемого образца.

Для расчета оптимальной скорости вращения трубки, обеспечивающей качественное термораскалывание, можно использовать следующую формулу:

$$n = \frac{4 \cdot 10^{-2} P^2}{(T - \Delta T_H)^2 D H^3 \lambda_{\tau} (cp)}. \quad (2.6.11)$$

При снижении скорости вращения ниже значения, определяемого (2.6.11), будет наблюдаться достаточно надежное термораскалывание.

Некоторые экспериментальные результаты по лазерному термораскалыванию стеклянных цилиндрических оболочек представлены в табл. 2.6.4.

Методом управляемого термораскалывания можно осуществлять разделение почти всех хрупких материалов (алюмооксидной керамики, монокристаллического кварца, сапфира, силикатных стекол), за исключением плавленого кварца, так как его слабое тепловое расширение не обеспечивает возникновения достаточных термонапряжений.

2.6.4. Данные по термораскалыванию оболочек

Изделие	Марка	Размеры оболочек, мм		Расчетная оптимальная скорость вращения, мин <sup>-1</sup>	Мощность лазерного излучения, Вт	Время резки, с
		Наружный диаметр	Толщина стенки			
1	2	3	4	5	6	7
Цилиндр	С93-2	85	2,5	12,0	47,2	20 – 25
			1,0	56,8		
Колба	С93-2	68,5	2,5	15,3	30	15 – 20
			1,5	238		
Цилиндр	С93-2	58	2,2	26,4	30	10 – 20
			1,2	281		
Колба	С52-1	35,0	2,0	79,8	30	10 – 15
			1,0	642		

Продолжение табл. 2.6.4

1	2	3	4	5	6	7
Труба	Пирекс	20	1,0	342	30	1,4 – 2
		22,5	1,75	204	40	6 – 10
		60	5,0	5,1	50	40 – 90
Колба	АМ-К	140	11,0	0,1	50	180 – 300
		250	4,5	0,74	50	180 – 300

**2.6.4. ЛАЗЕРНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ И МАРКИРОВАНИЕ**

**Скрайбирование** представляет собой широко распространенный метод резки и контурной обработки образцов, в ходе которого испарению подвергается лишь часть поверхности вдоль границы раздела.

Скрайбирование осуществляется путем нанесения на поверхность сплошной канавки или прошивки близко расположенных отверстий, после чего материал легко надламывается вдоль линии скрайбирования.

Лазерное скрайбирование значительно повышает точность разделения пластин на отдельные кристаллы и производительность операции резки, обеспечивает высокое качество поверхности пластин, а также позволяет автоматизировать этот процесс. Процесс лазерного скрайбирования универсален и применим для приборов различной геометрии и широкого ряда материалов. Он экономичен даже при малом объеме производства, не требует высокой квалификации операторов. Этот метод используется для обработки хрупких материалов типа керамики, стекла.

Скрайбирование осуществляется для всех видов полупроводниковых пластин, включая Si, Ge, GaAs, InSb. В отличие от скрайбирования алмазным резцом возможна обработка пластин с нанесенными на них металлическими пленками.

Лазерное скрайбирование требует меньших затрат энергии на единицу длины, поскольку для его осуществления не требуется прорезать материал на всю толщину. По этой причине процесс разделения образца на части с прямолинейными краями выполняется методом скрайбирования значительно быстрее, чем путем непосредственной резки. Края заготовок, получаемых в результате разделения по методу скрайбирования, менее подвержены разрушению в результате избыточного нагрева и менее искажены термическими напряжениями. Поэтому в тех случаях, когда необходимо получить заготовки прямоугольной формы, целесообразнее применять метод скрайбирования. Методы непосредственной

резки следует использовать в тех случаях, когда требуется получить заготовки сложной формы.

Учитывая, что разделение материалов методом лазерного скрайбирования с последующим разламыванием наиболее рационально осуществлять с помощью импульсного лазерного излучения, анализ физических процессов, протекающих при этом, сходен с анализом процесса возгонки лазерным лучом отверстий в материале.

Лунки в материале могут образовываться как под действием сильных единичных импульсов, так и с помощью многоимпульсной обработки в режиме модулированной добротности. Последний режим обработки позволяет получать необходимый результат при скрайбировании материала непрерывно движущимся лазерным лучом с большой частотой следования импульсов, обеспечивающей перекрытие лунок. Снижение энергии в импульсе в данном случае компенсируется соответствующим повышением частоты повторения импульсов.

Перекрытие лунок характеризуется соответствующим коэффициентом

$$K_n = (2r_f - s) / (2r_f),$$

где  $r_f$  - радиус лунки на поверхности образца;  $s$  - расстояние между центрами двух соседних лунок.

Учитывая, что

$$s = v\tau_n = v \left( \frac{1}{F_n} - \tau_n \right),$$

коэффициент перекрытия можно определить как

$$K_n = 1 - \frac{v}{2r_f} \left( \frac{1}{F_n} - \tau_n \right),$$

где  $\tau_n$  - длительность паузы;  $\tau_n$  - длительность импульса;  $F_n$  - частота следования импульсов.

При достаточно большой мощности излучения поверхностная часть стекла расплав-

ляется. При уходе луча стекло быстро затвердевает, что сопровождается резким изменением его объема в обрабатываемой области и приводит к поверхностному растрескиванию стекла. При этом след луча имеет вид строчного шва (строчки). При достаточно большой скорости обработки эта строчка отделяется от стекла аналогично стружке при механической обработке. Самопроизвольное разделение стекла по этому контуру происходит достаточно редко. Чаще всего необходимо разламывать стекла по контуру механическим способом, дополнительным термоударом или их комбинацией.

При дальнейшем повышении степени воздействия лазерного излучения часть стекла разлагается, возгоняется и испаряется, образуя вдоль линии обработки дорожку, сопровождаемую крестообразными трещинами. При этом последующее разламывание значительно облегчается. Однако края разделенного таким образом стекла получаются неровными из-за наличия трещин, искажающих область разделения, а также возможности ухода трещин в сторону от линии скрайбирования. Этот недостаток можно устранить повышением энергии лазерного излучения снижением времени его воздействия до такой степени, чтобы стекло испарялось вдоль линии обработки практически без прогрева прилегающей области стекла.

Такой режим обработки реально осуществим при воздействии на материал импульсного лазерного излучения. Большая энергия в импульсе позволяет быстро испарить часть стекла вдоль линии обработки, а пауза между импульсами приводит к тому, что стекло в это время охлаждается и его средний нагрев оказывается незначительным. В результате этого в стекле не наблюдаются заметные термонапряжения и оно не разрушается. Такой вид скрайбирования образует последовательность лунок вдоль линии обработки, по которой можно осуществить разламывание стекла без образования заметных сколов и неровностей краев среза. Еще большая точность разделения обеспечивается в том случае, если образованные лазерным излучением лунки располагаются рядом, с небольшим перекрытием в виде ровной неглубокой канавки. Таким путем удастся обеспечить наиболее качественное разделение хрупких материалов с точностью до 30 мкм.

При скрайбировании стекла благодаря короткоимпульсному воздействию с непосредственной возгонкой материала размягчения стекла не происходит. Для предотвращения откалывания стекла область материала, в которой возникают заметные напряжения, должна быть ограниченной. Это возможно в

том случае, если на периферии пространства, ограниченного линейной протяженностью области скрайбирования  $l$ , температура нагрева стекла не достигает предела термостойкости

$$T_l < \Delta T_H.$$

Учитывая, что в режиме скрайбирования применяется фокусировка лазерного излучения в пятно минимального размера, диаметр которого меньше линейной протяженности области прогрева, лазерное излучение можно считать точечным источником и использовать для вычисления температурного поля соответствующую формулу:

$$T_l = \frac{P}{2\pi\lambda_{\tau}l} \exp\left(-\frac{vl}{2\alpha}\right).$$

Приравнивая  $l$  к глубине лунки и учитывая, что для эффективного разделения достаточно, чтобы глубина лунки составляла примерно 25% толщины материала [ $l = H/4$ ], получаем формулу для оценки средней мощности лазерного излучения, превышение которой приводит к обкалыванию кромок разделения стекла:

$$P < (1/2)\pi\lambda_{\tau}H\Delta T_H \exp\left(\frac{vH}{8\alpha}\right).$$

Связь между импульсными параметрами излучения

$$P = P_{и\tau} F_{и} = w_{и} F_{и}$$

дает возможность оценить граничную частоту следования импульсов, превышение которой приводит к перегреву материала и его неконтролируемому скалыванию.

Скрайбирование пластин из кремния, арсенида галлия и других полупроводниковых материалов выполняют для последующего разделения пластин на отдельные элементы по линии надреза. В электронной промышленности такой способ разделения применяют на одной из стадий групповой технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. Лазерное скрайбирование находит все более широкое применение, вытесняя скрайбирование алмазным резцом.

Лазерный метод имеет следующее достоинство: возможность получения надрезов с ровными и чистыми краями, без загрязнения микросхем отходами резки; получение более глубоких по сравнению с механическим способом надрезов без приложения усилий к разделяемому материалу, что исключает сколы на углах микросхем; более высокий процент выхода годных изделий после разламывания пластины; возможность получения не

только надрезов, но и полных разрезов без нарушения взаимной ориентации микросхем; небольшая продолжительность и малая область воздействия, что обеспечивает небольшие напряжения в разделяемой полупроводниковой пластине; высокая производительность (скорость скрайбирования составляет 1 ... 25 см/с); возможность скрайбирования полупроводниковых пластин с нанесенными защитными покрытиями.

Для скрайбирования кремния, обладающего высокой поглощательной способностью на полосе ~ 1 мкм, применяются ИАГ-лазеры свободной генерации или с модуляцией добротности. Для прецизионной резки полупроводниковых материалов может использоваться установка на базе импульсного лазера на азоте. В отличие от полупроводников, обработанных излучением твердотельных лазеров, работающих в режиме свободной генерации, монокристаллы сурьмянистого индия, арсенида галлия и германия, подвергнутые воздействию излучения азотного лазера, не изменяют структуру вблизи зоны реза. Указанное обстоятельство является весьма важным, так как даже незначительное изменение структуры поверхности полупроводника может сильно изменить его электрофизические свойства. Этот метод был применен для разделения плоского *p-n*-перехода на ряд элементов различной конфигурации.

Контроль глубины канавки в процессе обработки осуществляется либо путем регистрации вольт-амперной характеристики зоны обработки, либо по сопротивлению между контактирующими площадками.

Существенным достоинством описанного метода является возможность контролировать ход процесса обработки в течение всего времени разделения диффузионных областей, что позволяет исключить брак на операции разделения.

Глубина надреза, выполненного пучком сфокусированного лазерного излучения, составляет 40 ... 125 мкм, а ширина - 20 ... 40 мкм при толщине пластины 150 ... 300 мкм. Большая плотность мощности (10 ... 100 Вт/см<sup>2</sup>) вызывает плавление и испарение полупроводника. Однако очень малая длительность лазерного импульса и быстрое перемещение разрезаемой пластины относительно сфокусированного лазерного пучка является причиной того, что теплота, выделяющаяся в прилегающей к надрезу области материала, не вызывает в нем существенных изменений. Зона термического влияния составляет не более 50 мкм.

Глубина надреза является важным параметром, определяющим выход годных изделий при разламывании пластин. Глубина за-

висит от параметров лазерного пучка и скорости скрайбирования. Оптимальная глубина надреза составляет 25 ... 30% толщины пластины. Большая глубина надреза (например, 60%) требует большего усилия при разламывании пластин. Причиной этого являются менее выгодное распределение сжимающих и растягивающих напряжений в разламываемой пластине и большая эластичность тонкого слоя проводника под надрезом.

Получение большей глубины надреза (до 40 мкм) или сквозное разделение пластин требует многопроходного скрайбирования.

В процессе лазерного скрайбирования часть удаляемого полупроводника может осесть около надреза на поверхности пластины. С подложкой эти загрязнения связаны слабо и поверхность пластины не загрязняют. Очистка полупроводниковых пластин может осуществляться в ультразвуковых ваннах. Кроме того, применяются специальные предохраняющие покрытия (например, натуральный латекс), которые наносят на поверхность пластины перед скрайбированием и удаляют после него. Чтобы избежать загрязнения поверхности со структурами, применяется скрайбирование нижней поверхности пластины. В этом случае необходимо использовать глубокое (до 80 ... 90 % толщины пластины) скрайбирование во избежание повреждения структур при разламывании.

В отличие от скрайбирования полупроводников вследствие более высокой поглощательной способности керамики на длине волны 10,6 мкм для скрайбирования керамических пластин в основном используются СО<sub>2</sub>-лазеры.

Скрайбирование с применением лазера на СО<sub>2</sub> заключается в выполнении вдоль линии разделения пластины ряда несквозных отверстий диаметром 75 ... 200 мкм и глубиной 100 ... 200 мкм на расстоянии друг от друга 75 ... 200 мкм. В слое керамики, прилегающем к отверстиям на глубине 20 ... 50 мкм, в этом случае появляются большие напряжения, которые облегчают разламывание и деление пластин. Надрезанные таким образом пластины можно легко и без повреждений разломить вдоль линии надреза, что позволяет исключить брак при выполнении этой технологической операции.

Величина напряжений и глубина зоны их возникновения снижаются с уменьшением мощности и продолжительности импульса лазера на СО<sub>2</sub>. При использовании импульсов малой продолжительности (менее 0,8 мс), сила, необходимая для разламывания пластины, возрастает. Например, для импульсов мощностью 50 Вт и продолжительностью 2 мс

она составляет 3 Н, что соответствует удельной нагрузке 34,5-10 Н/м. Для мощности 75 Вт и продолжительности импульса 0,2 мс сила разламывания составляет 11,8 Н, а удельная нагрузка 64-10 Н/м при расстоянии между отверстиями 100 мкм.

Для скрайбирования керамических пластин могут использоваться также ИАГ-лазеры, обеспечивающие хорошие результаты при большой частоте следования импульсов

(40 ... 50 кГц). В этом случае на пластине образуется непрерывный надрез.

Из-за очень малой продолжительности импульсов ИАГ-лазеров большие напряжения в слое керамики вдоль надреза не возникают, и для разламывания пластина должна быть равномерно надрезана либо разделена полностью.

Некоторые режимы скрайбирования различных материалов приведены в табл. 2.6.5.

**2.6.5. Режимы скрайбирования различных материалов**

Материал	Толщина, мм	Скорость скрайбирования, см/с	Ширина надреза, мм	Средняя мощность излучения, Вт	Частота следования импульсов, кГц
Стекланная подложка	1,27	25,4	0,102	3,5	0,350
Листовое стекло	1,57	26,3	0,05	40,0	0,350
Кварц	0,8	25,4	0,05	9,6	0,350
Сапфир (монокристалл)	0,254	25,4	0,102	3,5	0,350
Керамика:					
стеатитовая	0,635	101,5	0,127	50,0	0,350
алюмооксидная	2,03	7,2	—	250,0	0,350
оксиднобериллиевая	0,763	76,2	0,127	50,0	0,350
Полупроводники:					
кремний	0,400	50,0	0,03	8,0	17,2
арсенид галлия	0,15	150,0	0,02	6,0	26,5

**Маркировка.** Один из видов фигурной обработки поверхности материалов состоит в том, что лазерный луч, форма сечения которого задается с помощью маски, проецируется на обрабатываемую поверхность в нужном масштабе для получения фигурного изображения, повторяющего форму маски.

Данный метод обработки поверхностей, получивший название проекционного, широко применяется в микроэлектронике для фигурной обработки тонких пленок, а также в других областях для обработки поверхностей объемных заготовок. Одним из направлений проекционного метода является нанесение знаков (лазерное печатание) на обрабатываемые детали с целью идентификации продукции, нанесения на изделия соответствующей информации.

К лазерной маркировке следует прибегать лишь в тех случаях, когда требования к маркировке не могут быть достаточно хорошо выполнены обычными методами (трафаретная печать, механическая или ручная гравировка, травление). Эта необходимость возникает в

тех случаях, когда изделия имеют малые размеры или очень хрупки, а также при необходимости обеспечить высокую скорость маркировки.

В частности, к механическим воздействиям чувствителен материал интегральных схем, в качестве которого используются тонкие пластины монокристалла кремния.

Спектр поглощения кремния таков, что только излучение с длиной волны менее 1,1 мкм может достаточно эффективно использоваться для маркировки этого материала при плотности мощности порядка  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; температурные градиенты достигают значений  $10^6$  °С/см. Ширина зоны возникновения напряжений в полупроводнике, вызванных термическим действием лазерного пучка, составляет около 180 мкм.

Проекционный метод обработки позволяет наносить сложные знаки с помощью всего лишь одного лазерного импульса с высокой мощностью излучения.

Второй метод маркировки заключается в сканировании сфокусированного лазерного

пучка на поверхности изделия, модуляции его интенсивности для испарения части материала в заранее намеченных местах и осуществлении таким образом требуемой маркировки. Знаки, метки формируются в виде совокупности точек или линий. Для указанных целей часто используется лазер на ИАГ с неодимом; его излучение обычно хорошо поглощается материалом маркируемого изделия и, кроме того, его можно получить в виде коротких импульсов с высокой пиковой мощностью, достаточной для испарения метки на поверхности.

Для маркировки органических материалов достаточно эффективно применяются СО<sub>2</sub>-лазеры типа ТЕА.

Маркировка осуществляется, кроме полупроводниковых материалов, на бумаге, картоне, стекле, дереве, керамике, пластике и т.д. Размеры знаков составляют от 0,2 до 30 мм; поле записи 50×50 мм. Скорость маркировки составляет от 2 с на знак до девяти знаков в 1 с в зависимости от величины и формы знака.

#### 2.6.5. ЛАЗЕРНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Процессы лазерной обработки и, в частности, разделения, реализуются с помощью технологических лазерных установок. При этом независимо от назначения и типов применяемых лазеров, установки в основном имеют общую структурную схему и содержат следующие узлы: источник мощного оптического излучения - лазер; оптическую систему для формирования лазерного излучения - энергетический или рабочий канал; устройство для закрепления и перемещения обрабатываемого объекта - координатный стол с приводом; систему управления работой лазера и координатного стола. В установках для лазерной резки предусматривается также тракт для подачи газа в зону резки, конечная часть которого обычно совмещается с фокусирующей системой и образует газооптический резак.

Лазер обеспечивает энергетические и временные параметры воздействия; оптическая система формирует пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Точность, производительность и удобство обработки в значительной степени определяются характеристиками системы управления перемещением детали или лазерного луча.

Источник излучения - лазер - должен обеспечить генерацию излучения достаточной мощности на приемлемой для операций разделения длине волны с необходимой производительностью при условии минимального влияния на свойства окружающих участков обработки.

Степень использования существующих лазеров неодинакова и зависит не только от их параметров, но и от уровня освоения в производстве, простоты эксплуатации, надежности и т.п.

С учетом этих факторов для операций разделения неметаллических материалов прежде всего используются СО<sub>2</sub>-лазеры. Кроме того, достаточно широко применяются лазеры на ИАГ, реже на рубине и N<sub>2</sub>.

Оптические системы в лазерных установках для обработки материалов выполняют разнообразные функции: передачу лазерного излучения в зону обработки и формирование светового пучка необходимых плотностей мощности и конфигурации; наводку излучения на заданный участок материала и совмещение с ним; контроль за ходом процесса, оценку результатов и в некоторых случаях оптические измерения.

К координатным устройствам предъявляются требования, заключающиеся в обеспечении необходимой точности операции изготовления детали, фиксации детали на рабочем столе и относительного перемещения лазерного луча и детали с необходимой скоростью.

В настоящее время отсутствует четкая специализация установок по роду обрабатываемых материалов. Многие установки, первоначально предназначавшиеся для раскроя металлов, могут быть с успехом применены для резки неметаллических материалов, и наоборот. Однако, учитывая, что значительная часть установок для резки в качестве излучателя включает в себя СО<sub>2</sub>-лазер, более эффективно такие установки будут использоваться для резки металлов.

Существуют три группы установок для размерной резки, различающиеся схемой перемещения материала относительно лазерного луча. В установках, выполненных по первой схеме, в плоскости обработки с помощью координатного устройства перемещается разрезаемый материал. Преимуществами данной схемы являются: небольшая и постоянная длина оптического энергетического канала; высокая точность, обеспечиваемая за счет координатного стола. Недостатком рассматриваемой группы установок являются ограниченные габариты обрабатываемых листовых заготовок. Рекомендуемые габариты листов для этой схемы - не более 1,0×1,0 м и соответственно небольшие перемещаемые массы. Установки, относящиеся к этой схеме и обладающие лучшими характеристиками, представлены фирмами "Triumph" и "Behrens" (Германия). Данные установки, выполненные на базе дыропробивных прессов, позволяют сочетать в себе операции штамповки и пресования с лазерной резкой.

В установках, относящихся ко второй группе, в продольном направлении перемещается лист разрезаемого материала, в поперечном - газооптический резак по неподвижной раме. Преимущество данной схемы - большие по сравнению с первой схемой габариты обрабатываемых листов, что, однако, влечет за собой снижение точности и увеличивает энергетические потери.

Представителем установок, выполненных по этой схеме, является установка ЛУРМ-1600 для программного однослойного раскроя неметаллических материалов, предназначенная для применения в различных отраслях легкой промышленности. Установка состоит из двухкоординатной машины с устройствами для автоматической подачи материала из рулона и съема выкросенных деталей, лазера на  $\text{CO}_2$  мощностью 1 кВт с оптической системой и числового программного устройства. Оптический резак установлен на каретке, перемещающейся по направляющей портала с помощью реечной передачи. Между двух стоек, которыми крепится портал к машине, по рельсовым направляющим перемещается с помощью реечной передачи стол, выполненный из алюминия в виде ячеистой структуры. Точность исполнения контура при раскрое составляет 0,8 ... 1,0 мм.

По такой же схеме работает установка "Севан" на базе твердотельного лазера ЛТН-103. В этой установке излучатель ввиду небольшой массы и габаритов установлен непосредственно на каретку вместе с резаком.

#### Техническая характеристика установок ЛУРМ-1600 и "Севан"

	ЛУРМ-1600	"Севан"
Тип лазера . . . . .	на $\text{CO}_2$	ЛТН-103
Мощность излучения, Вт . . . . .	800	250
Потребляемая мощность, кВт . . . . .	27,5	20,0
Масса установки, кг . . . . .	2400	1500
Размеры обрабатываемого материала, мм, не более . . . . .	1600 x 1500	1400 x 2000
Линейная скорость раскроя, м/мин . . . . .	до 42	0,1 ... 6,0
Тип программного устройства . . . . .	ЭМ-907	—
Система управления . . . . .	Двухкоординатная, числовая, программная, контурная	—
Точность вырезания контура, мм . . . . .	+1,0	+0,2

К этой же группе установок относится технологический лазерный комплекс, предназначенный для автоматизированной лазерной обработки по сложному контуру плоских деталей и труб. В состав комплекса входит непрерывный лазер на  $\text{CO}_2$  "Хебр" и технологическая лазерная установка ТЛУ-1000, которая обеспечивает автоматическое относительное перемещение обрабатываемой детали и сфокусированного луча по заданной системой ЧПУ программе. Управление комплекса осуществляется системой ЧПУ ЗИТ500М и рабочей программой на перфоленте в коде ISO-840.

#### Техническая характеристика установки ТЛУ-1000

Диапазон плавного регулирования лазерного излучения, кВт . . . . .	0,2 ... 1,0
Рабочий ход, мм, по осям:	
X . . . . .	1200
Y . . . . .	2000
Z . . . . .	600
Рабочая скорость, м/мин . . . . .	0,1 ... 4,0
Габаритные размеры, мм . . . . .	4900x3000x3400

В установках, относящихся к третьей группе, перемещается газооптический резак над неподвижным обрабатываемым листом, который укладывается на раскройный стол.

Установки этой группы выполняются на базе машин для термической резки портальной и портално-консольной конструкции, а также на базе продольно-фрезерных станков и координатографов, предназначенных для проверки программ раскроя. Преимуществом данной схемы является возможность обработки крупногабаритных листов, недостатком - большая и переменная длина оптического тракта и вследствие этого невысокая точность и разное качество реза на различных участках обрабатываемого листа.

Представителем машин порталной конструкции является установка "Алмаз-5". В портале установки размещены приводы ходов, газовые и электрические коммуникации. Оптический резак снабжен электромеханическим плавающим устройством для стабилизации положения фокальной плоскости луча лазера.

#### Техническая характеристика установки "Алмаз-5"

Тип лазера . . . . .	на $\text{CO}_2$
Мощность излучения, Вт . . . . .	800
Габариты обрабатываемых листов, м, не более . . . . .	3,0x2,5

Линейная скорость раскроя, м/мин	0,05 ... 4,0
Точность вырезания контура, мм	±0,5
Система управления	ЧПУ НЗ3-2М

Частота повторения импульсов излучения, Гц	
при длительности импульса 2,0; 2,5; 4,0 мс	0,1 ... 10
при длительности импульса 1,5 мс	До 20
Диаметр сфокусированного пятна, мкм, не менее	0,25
Скорость резки, мм/мин, не более	До 350
Потребляемая мощность, кВт, не более	12
Габаритные размеры, мм	
станка	1000×960×1200
модулятора МТ-42М	760×620×1900
Масса установки, кг	
станка	200
модулятора МТ-42М	615

Перечисленные выше установки предназначены в основном для применения в различных отраслях машиностроения. Помимо них разработаны и выпускается ряд установок для резки материалов и изделий электронной и радиопромышленности.

Установка "Квант-11М" предназначена для контурной резки полупроводниковых и диэлектрических материалов толщиной до 1 мм.

**Техническая характеристика установки "Квант-11М"**

Тип лазера	Твердотельный; $\lambda = 1,06$ мкм
Средняя мощность излучения при частоте следования импульсов 100 Гц, Вт	19
Частота следования импульсов излучения, Гц	12,5; 25; 50; 100
Длительность импульса излучения, мс	0,2
Диаметр светового пятна, мкм, не менее	30
Скорость разделения полупроводниковых пластин при глубине реза 250 мкм, см/мин	12,0
Потребляемая мощность, кВт	Не более 6
Габаритные размеры, мм	
станка	1500×700×1200
стойки питания	700×700×1700
Масса, кг	
станка	250
стойки питания	250

Установка "Квант-15" может использоваться для резки различных материалов.

**Техническая характеристика установки "Квант-15"**

Тип лазера	Твердотельный; $\lambda = 1,06$ мкм
Средняя мощность излучения, Вт	Не менее 100
Энергия излучения, Дж, не более	
при частоте импульсов 10 Гц	10
в моноимпульсном режиме	15

Установка "Квант-50" также может использоваться для резки диэлектрических материалов излучением непрерывного твердотельного лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм) мощностью до 120 Вт; габаритные размеры установки 1550×1440×1240 мм; масса — 470 кг.

Установка "Кристалл-1А" применяется для резки стеклянных трубок излучением лазера на СО<sub>2</sub> методом термораскалывания.

**Техническая характеристика установки "Кристалл-1А"**

Мощность излучения, Вт	25—40
Толщина стенок трубок, мм, не более	2
Диаметр трубок, мм	5—60
Точность резки, мм	0,1
Перпендикулярность реза, мм, не менее	0,1

Установка "Квант-20" предназначена для резки листов термически полированного стекла на заготовке. Резка осуществляется методом управляемого термораскалывания, при котором стекло разделяется по всей толщине трещиной, развивающейся за лучом твердотельного лазера на ИАГ при его движении по траектории разделения.

Возможности регулировки мощности излучения лазера, скорости перемещения обрабатываемого материала и диаметра пятна излучения на его поверхности в сочетании с фотоэлектрическим индикатором настройки позволяют легко перенастраивать установку на резку стекла различных марок и контролировать режим резки.

Бесконтактность, отсутствие отходов из зоны воздействия излучения лазера, высокое качество поверхности реза исключают загрязнение и повреждение рабочих поверхностей заготовок в процессе резки.

### Техническая характеристика установки "Квант-20"

Длина волны излучения, мкм .....	1,06
Мощность излучения, Вт ...	63
Скорость резки, мм/мин ...	60— 360
Размеры исходных листов стекла, мм .....	От 100×50×1 до 650×500×3
Ширина получаемых заготовок, мм, не более .....	150
Точность разделения, мм ...	0,2—1
Потребляемая мощность, кВт .....	10
Габаритные размеры, мм ...	1450×850×1400
Масса, кг .....	400

Установки для сверления отверстий разработаны на базе твердотельных лазеров. Большая часть установок с твердотельными лазерами работает в режиме свободной генерации. Обычно для сверления используется многоимпульсный режим, хотя некоторые установки рассчитаны на одноимпульсную обработку.

Установки с твердотельными лазерами предназначаются, в основном, для сверления относительно толстых материалов многоимпульсным методом (алмазов, часовых камней).

Типичная область применения установок с импульсными лазерами на  $\text{CO}_2$  - высокопроизводительная перфорация одноимпульсным методом тонких материалов, например, полимерных пленок.

Для получения отверстий в заготовках алмазных волок предназначены установки "Квант-9" и "Квант-9М", которые могут быть использованы также для сверления и других материалов. В установках используются импульсные лазеры на стекле с неодимом. Сверление можно выполнять одноимпульсным и многоимпульсным методами, причем при одноимпульсном методе диаметр может составлять 0,005 ... 0,4 мм, глубина - до 1 мм; при многоимпульсной обработке: диаметр - до 0,8 мм, глубина - до 3 мм. Производительность установок при лазерном сверлении алмазов в 20 раз выше, чем при использовании других электрофизических методов, и в 200 раз выше механического сверления.

### Техническая характеристика установки "Квант-9"

Энергия излучения, Дж, не более .....	8
Длительность импульса, мс ...	0,35—0,5
Частота повторения импульсов, Гц	
"Квант-9" .....	0,1—1
"Квант-9М" .....	0,1—3
Срок службы импульсной лампы накачки, тыс. вспышек ...	200

Установка "Корунд" предназначена для сверления отверстий в часовых камнях. В установке применен лазер на стекле с неодимом. Установка может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. Производительность установки - один камень в секунду. Установка снабжена автоматизированным загрузочным устройством.

### Технические данные установки "Корунд"

Энергия в импульсе, Дж ...	0,1—0,5
Частота следования импульсов, Гц .....	1,0—10,0
Длительность импульса, мс ...	0,15
Диаметр обрабатываемого отверстия, мм .....	0,03—0,15
Потребляемая мощность, кВт .....	2,0
Габаритные размеры, мм ...	600×1200×1400
Масса, кг .....	300

Для получения отверстий в рубиновых камнях предназначены установки АК-345 и АК-378, в качестве активного элемента лазера в которых используется стекло с неодимом.

### Техническая характеристика установок АК-345 и АК-378

	АК-345	АК-378
Энергия импульса, Дж ...	0,2; 0,5	1,5
Частота повторения импульсов, Гц .....	2,5	5,0
Длительность импульса, мс ...	0,25	0,25
Диаметр обрабатываемого отверстия, мкм .....	50—80	80—200
Глубина обрабатываемых отверстий, мм .....	0,5	0,75

Установка "Кристалл-6" с лазером на стекле с неодимом предназначена для обработки различных материалов, в том числе керамики, металла, рубина.

### Техническая характеристика установки "Кристалл-6"

Энергия импульса излучения, Дж .....	0,5—4
Частота повторения импульсов, Гц .....	0,5—20
Длительность импульсов, мс ...	0,2
Диаметр обрабатываемых отверстий, мм .....	0,1—0,6
Глубина обработки, мм, не более .....	3,0
Потребляемая мощность, кВт .....	4,5
Габаритные размеры, мм ...	1250×950×1300

Светолучевой станок 4P222Ф2 с программным управлением предназначен для размерной обработки различных труднообрабатываемых материалов, включая алмазы, керамику, корунд.

На станке можно выполнять следующие работы: вырезку отверстий и щелей произвольной формы в керамических пластиках деталей микроэлектроники; обработку сложных профилей алмазных волок; профилирование многогранного инструмента из искусственных сверхтвердых материалов (эльбора, карбонадо, композита).

Обработка проводится сфокусированным излучением твердотельного ОКГ на рубине с длиной волны 0,6943 мкм. В станке реализованы две схемы локализации излучения: проекционная и в фокальной плоскости. Станок оснащен многофункциональной системой ЧПУ, управляющей перемещениями стола с шаговым приводом, работой квантового генератора и приспособлений. Источник питания - на базе модулятора МТ-47.

**Техническая характеристика установки 4P222Ф2**

Энергия излучения, Дж, не более .....	2
Частота следования импульсов, Гц, не более .....	20
Длительность импульса, мкс .....	150-250
Диаметр обрабатываемых отверстий, мкм .....	50-300
Глубина отверстий при многоимпульсной обработке, мм, не более .....	10
Глубина резания при многопроходной обработке, мм, не более .....	5
Перемещение стола по двум координатам, мм, не более ..	300x100
Дискретность перемещения, мкм .....	2; 10
Точность перемещения стола (накопленная погрешность на длине 300 мм), мм .....	0,03
Система управления .....	2M43-22
Потребляемая мощность, кВт .....	12,5
Габаритные размеры, мм:	
станка .....	1520x750x1275
блока питания .....	720x620x1900
блока охлаждения .....	600x750x1400
системы ЧПУ .....	700x500x1800
Масса станка с агрегатами и электрооборудованием, кг, не более .....	1500

Оптический квантовый генератор может работать в режимах свободной генерации и генерации, модулированной ультразвуковыми колебаниями глухого зеркала с частотой 22 кГц.

Для скрайбирования полупроводниковых подложек интегральных схем применяются установки на ИАГ, а для скрайбирования диэлектрических подложек, стеклянных пластин индикаторов и других подобных материалов - скрайберы с импульсными лазерами на CO<sub>2</sub>.

Для скрайбирования полупроводниковых пластин применяются установки, снабженные лазерами на гранате с непрерывной накачкой и модуляцией добротности. Акустооптический модулятор добротности обеспечивает частоту модуляции 1 ... 50 кГц и мощность излучения в импульсе порядка нескольких киловатт при длительности 200 ... 300 нс. Установки для скрайбирования снабжаются точными координатными столами с программным управлением, оптическими системами для совмещения разграничительных дорожек скрайбируемой пластины с траекторией скрайбирования, а также устройствами для вакуумного отсоса продуктов обработки.

Глубина скрайбирования лежит в пределах 25 ... 350 мкм и зависит от скорости процесса. В тех случаях, когда ширина линии скрайбирования должна быть минимальной, лазер работает в одномодовом режиме, что достигается введением в резонатор устройств для селекции типов колебаний. При этом расходимость луча минимальна, а средняя мощность излучения не превышает 5 ... 10 Вт. Если допустимо увеличение ширины линии скрайбирования до 100 ... 150 мкм, целесообразно, чтобы лазер работал в многомодовом режиме. Благодаря увеличению средней мощности излучения в этом режиме становится возможным увеличить как глубину, так и скорость скрайбирования.

Отечественной промышленностью выпускается полуавтомат лазерного скрайбирования ЭМ-220, предназначенный для обработки полупроводниковых пластин. Полуавтомат снабжен ИАГ: Nd-лазером, работающим в режиме модулированной добротности.

Управление исполнительными механизмами осуществляется микропроцессорным устройством. Телевизионная система с увеличением 60x позволяет быстро и с высокой точностью выполнить совмещение и обеспечивает безопасность работы оператора.

Полуавтомат ЭМ-220 отличается от аналогов наличием автоматической фокусировки и программируемой перефокусировки лазерного устройства.

### Техническая характеристика установки ЭМ-220

Диаметр пластин, мм, не более .....	150
Средняя мощность излучения лазера, Вт .....	16
Глубина реза при скорости скрайбирования пластин 100 мм/с, мкм, не менее .....	150
Погрешность перемещения координатного стола на длине 150 мм, мкм .....	±15
Скорость перемещения координатного стола, мм/с ...	10—390
Дискретность изменения шага координатного стола по координатам, мм .....	0,01
Габаритные размеры, мм: установки скрайбирования .....	1040×1340×1310
блока питания и охлаждения .....	550×600×1200
Масса, кг .....	500

Появились установки с лазерами на ИАГ для обработки керамики; в США они составляют примерно 10% парка лазерного оборудования для скрайбирования керамики.

Кроме оборудования для разделения керамики и полупроводников отечественной промышленностью выпускается установка УРСР-1, предназначенная для разделения стеклопрофилита путем скрайбирования. Установка снабжена двумя отпаянными лазерами на CO<sub>2</sub> типа АГ-17 мощностью в непрерывном режиме 25 Вт каждый и двумя подвижными фокусирующими системами, перемещающимися в одной плоскости вдоль направления реза. Это позволяет проводить резку по двум противоположным плоскостям профильного стекла в виде прямоугольного короба, швеллера волнистого сечения, а также листового стекла в процессе непрерывного производства.

### Техническая характеристика установки УРСР-1

Скорость резки, м/мин, не более .....	3,5
Высота профиля, мм, не более .....	60
Ширина стекла, мм .....	600
Толщина стекла, мм .....	10
Потребляемая мощность, кВт .....	2
Габаритные размеры, мм ...	3350×1410×500

Задачи маркировки решаются двумя путями: с помощью проекционного метода и с

помощью гравирования и перфорирования символов на поверхности маркируемого изделия.

В России разработан лазерный гравировальный автомат, предназначенный для прямого изготовления офсетных форм непосредственно с оригинала, минуя фоторепродукционные и фотохимические процессы. Оригинал со штриховым или полутоновым изображением на непрозрачной или прозрачной основе закрепляется на одном цилиндре автомата, а формная пластинка - на другом цилиндре.

В качестве формного материала используется гладкая алюминиевая фольга с предварительно нанесенным лаковым подслоем, поглощающим лазерное излучение, и полимерным антиадгезионным покрытием.

Электрооптическая система построчно считывает оригинал, преобразуя оптическое изображение в электрический сигнал, который через модулятор управляет лазерным лучом. В качестве источника излучения используется лазер на CO<sub>2</sub>, работающий в непрерывном режиме генерации.

Лазерный гравировальный автомат может использоваться также для гравирования штриховых и полутоновых изображений на пластике, дереве и других неметаллических материалах или металлах с неметаллическим покрытием.

### 2.6.6. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Электронно-лучевая обработка материалов - это высокоэффективная технология, достаточно широко распространенная в отечественной и зарубежной практике при изготовлении различного рода изделий из металлических и неметаллических материалов.

Сущность процесса состоит в переходе кинетической энергии сфокусированного в вакууме пучка электронов в тепловую при взаимодействии пучка с материалом. Так как диапазоны мощности и концентрация энергии в электронном пучке велики, то практически возможно получение всех видов термического воздействия на материалы: нагрев до заданных температур, плавление и испарение с очень высокими скоростями.

Термическая размерная обработка, как правило, предназначена для изменения состава или структуры обрабатываемого материала, получения отверстий заданного диаметра или пазов заданной ширины, глубины и профиля сечения.

Результат размерной обработки зависит от поведения материала при повышении температуры. В результате термической размерной обработки происходят следующие явления:

фазовые превращения в твердом состоянии, появляющиеся, например, при закалке соответствующих сталей;

сублимация - удаление материала при выполнении отверстий, пазов, резании, гравировании алмазов, графита, кварцевого стекла;

разложение твердого материала на летучие компоненты и унос материала при резании синтетических материалов, керамики, бумаги;

разложение с образованием, по крайней мере, одного твердого компонента и удаление материала при резании, сверлении, гравировании арсенида галлия, фосфида галлия;

плавление материалов при микросварке металлов, полировании металлов и полупроводниковых материалов (кремний, германий), нанесение рисок оплавлением (кремний, германий, керамика, ферриты), легирование полупроводников путем выплавления лигатур при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;

испарение - удаление материала при резании, гравировании металлов, диэлектриков, синтетических материалов.

Обработываемость материала в основном зависит от его теплофизических свойств и удельной мощности пучка электронов. Чтобы избежать избытка жидкой фазы, добиться максимальной производительности за счет реализации резонансных режимов нагрева, обработку ведут в импульсных режимах. При этом возможны следующие технические варианты обработки: многоимпульсная, моноимпульсная, с быстрым отклонением луча.

Основные технические и экономические преимущества рассматриваемого метода заключаются в следующем:

инструмент для обработки - электронный луч - не чувствителен к твердости материала и не подвержен износу;

достаточно надежно выполняется обработка наклонных к плоскости отверстий;

размещение и форма отверстий управляется вычислительной машиной и не нуждается в разметке или смене "инструмента";

размеры отверстий составляют в диаметре от 0,05 мм (при максимальной глубине сверления 0,3 мм) до 1 мм (при максимальной глубине сверления 6 мм). Производительность перфорирования может составлять от нескольких тысяч отверстий в секунду (большой диаметр, незначительная глубина) до 10 отверстий в секунду (небольшой диаметр, большая глубина). При многоимпульсной обработке можно еще больше увеличить глубину отверстий за счет скорости обработки.

Параметрами электронного луча (ЭЛ), измеряемыми в процессе обработки, являются

сила тока луча  $I$ , ускоряющее напряжение  $U$ , сила тока фокусирующей системы  $I_{\phi}$ , рабочее расстояние  $l$  (от центра фокусирующей системы до поверхности обрабатываемой детали), скорость перемещения луча  $v$ .

При заданном рабочем расстоянии  $l$ , силе тока  $I_{\phi}$  и мощности процесса  $W$  можно определить диаметр электронного луча  $d$  и, следовательно, удельную мощность, которая является одним из определяющих параметров процесса:

$$q = IU \left( \pi d^2 / 4 \right).$$

При воздействии в импульсном режиме средняя мощность (Вт)

$$q_{\text{и}} = IU f \tau,$$

где  $I$  - сила тока импульса;  $A$ ;  $f$  - частота следования импульсов, Гц;  $\tau$  - длительность импульса, с.

Скорость обработки в импульсном режиме

$$v = B(1 - k) / (\tau + \tau_{\text{п}}),$$

где  $B$  - диаметр зоны обработки (точки);  $k$  - коэффициент перекрытия точек (0,5 ... 0,9);  $\tau_{\text{п}}$  - время паузы между импульсами, с.

$$\text{Шаг точек } s = v(\tau + \tau_{\text{п}}).$$

$$\text{Скорость обработки } v = s / (\tau + \tau_{\text{п}}).$$

Механизм поверхностной обработки электронным лучом связан со спонтанным испарением любого материала остроконечным электронным лучом. Вследствие этого в течение тысячных долей секунды образуется глубокий узкий канал. Расплавленный материал, окружающий канал, под давлением пара взрывообразно выбрасывается наружу. В результате вся технология направлена на создание энергии, достаточной для испарения и удаления расплава из зоны обработки.

Одним из механизмов, объясняющих вынос материала из зоны обработки, является механизм объемного вскипания, который существенно отличается от поверхностного испарения, которое тоже, естественно, играет определенную роль в процессе формирования отверстия.

Объемное парообразование связано с тем, что реальные металлы содержат определенное количество дефектов в виде газовых и усадочных раковин, пор, скоплений, примесей, неметаллических включений, растворенных газов. Указанные и другие возможные дефекты материала, влияющие друг на друга,

обычно называются искусственными или готовыми центрами парообразования, на которых возникают пузырьки пара в объеме расплавленного металла. Толщина слоя расплава, в котором могут протекать процессы объемного парообразования, изменяется в зависимости от плотности потока, от сотен до единиц микрометра. Толщина слоя расплава существенна для динамики данного процесса, поскольку она является верхним пределом при росте пузырька. Пузырьки, увеличиваясь в размере, достигают толщины расплава. Выходя на поверхность, они выбрасывают жидкость, заполняющую промежутки между ними. Процесс носит взрывной характер и выносит значительное количество жидкого расплава. Управляя процессом испарения и объемного вскипания добиваются необходимого качества обработки.

Углубление канала с помощью ЭЛ происходит в автоколебательном режиме: периодически испаряется слой толщиной  $\delta$ , а в промежутках ЭЛ рассеивается на стенки канала (с удельной мощностью  $q$ , на один два порядка ниже первоначальной), и образует жидкую фазу. Следовательно, процесс непрерывного воздействия ЭЛ на материал аналогичен импульсному воздействию с длительностью импульса  $\tau_n$  и временем паузы  $\tau_p$  (во время паузы не происходит углубления канала, а только образуется жидкая фаза). Если от непрерывного воздействия перейти к импульсному с длительностью импульса  $\tau = \tau_n$  и временем паузы между импульсами  $\tau_n = \tau_p$ , то вместо проплавления на некоторую глубину получим отверстие.

В зависимости от соотношения параметров процесса возможно получение различных геометрических размеров отверстий. С увеличением глубины обрабатываемого отверстия увеличивается его диаметр. Вследствие свойств электронного луча и тепловых воздействий на металл отверстие всегда имеет некоторую разность между входным и выходным диаметром. Это соотношение зависит от отношения глубины к диаметру отверстия и может колебаться в достаточно широких пределах.

Размеры и форма отверстия в значительной степени зависят от режимов обработки. Однако эти режимы можно оптимизировать только для определенного вида материала. Общие закономерности взаимосвязи режимов с геометрией отверстий можно сформулировать следующим образом:

при обработке массивных изделий из любых материалов на большую глубину необходимо обеспечить режим работы с макси-

мальной силой тока в единице телесного угла и углубления фокуса ЭЛ под поверхность детали;

при обработке тонких пленок ЭЛ должен иметь максимальный угол сходимости, а его фокус должен располагаться над обрабатываемой поверхностью;

наибольшую глубину и наименьший диаметр отверстия, полученного от действия единичного импульса, достигают при углублении фокуса ЭЛ под поверхность на  $0,1 \dots 0,3$  мм;

при постоянных прочих параметрах на скорость обработки существенное влияние оказывает длительность импульса: чем выше длительность импульса, тем выше скорость обработки;

частота следования импульса имеет оптимальные диапазоны ( $100 \dots 200$  Гц), в которых повышается производительность обработки.

Высокоэффективная обработка отверстий электронным лучом широко применяется для перфорирования различных узлов и деталей:

отверстия в частях газовых турбин для охлаждения, впрыска топлива и звукопоглощения;

перфорация для отсасывания пограничного слоя;

перфорация сит и фильтров;

изготовление отверстий в форсунках;

обработка высокотемперостойких, высокопрочных, неэлектропроводных материалов.

Импульсным электронно-лучевым воздействием возможна размерная обработка не только металлических материалов, но и неметаллических, таких как кремний, стекло, керамика.

Физические процессы, приводящие к образованию отверстий с использованием электронного луча, обеспечивают возможность осуществления еще одного технологического процесса - получения покрытий и получение пленок на поверхности материалов.

Основным преимуществом импульсного нанесения пленок электронным лучом является: высокая скорость осаждения (до  $1 \dots 10$  мкм/с); возможность получения высокочистых пленок; сохранение стехиометрического состава испаряемого материала; применимость метода не только к металлическим, но и полупроводниковым и диэлектрическим материалам.

В табл. 2.6.6 приведены сравнительные параметры производительности и эффективности некоторых процессов термического испарения [1].

### 2.6.6. Производительность и эффективность процессов термического испарения

Процесс	Затрачиваемая мощность, кВт	Производительность, г/с	Эффективность, г/(с·кВт)
Термическое испарение в вакууме	1–2	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \div +1,4) 10^{-3}$
Электронно-лучевое нанесение покрытий в вакууме (постоянный режим)	250	1,4	$6 \cdot 10^{-3}$
Плазменное распыление	30	1,4	$4,7 \cdot 10^{-2}$
Импульсное электронно-лучевое распыление	3	5,0	1,6

Импульсное электронно-лучевое распыление обладает наименьшей затрачиваемой мощностью, наивысшей производительностью и эффективностью.

Использование импульсных методов получения пленок с применением таких концентрированных источников энергии, как импульсная плазма, лазер, взрывающиеся проволочки и фольги, существенно повышают скорость испарения. Основным преимуществом импульсного нанесения пленок является крайне высокая скорость охлаждения и возможность сохранения стехиометрии состава испаряемого вещества.

Выбор режимов импульсного электронно-лучевого напыления аналогичен выбору режимов получения отверстий. Собственно высокопроизводительный процесс напыления протекает в режиме получения отверстий в испаряемом материале. Основным условием промышленной реализации метода импульсного напыления является наличие оборудования и аппаратуры, обеспечивающих устойчивую работу в течение длительного времени в импульсном режиме.

Для размерной обработки и напыления используются установки типа ЭЛУРО. Эти установки, как правило, универсальны. Установки имеют следующие особенности.

1. При высокой стабильности параметров и достаточно большой мощности формируется луч диаметром 10 ... 100 мкм. Это достигается использованием пушек с высоким ускоряющим напряжением 75 ... 200 кВ в

сочетании со стабилизированными источниками питания.

2. Управление лучом осуществляется электромагнитными отклоняющими системами, перемещающими луч по обрабатываемой заготовке на небольшой площади с высокой точностью.

3. Электронная пушка работает как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

4. Манипуляторы обеспечивают высокую точность совмещения зоны обработки с электронным лучом и дают возможность осуществить перемещение зоны обработки по программе.

5. Частота следования импульсов 1 ... 3,3 кГц, длительность импульсов 2 ... 14 мкс.

Качество получаемых отверстий при импульсной обработке в значительной степени зависит от нестабильности тока луча в электронно-лучевой пушке. В установках типа ЭЛУРО для обеспечения эффективного процесса обработки достаточно иметь нестабильность источников питания в пределах  $(1 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.И. Кокора. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

### Глава 2.7

### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

Технологические установки для ультразвуковой обработки состоят из трех основных частей (рис. 2.7.1): ультразвукового генератора УЗГ мощностью 0,04–5 кВт и рабочими частотами 18, 22 и 44 кГц, магнитострикционного или пьезокерамического преобразователя УЗП (в котором электрические колебания преобразуются в механические) и устройства УЗС-станка или ванны, в которых осуществляется рабочий процесс. Обработка основана на использовании энергии ультразвуковых колебаний. Используются четыре разновидности ультразвуковой механической обработки (рис. 2.7.2). Наиболее распространены ультразвуковая размерная обработка (рис. 2.7.2, б) и ультразвуковая интенсификация процессов резания лезвийными и абразивными инструментами, (рис. 2.7.2, г).

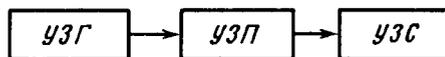


Рис. 2.7.1. Схема ультразвуковой технологической установки

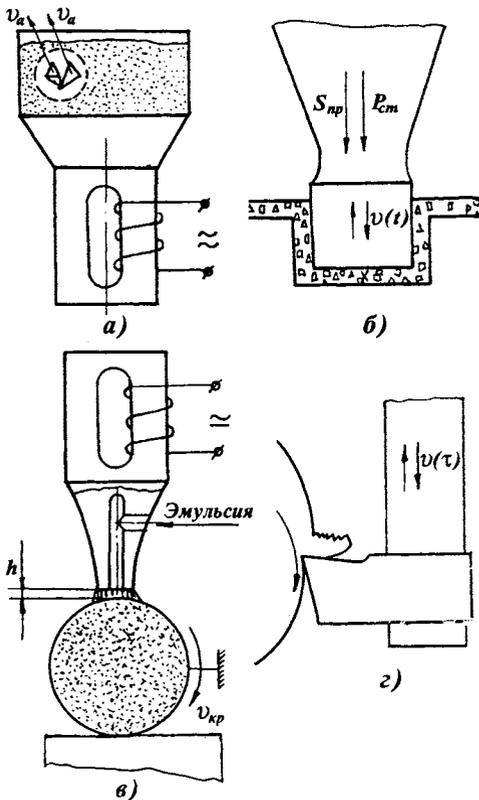


Рис. 2.7.2. Принципиальные схемы ультразвуковых методов механической обработки:

- а - ультразвуковое снятие заусенцев;
- б - ультразвуковая размерная обработка;
- в - очистка шлифовального круга;
- г - интенсификация обычных процессов резания

### 2.7.1. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

В отличие от электроэрозионной и электрохимической обработки ультразвуковой метод применим и наиболее эффективен при обработке деталей из неэлектропроводящих твердых хрупких материалов - стекла, ситаллов, керамики и др. Между инструментом (рис. 2.7.2, б), который является частью колебательной системы ультразвукового преобразователя УЗП, и обрабатываемой поверхностью прокачивается суспензия абразива (обычно карбид бора  $B_4C$ ). Чаще используются продольные колебания инструмента, но можно применять и поперечные или крутильные [1-7]. Между инструментом и обрабатываемой деталью создают статическую силу  $P_{ст}$  (сила подачи) порядка нескольких десятков ньютонов ( $P_{ст} = 20 \dots 3000$  Н). Давление подачи  $p_{ст} = P_{ст}/F_{и}$  (где  $F_{и}$  - площадь

торца инструмента) составляет  $0,1 \dots 1,5$  МПа. Возникающие при обработке динамические силы  $P_{д}$ , имеют импульсный характер и повторяются с частотой колебания инструмента. Максимальное значение силы  $P_{дmax}$  в несколько раз больше  $P_{ст}$ .

Ультразвуковая обработка основана на ударном воздействии торца инструмента на вершины наиболее крупных абразивных зерен. Этот метод состоит из двух основных процессов [7]: а) ударного вдавливания абразивных зерен, вызывающего появление трещиноватого слоя и выкальвания небольших частиц хрупкого материала; б) циркуляции и смены абразива в рабочей зоне (удаление образовавшихся частиц и доставка свежего абразива). Происходит хрупкое разрушение обрабатываемых материалов и одновременно вязкое разрушение инструмента, изготовленного из низкоуглеродистой стали.

При ударе торца инструмента по абразивным зернам вершины зерен вдавливаются в поверхностные слои детали и инструмента (рис.2.7.3). Внедрение частиц абразива в инструмент приводит только к пластическим деформациям, а в поверхностном слое хрупкой обрабатываемой детали возникает сетка микротрещин. Под влиянием напряжений, создаваемых последующими ударами торца инструмента по абразивным зернам, происходит расширение микротрещин и образование новых - создается зона предразрушения. Выкальвание частиц происходит в моменты, когда максимальные касательные напряжения в зоне вдавливания превосходят сопротивление сдвигу. Вода, несущая абразив, расширяет микротрещины, облегчает образование выколов, а также доставляет свежий абразив в зону обработки и охлаждает инструмент и деталь.

Все технологические характеристики - производительность процесса, качество поверхности, точность обработки и износ инструмента зависят от многих акустических и технологических параметров - амплитуды  $A$  и частоты колебаний  $f$ , физико-механических свойств обрабатываемого материала абразива, зернистости абразива  $d_a$ , вязкости абразивной суспензии, кинематической схемы, площади инструмента, силы подачи  $P_{ст}$  и глубины обработки  $h$ .

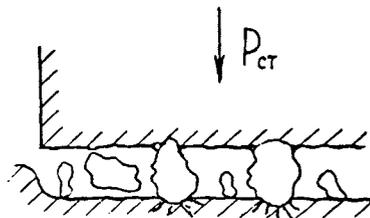


Рис. 2.7.3. Рабочая зона ультразвуковой обработки

Наиболее эффективно обрабатываются материалы I группы (табл. 2.7.1), имеющие критерий хрупкости  $t_x \geq 2$  ( $t_x = \tau_p / \sigma_p$ ,  $\tau_p$  - сопротивление материала сдвигу;  $\sigma_p$  - сопротивление на отрыв). Производительность процесса  $V$  пропорциональна  $t_x^2$ .

Производительность

$$V = K(A^2 P_{ст}^m f^n F_n)$$

где коэффициент  $K$  зависит от концентрации

абразива в суспензии, твердости обрабатываемого материала и абразива, а также от среднего размера зерен;  $A$  - амплитуда колебаний, мкм;  $P_{ст}$  - статическая сила, Н;  $f$  - частота колебаний, кГц;  $F_n$  - площадь торца инструмента, мм<sup>2</sup>;  $m$  и  $n$  - показатели степени, зависящие от свойств материала детали и абразивной суспензии (их значение изменяются от 0,5 до 1 в зависимости от условий обработки).

Указанная зависимость справедлива до некоторого предельного значения  $P_{ст.пр}$ , которое определяется скоростью смены абразива и амплитудой колебаний инструмента.

### 2.7.1. Области применения ультразвуковой обработки

Группа материала	Материал	Критерий хрупкости	Вид деформации	Характер разрушения	Область применения
I	Стекло, ситалл, кварц, керамика, феррит, германий, кремний, агат и др.	$t_x \geq 2$	Упругая	Хрупкий	Изготовление деталей из керамики, стекла, кварца, ферритов, минералов. Обработка полупроводниковых материалов
II	Вольфрам и его сплавы, твердые сплавы, закаленные на высокую твердость, цементированные стали, титановые сплавы	$1 < t_x < 2$	Упруго-пластическая	Хрупкий после упрочнения в результате микропластических деформаций	Изготовление фильер штампов, высадочных матриц, деталей сложной формы из вольфрама и твердых сплавов
III	Медь, свинец, мягкие стали и др.	$t_x < 1$	Пластическая	Разрушение практически не наблюдается	Ультразвуковой метод нецелесообразен

Главное движение при размерной ультразвуковой обработке - колебания инструмента. Средняя скорость главного движения  $v = 4fA/10^3$ , м/с. Подача может быть продольной  $S_{пр}$ , поперечной  $S_{пп}$  и круговой  $S_{кр}$  (вращение инструмента или заготовки). В зависимости от вида подачи, а также формы поперечного сечения инструмента, можно реализовать различные кинематические схемы ультразвуковой обработки. На рис. 2.7.4 приведены кинематические схемы ультразвуковой обработки при использовании продольной и поперечной подачи:  $a$  - обработка глухих отверстий;  $b$  и  $г$  - обработка сквозных отверстий кольцевым инструментом;  $в$  - прошивание сквозных отверстий;  $д$  - разрезание и прорезка канавок;  $е$  - обработка канавок и разрезка заготовок большой длины;  $ж$  и  $з$  -

обработка фасонных поверхностей;  $и$  и  $к$  - обработка плоскостей;  $л$  - обработка плоскостей боковой поверхностью инструмента.

Эффективна обработка деталей многоместным (групповым) инструментом. Применение таких инструментов, позволяющих обрабатывать несколько десятков отверстий, является прогрессивным направлением в технологии ультразвуковой обработки [6, 7].

В табл. 2.7.2 приведены различные параметры ультразвуковой обработки. При увеличении амплитуды  $A$  и частоты  $f$ , а также зернистости абразива  $d_a$  производительность процесса  $V$  возрастает до определенного предела. Существует оптимальное отношение  $2A/d_a$  равное 0,6 ... 0,8, при котором наблюдается максимальное значение производительности (рис. 2.7.5).

## 2.7.2. Основные технологические параметры ультразвуковой обработки

I. Параметры, определяющие производительность V			II. Параметры, определяющие качество						
Энергетические			Шероховатость поверхности Rz, мкм						
1. Амплитуда колебаний A, мкм Средняя скорость колебательных движений, м/с	15-45 0,6-7	$V = C_1 \times (p_{ст} A^2)^n \sqrt{f}$ ,  $n = 0,5 \div 1$	1. Зернистость, мкм: при обработке стекла при обработке твердого сплава	80-125 40/20 20/10	40-60 20/10 10/6,3	20-40 10/6,3 6,3/3,2	6-14 6,3/3,2 3,2/1,6	Rz для стенки/ дна	
2. Рабочее давление $p_{ст}$ , МПа	0,1-1,5 (до 6 при прокачке под давлением)		2. Кавитационно-абразивная эрозия (лунки глубиной 0,1-0,2 мм)	Стенок	0,3-80% поверхности для зерна 3-12				
3. Частота колебаний f, кГц	18 и 22		Дна	Недостаточно изучена					
4. Удельная мощность $W$ , Вт/мм <sup>2</sup>	1-5 (не ниже 0,5-1,2)	3. Неравномерность подачи суспензии			Местный износ до 0,2-0,4 мм				
5. Добротность колебательной системы Q	25-250 при холостом ходе	4. Предел текучести материала инструмента			Местные каверны с 1 -0,2 мм				
6. Стабильность частоты $\Delta f$ , Гц	Не менее 10-50	<b>Точность формы, мм</b>							
7. Резонансные свойства изделия	Оптимум-антирезонанс	1. Износ инструмента		Продольный $\Delta l$ , мм/мин		0,05 – 0,12			
8. Потери в концентраторе, %	Не более 15-20			Поперечный $\Delta d$ , мм		0,004 – 0,035			
<b>Абразивной суспензии</b>			Скругление кромок		Не изучено				
1. Твердость абразива	12-15	По Риджуэю	Конусообразность (влияет давление)		Не изучено				
2. Зернистость $d_a$ , мкм	От 7-14 до 80-125	$V = C_2 \times$  $\times k d_a / \eta \times$  $\times (1 - \gamma \tau)$ ; $A = (0,3 \dots 0,4) \times$  $\times d_a$	2. Размер зерна абразива		0,01-0,04 мм для зерна М14 - №10 (твердый сплав)				
3. Концентрация абразива k, %	До 45-55		3. Поперечные колебания инструмента		Местные изъяны до 0,4 мм				
4. Динамическая вязкость жидкости $\eta$ , Па·с	0,005-0,01	4. Точность установки, мкм		5-40 в зависимости от точности обработки базы					
5. Температура $\tau$ , °С	20-30								

Продолжение табл. 2.7.2

6. Активные добавки, %	0,025-0,100	Хлористое железо	5. Боковой отжим инструмента	0,16 мкм/Н			
7. Гидростатическое давление, МПа	До 0,6-0,8	$A < 10$ мкм	6. Вращение инструмента	$v_{\text{окр}} = 10$ м/мин			
8. Давление прокачки суспензии, МПа	-0,02±0,05		<i>III. Эксплуатационные параметры</i>				
<b>Размерные</b>			1. Практическая скорость обработки, мм/мин	Стекло 0,8-6	4. Энергоемкость обработки, кВт·ч/см <sup>3</sup>	Стекла Твердого сплава	0,03 – 0,10 3 – 5
1. Обрабатываемая площадь $F$ , мм <sup>2</sup>	Для $F = 10 \pm \div 1000$	$V = C_3 F^m$		Твердый сплав 0,03-0,2			
2. Глубина $h$ , мм [ $h = (2 \div 5)d$ ]	Для $h > 1$ без прокачки	$V = V_0 e^{-\varepsilon h}$	2. Износ инструмента, мм/мин	0,05 – 0,12	5. Уровень шумов, дБ		70 – 90
3. Длина волны $l$ , мм	240-840	$V = V_0 e^{-\beta l}$	3. Расход абразива г/(мин·см <sup>2</sup> )	0,4 – 0,6	7. Надежность оборудования		3 года

**Обозначения:**  $V$  - производительность процесса;  $C_1, C_2, C_3$  - постоянные, зависящие от свойств материала детали и абразивной суспензии;  $P_{\text{ст}}$  - статическая сила, Н;  $d_a$  - средний размер абразивных зерен;  $m$  и  $n$  - показатели степени, зависящие от условий обработки;  $\tau$  - время обработки;  $\gamma$  - постоянная, зависящая от площади инструмента;  $\beta$  - постоянная концентратора [14];  $\varepsilon$  - характеризует свойства материала и равна 0,1 ... 0,5.

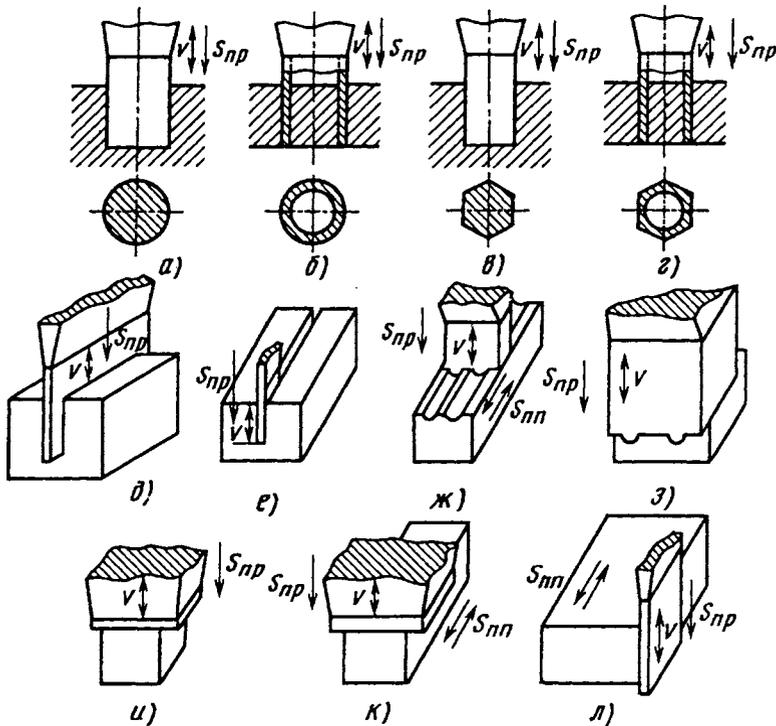
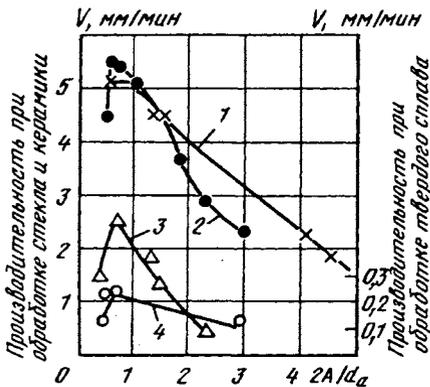


Рис. 2.7.4. Кинематические схемы ультразвуковой обработки

Рис. 2.7.5. Зависимость линейной производительности от отношения  $2A/d_a$ :

1 - 2 стекло; 3 - керамика; 4 - твердый сплав

На рис. 2.7.6 приведена зависимость производительности  $V$  и  $S$  от рабочей площади  $F_n$  торца инструмента при обработке твердого сплава и керамики, на рис. 2.7.7 - стекла. Существует оптимальное значение статической силы  $P_{ст.}$ , при котором величина  $V$  максимальна. Значение  $p_{ст}$  находится

в пределах  $p_{ст.опт.} = 0,05 \dots 2$  МПа ( $0,5 \dots 20$  кгс/см<sup>2</sup>).

Технологические характеристики ультразвуковой обработки различных материалов приведены в табл. 2.7.3. Относительная обрабатываемость  $K_V$  различных материалов и износ инструмента  $q$  приведены в табл. 2.7.4. Относительная обрабатываемость  $K_V$  - это отношение производительности  $V$  обработки данного материала к производительности обработки эталонного материала  $V_3$  (например, оптического стекла К8:  $K_V = V/V_3$ ). Износ инструмента - это отношение объема снятого материала к объему изношенной части инструмента (в процентах). Шероховатость обработанной поверхности зависит от зернистости абразива (рис.2.7.8).

Точность обработки, так же как и шероховатость, определяются в основном зернистостью абразива, причем достижимая точность тем выше, чем мельче абразив. Подвод суспензии под давлением (нагнетанием) или вакуумный отсос позволяют стабилизировать процесс подачи свежего абразива в зону обработки и значительно повысить производительность процесса (до 5 раз), увеличить глубину обработки и повысить точность обработки.

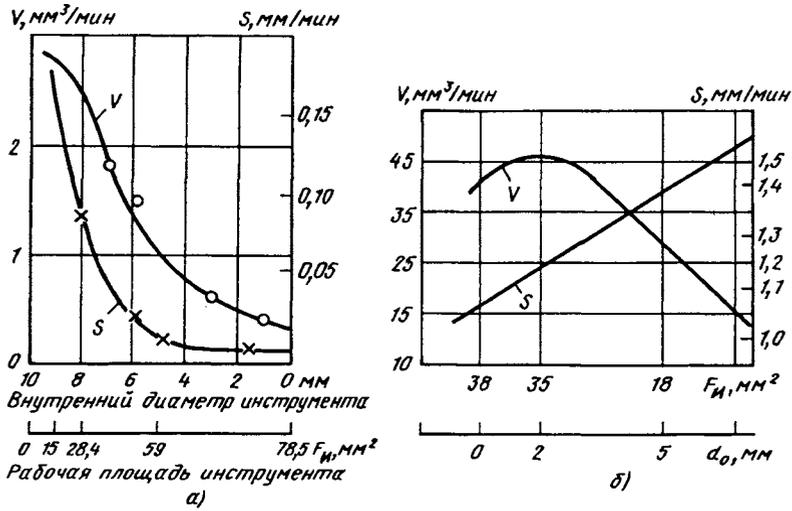


Рис. 2.7.6. Зависимость производительностей  $V$  и  $S$  от площади инструмента  $F_n$  при обработке: а - твердого сплава; б - керамики

2.7.3. Технологические характеристики ультразвуковой обработки

Обрабатываемый материал	Производительность $S$ , мм/мин	Относительный износ инструмента $q$ , %	Шероховатость $R_a$ , мкм	Точность обработки, мм
Стекло, ситалл	5–20	0,5–1	1,25–5	0,02–0,1
Керамика 22ХС, ЦМ332	2–6	2–10	0,63–2,5	0,05–0,1
Твердые сплавы ВК	0,05–0,3	40–100	0,32–2,5	0,02–0,05
Германий, кремний, феррит	3–8	1–2	0,63–1,25	0,03–0,10
Закаленная сталь	0,05–0,1	120–200	0,32–2,5	0,03–0,10
Жаропрочные сплавы	0,02–0,03	150–200	0,63–2,5	0,08–0,10

2.7.4. Обрабатываемость материалов

Обрабатываемый материал	Относительная обрабатываемость $K_y$	Относительный износ инструмента $q$ , %
1	2	3
Техническое стекло, оптическое стекло К8	1	0,5–1,0
Мрамор	2,5	0,2–0,4
Германий	1–1,5	0,5
Кремний	0,75–1,0	1,0
Феррит	0,7–0,8	1,5
Агат	0,5–0,75	1,0–1,5
Кварц	0,5–0,6	1,5–2,0
Конструкционная керамика	0,2–0,4	2–5

Продолжение табл. 2.7.4

1	2	3
Рубин, сапфир	0,1–0,2	10–15
Твердые сплавы	0,02–0,03	20–40
Конструкционные стали	0,01	100
Медь, латунь	0,01–0,015	110
Алмаз	0,005	500–1000

В табл. 2.7.5 приведены данные, характеризующие зависимость точности ультразвуковой обработки от зернистости абразива В<sub>4</sub>С и способы подачи абразивной суспензии.

### 2.7.5. Точность ультразвуковой обработки

Параметры точности	Способ подачи абразивной суспензии	Зернистость карбида бора (размер зерна, мкм)		
		№10 (88-125)	№5 (46-62)	№3 (28-14)
Зазор на входе инструмента, мм	Полив	0,28–0,36	0,22–0,26	0,11–0,13
	Нагнетание	0,33–0,53	0,24–0,27	0,12–0,14
Допуск на зазор, мм	Полив	0,08	0,04	0,02
	Нагнетание	0,05	0,03	0,02
Достижимая точность, мм	Полив	0,04	0,02	0,02
	Нагнетание	0,025	0,015	0,01
Конусность отверстий, угл. мин	Полив	180	120	75
	Нагнетание	20–45	30	15–20

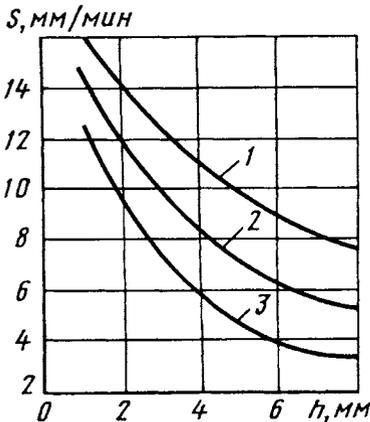


Рис. 2.7.7. Зависимость производительности  $S$  ультразвуковой обработки стекла кольцевым инструментом от глубины  $h$ :

1 - инструмент с обратной конусностью, деталь имеет принудительное вращение; 2 - инструмент с обратной конусностью; 3 - инструмент цилиндрический (абразив - карбид бора зернистостью 6)

Для повышения производительности УЗ обработки материалов II группы (см. табл.

2.7.1) - вольфрама, молибдена, твердых сплавов и других электропроводящих материалов целесообразно совмещать УЗ обработку с электрохимическим процессом анодного растворения [6-7, 15]. Последнее разупрочняет удаляемый припуск, позволяя в 5-10 раз увеличить производительность процесса и уменьшить износ инструмента, в 3-5 раз снизить энергоемкость процесса, заменить карбид бора более дешевым абразивом - карбидом кремния.

При ультразвуковой обработке твердых сплавов, по сравнению с другими электрофизическими методами, достигается более высокое качество поверхностного слоя: образуются сжимающие остаточные напряжения. Поэтому повышаются износостойкость и сопротивление усталости твердосплавных штампов, матриц пресс-форм, фильер и других деталей, обрабатываемых ультразвуковым методом.

Совмещенный способ ультразвуковой обработки проводится на станках 4Б772, 4Д772Э и 4Д772ЭФ.

Различные способы повышения производительности процесса и точности ультразвуковой обработки приведены в [4, 6, 7, 15].

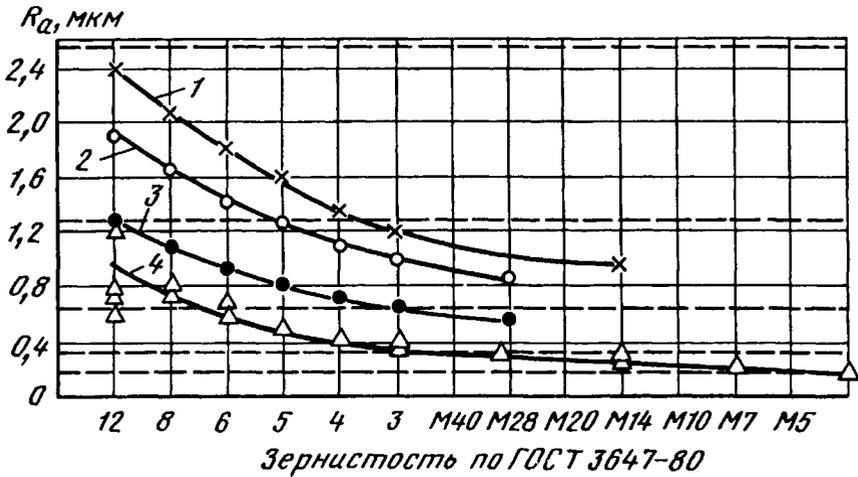


Рис. 2.7.8. Зависимость Ra от зернистости абразива:

1 - стекло; 2 - кремний; 3 - керамика на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4 - твердый сплав ВК8

Мощность серийно выпускаемых универсальных и специализированных ультразвуковых станков изменяется в широких пределах (0,04 ... 4 кВт), что позволяет вести обработку деталей различных размеров, например, с отверстиями диаметром 0,1 ... 100 мм.

Установки и станки для ультразвуковой обработки хрупких материалов бывают: 1) переносные, обычно малогабаритные уста-

новки небольшой мощности, применяемые для маркирования и обработки отверстий и канавок на небольшую глубину; 2) стационарные установки - ультразвуковые станки.

Наибольшее применение получили стационарные ультразвуковые станки с вертикальным расположением оси акустической головки.

2.7.6. Технические характеристики ультразвуковых станков

Характеристика	4Б771Ф11	4А771П	4Д772ЭФ	МЭ372	МЭ374	МЭ76
Мощность генератора, кВт	0,25	0,4	1,6	0,4	0,25	0,1
Предельные размеры обрабатываемых отверстий, мм	0,8-50	До 60	До 80	0,4-12	0,05-2	0,12-1,6
Оптимальная площадь обработки сплошным инструментом, мм <sup>2</sup>	500	180	750	750	750	750
Наибольшая производительность, мм <sup>3</sup> /мин						
по стеклу	До 3000	1500	5600	5600	5600	5600
по твердому сплаву	До 20	15	800	800	800	800
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	350	350-2500	350-2500	350-2500	100-3500	1000
Точность позиционирования стола, мкм	20	10	20	15	3	3
Диапазон усилий подачи, Н	5-80	1-80	До 300	0,3-25	0,05-2	0,2-4
Габаритные размеры, мм	1950× ×1100× ×1900	1400× ×785× ×1800	4260× ×1950× ×1850	1920× ×1050× ×1450	1250× ×1050× ×1450	1180× ×650× ×1450
Масса, кг	650	850	1800	910	150	250

В зависимости от выходной мощности генератора различают ультразвуковые станки: 1) малой мощности (0,04 ... 0,25 кВт); 2) средней мощности (0,4 ... 1,6 кВт); 3) большой мощности (до 4 кВт). В табл. 2.7.6 приведены технические характеристики универсальных и специальных ультразвуковых станков. Станки МЭ76, МЭ374 специальные, предназначенные для обработки алмазных волок, а МЭ372 - для получения прецизионных отверстий в подложках из керамики, феррита, стекла.

Причинами, ограничивающими применение УЗ размерной обработки деталей из хрупких материалов на существующих станках, являются сравнительно небольшая глубина  $h$  ( $h < 30$  мм) и площадь обработки, большой износ инструмента. Поэтому этот метод наиболее целесообразен при изготовлении неглубоких отверстий сложной формы. Обработка глубоких отверстий ( $h$  до 500 мм) цилиндрической и конической формы наиболее эффективна вращающимися алмазными инструментами, которым сообщаются ультразвуковые колебания с амплитудой  $A = 10 \dots 12$  мкм. Здесь отпадает необходимость подачи абразивной суспензии (в рабочий зазор подается только вода), так как роль абразивных частиц играют зерна алмаза. Это позволяет резко повысить производительность процесса, увеличить точность обработки, снизить расход алмазов, в 10 раз увеличить глубину обработки без снижения производительности.

### 2.7.2. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ АЛМАЗНОЕ СВЕРЛЕНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ И АЛМАЗНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Одним из наиболее перспективных направлений интенсификации обработки деталей из хрупких неметаллических материалов является ультразвуковая обработка алмазными инструментами [6, 8-11, 16-18].

Основным механизмом локального разрушения хрупких материалов при алмазно-абразивной обработке является возникновение и распространение на некоторую глубину микро- и макротрещин, которые, пересекаясь между собой, создают механически ослабленный слой, легко разрушающийся при повторном воздействии абразивных зерен. При вдавливании алмазного зерна вначале образуется кольцевая трещина, переходящая в дальнейшем (вторая стадия), в конусообразную трещину. При действии на поверхность детали критической силы  $P_k$  возникает кольцевая трещина диаметром  $d$ :

$$d = 2,2\sqrt{\frac{rP_k}{E}},$$

где  $r$  - радиус рабочей части зерна;  $E$  - модуль упругости обрабатываемого материала.

При воздействии ультразвука, как уже указывалось, возникает динамическая сила, которая в несколько раз выше статической силы. Поэтому сила  $P_k$  и возникновение трещины достигаются на более ранней стадии нагружения. Этим и объясняется ультразвуковая интенсификация процессов механической обработки хрупких материалов. Глубина распространения трещины определяется величиной приложенной нагрузки, состоянием поверхностного слоя и свойствами обрабатываемого материала.

Ультразвуковую алмазную обработку (УЗАО) можно проводить:

1) с постоянной статической нагрузкой (как при ультразвуковой размерной обработке свободным абразивом), когда имеет место непрерывный контакт инструмента и детали при постоянном статическом давлении;

2) с постоянной принудительной подачей, причем величина минутной подачи постоянна, а инструмент и деталь находятся под действием переменной силы. Этот метод может быть реализован на обычных металлорежущих станках, например, фрезерных.

Эффективность процессов УЗАО зависит от следующих технологических характеристик:

а) объемная производительность ( $\text{мм}^3/\text{мин}$ ) при сквозном сверлении трубчатым инструментом

$$V = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)h}{4\tau},$$

где  $D_2$  - диаметр обработанного отверстия, мм;  $D_1$  - диаметр вырезанного цилиндра (сердечника), мм;  $h$  - глубина обработки, мм;  $\tau$  - время обработки, мин.

При фрезеровании

$$V = bhl/\tau,$$

где  $b$ ,  $h$ ,  $l$  - ширина, глубина и длина паза, мм, соответственно;

б) минутная подача (линейная производительность) (мм): при сверлении  $S = h/\tau$ ; при фрезеровании  $S = l/\tau$ ;

в) относительный объемный износ  $qV = \frac{V_n}{V_M} 100\%$ , где  $V_n$  - объем изношенной части инструмента,  $\text{мм}^3$ ;  $V_M$  - объем снятого материала,  $\text{мм}^3$ ;

г) относительный расход алмазов

$$q = 0,875k \frac{V_n}{\gamma V_M},$$

где  $k$  - процентная массовая концентрация алмазов в связке;  $\gamma$  - плотность обрабатываемого материала,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

**Сверление глубоких отверстий.** Технологические характеристики ультразвукового алмазного сверления отверстий при  $h > (10 \dots 100)D$  зависят от статической нагрузки  $P_{ст}$ , окружной скорости и амплитуды колебаний  $A$  (рис. 2.7.9). Оптимальная производительность достигается при  $P_{ст} = 3$  МПа (30 кгс/см<sup>2</sup>). Эта величина превышает в 5-10 раз значение  $P_{ст}$  при ультразвуковой размерной обработке.

При оптимальном значении  $P_{ст}$  создается такое среднее расстояние между рабочим торцом сверла и деталью, при котором обеспечиваются оптимальные соотношения между

глубиной вдавливания алмазных зерен и удалением шлама из рабочего зазора. Износ инструмента  $q_V$  увеличивается вследствие роста нагрузки на зерна. Однако значение  $q_V$  невелико: при  $P_{ст.опт}$  износ  $q_V = 0,1 \dots 0,12\%$ , т.е. в 10 раз и более меньше, чем при обработке суспензией карбида бора. Увеличение частоты вращения сверла  $n$  вызывает рост производительности (рис. 2.7.9, б), а износ инструмента  $q_V$  имеет минимум при  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>.

При увеличении амплитуды колебаний  $A$  (рис. 2.7.9, в) до 10 ... 11 мкм растут производительность  $V$  и  $S$  и снижается расход алмазов. При  $A > 11$  мкм  $V$  и  $S$  снижаются из-за чрезмерного увеличения знакопеременной нагрузки на алмазные зерна и уменьшения прочности связи. При этом расход алмазов  $q_V$  растет. Увеличение частоты колебаний  $f$  от 22 до 44 кГц вызывает увеличение производительности на 25% и в 2-3 раза растет износ алмазов  $q_V$ . Эффективность процесса зависит от характеристик алмазного инструмента: при увеличении концентрации  $k$  до 150% производительность растет в 1,6 раза, а износ  $q_V$  практически не меняется (рис. 2.7.10, а). Дальнейшее увеличение  $k$  вызывает резкий рост  $q_V$  и снижение производительности.

При увеличении зернистости алмаза от 50/40 до 125/100 растет производительность (рис. 2.7.10, б). Дальнейший рост ее снижает  $V$  и  $S$ : при 200/100 производительность уменьшается в 1,8-1,9 раза. Зависимости производительности и износа алмазов при сверлении кварцевого стекла имеют вид:

$$S = 25 + 31 \exp \left[ - \frac{(d_a - d_{a \text{ опт}})}{2400} \right];$$

$$q_V = 0,157 - 0,47 \cdot 10^{-3} d_a,$$

где  $d_{a \text{ опт}}$  - оптимальный размер зерна, мкм ( $d_{a \text{ опт}}$  зависит от амплитуды колебаний  $A$ :  $d_{a \text{ опт}} \approx 0,15A$ ).

При увеличении глубины обработки  $h$  от 50 до 200 мм производительность сверления снижается незначительно (рис. 2.7.11) и несколько возрастает износ  $q_V$ .

$$S = 80 \left[ 1 - \exp \left( - \frac{320}{h} \right) \right];$$

$$q_V = 0,14 \exp \left( - \frac{75}{h} \right).$$

При сверлении с принудительной подачей необходимы такие режимы резания, чтобы статическая сила  $P_{ст}$  не превышала  $P_{ст \text{ опт}}$ .  $P_{ст} \leq (0,7 \dots 0,8)P_{ст \text{ опт}}$ .

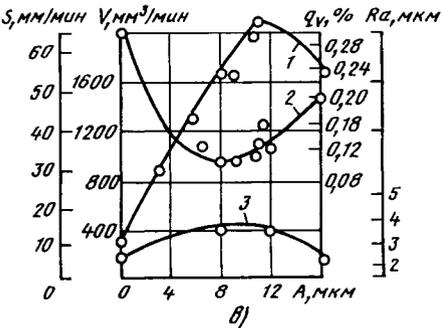
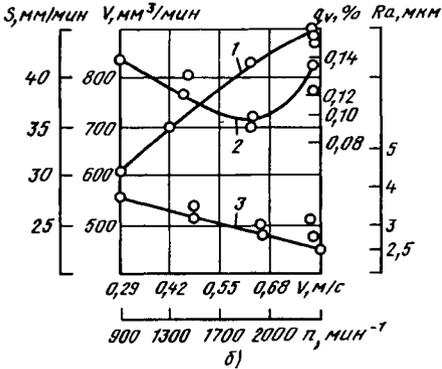
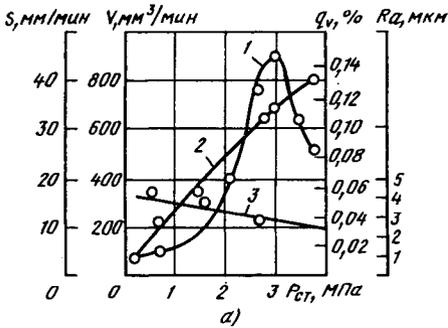


Рис. 2.7.9. Зависимости производительностей  $V$  и  $S$  (кривая 1), износа  $q_V$  (кривая 2), шероховатости  $Ra$  (кривая 3) ультразвукового алмазного сверления: а) от статической силы  $P_{ст}$ ; б) от частоты вращения  $n$ ; в) от амплитуды колебаний инструмента  $A$

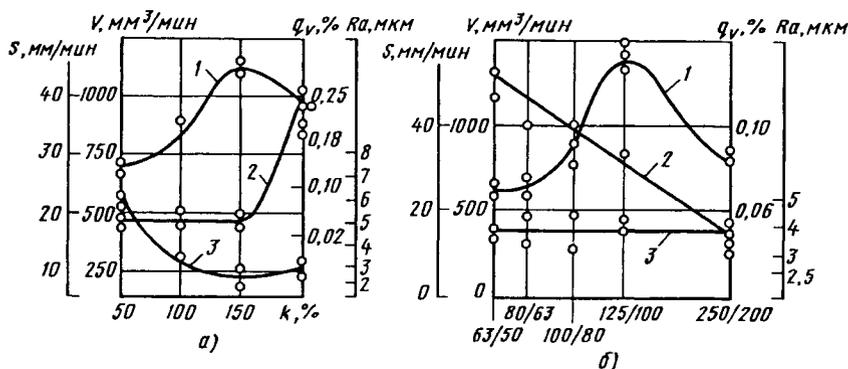


Рис. 2.7.10. Зависимость производительностей  $V$  и  $S$  (кривая 1), износа  $q_v$  (кривая 2), параметра  $Ra$  (кривая 3) ультразвукового сверления: а) от концентрации алмазов; б) от зернистости алмазов

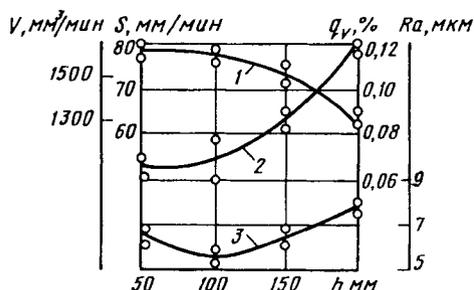


Рис. 2.7.11. Зависимость производительностей  $V$  и  $S$  (кривая 1), износа  $q_v$  (кривая 2), параметра  $Ra$  (кривая 3) ультразвукового сверления от глубины обработки  $h$

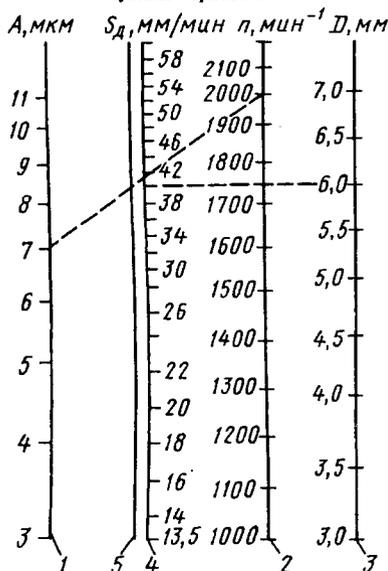


Рис. 2.7.12. Номограмма для выбора режимов ультразвукового алмазного сверления

Значение максимальной допустимой подачи  $S_d$  можно найти по номограмме (рис. 2.7.12): по заданным  $A$  и  $n$  (шкалы 1 и 2) соединяем точки прямой, а точку пересечения этой прямой со шкалой 5 соединяем с размером  $D$ . На номограмме приведено решение по данным:  $A = 7 \mu\text{m}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  и  $D = 6 \text{ mm}$ . Здесь  $S_d$  равна 40 мм/мин.

В табл. 2.7.7 приведена обрабатываемость различных материалов при ультразвуковом алмазном сверлении.

**Сверление глухих отверстий.** Процесс сверления глухих отверстий, в отличие от обработки кольцевыми сверлами, имеет особенности: большую площадь рабочего торца инструмента, ухудшение подачи СОЖ и удаление шлама. Инструмент должен обладать высокой кромкостойкостью и износостойкостью, чтобы дно обрабатываемого отверстия было плоским.

Алмазный инструмент для обработки глухих отверстий имеет длину  $L$ , кратную полуволновой длине ( $L = i\lambda/2$ ;  $i = 1; 2 \dots$ ).

Для уменьшения трения корпуса его наружный диаметр должен быть меньше наружного диаметра алмазного слоя на 0,2 ... 0,3 мм. Отношение рабочей площади торца  $F_p$  к общей площади торца  $F_n$  должно находиться в пределах  $F_p/F_n = 0,7 \dots 0,8$ .

При увеличении статического давления  $p_{ст}$  до 6 ... 7 МПа значительно растет производительность, дальнейший рост  $p_{ст}$  приводит к резкому увеличению износа сверл.

При обработке отверстий в кварцевом стекле и ситале с рабочей площадью  $F_p = 0,75 \dots 0,9 \text{ cm}^2$  оптимальное статическое давление  $p_{ст} = 6 \dots 7 \text{ МПа}$ . При этом производительность составляет 2000...3000 мм<sup>3</sup>/мин. Оптимальное значение амплитуды  $A_{опт}$  составляет 10 ... 12 мкм. Производительность ультразвуковой обработки глухих отверстий по сравнению с обычной алмазной обработ-

## 2.7.7. Обрабатываемость материалов при ультразвуковом алмазном сверлении

Материал	Производительность		Коэффициент обрабатываемости $K_S$	Износ инструмента	
	$V$ , мм <sup>3</sup> /мин	$S$ , мм/мин		$q_V$ , %	$q$ , карат/м
Стекло:					
К8	2106	97	1	0,097	0,139
техническое	2688	129	1,34	0,018	0,025
ЛФ5	2580	123	1,27	0,123	0,176
кварцевое	2189	98	1,01	0,071	0,102
ТФ3	1994	91	0,94	0,105	0,150
Ситалл:					
СТЛ-6	2020	96	0,99	0,057	0,082
СТЛ-7	1796	90	0,93	0,058	0,083
СТБ-1	1685	77	0,80	0,130	0,186
ЛЗ-40	1436	66	0,68	0,064	0,092
СТЛ-10	542	25	0,26	0,145	0,207
Керамика ЦМ332	556	25,5	0,26	0,170	0,243
Технический фарфор	2220	103	1,07	0,029	0,041
Рубин синтетический	342	15,6	0,16	0,495	0,708

кой ( $A = 0$ ) повышается в 8-10 раз, а износ инструмента снижается в 3-4 раза.

Рекомендуемая частота вращения сверл диаметром  $D = 4 \dots 10$  мм должна быть не менее  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , а для  $D = 12 \dots 16$  мм - не менее  $2000 \text{ мин}^{-1}$ .

Обрабатываемость материалов при ультразвуковом алмазном сверлении ( $D = 6$  мм; АСК 125/100 150% связка М5-10) приведена в табл. 2.7.7.

**Фрезерование пазов и канавок.** Для обычной алмазной обработки канавок необходимо применять высокие частоты вращения ( $n > 10^4 \text{ мин}^{-1}$ ). Использование ультразвука позволяет вести высокопроизводительную обработку при частотах вращения в 10-15 раз меньших, чем при обычной алмазной обработке. Эффективность процесса ультразвукового алмазного фрезерования существенно зависит от характеристик и конструкции инструмента. Наиболее просты и надежны инструменты с одной торцевой и несколькими винтовыми канавками на цилиндрической части (рис. 2.7.13). Соотношение между наружным диаметром алмазного слоя  $D$  и

высотой его  $H$ :  $D/H = 0,85 \dots 1,7$ . Отношение  $F_p/F_a = 0,8 \dots 0,9$ . Оптимальное статическое давление при обработке технического стекла  $p_{ст} = 4 \dots 5 \text{ МПа}$  и  $5 \dots 55 \text{ МПа}$  для кварцевого стекла и ситаллов. Износ инструмента минимален при амплитуде  $A = 6 \dots 8 \text{ мкм}$  и в 6 раз меньше, чем при обычной алмазной обработке ( $A = 0$ ). Шероховатость поверхности зависит главным образом от зернистости алмазов и минутной подачи  $S$  (табл. 2.7.8).

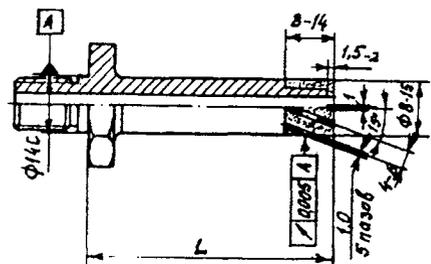


Рис. 2.7.13. Алмазный инструмент для фрезерования канавок

## 2.7.8. Зависимость шероховатости от подачи и зернистости алмазов

Ra, мкм	S, мм/мин	Зернистость	Ra, мкм	S, мм/мин	Зернистость
0,63	20	63/50—50/40	5,2	20—30	400/315—250/200
1,25	20—30	160/125—63/50	7,3	40—60	400/315—250/200
2,5	20—30	250/200—160/125			

В табл. 2.7.9 приведена обрабатываемость материалов при ультразвуковом алмазном фрезеровании.

2.7.9. Обрабатываемость материалов при ультразвуковом алмазном фрезеровании  
( $A = 10$  мкм,  $p_{ст} = 5,5$  МПа,  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>,  $t = 6$  мм, АСК 160/125-100%, М5-М10)

Характеристика	Материал						
	Стекло					Ситалл	Керамика
	К8	ТФ-3	ЛФ-5	Кварцевое	Техническое	СО115	ЦМ332
$V$ , мм <sup>3</sup> /мин	5752	7602	7378	6428	6323	5540	2809
$S$ , мм/мин	81,7	113,3	104,8	97,4	95,8	76,3	40
Коэффициент обрабатываемости	1	1,32	1,28	1,12	1,1	0,96	0,49
Износ $q_v$ , %	0,049	0,017	0,043	0,025	0,026	0,019	0,46
Ra, мкм	2,18	2,32	1,93	1,81	2,61	2,12	1,43

**Ультразвуковое оборудование для алмазной обработки.** В Японии, США, Германии для этой цели разработаны специальные ультразвуковые станки. При изготовлении деталей небольшими партиями целесообразно применять ультразвуковые головки с пьезокерамическими преобразователями, которые быстро монтируются на существующих металлорежущих станках (сверлильных, фрезерных, расточных), в том числе и с ЧПУ.

В табл. 2.7.10 приведены характеристики ультразвуковых головок, разработанных в МАИ.

## 2.7.3 УЛЬТРАЗВУКОВОЕ СНЯТИЕ ЗАУСЕНЦЕВ

Эрозионная активность звукового поля существенно возрастает при добавлении в жидкость мелких абразивных зерен, радиус которых соизмерим с радиусом действия ударной волны, возникающей при захлопывании кавитационной полости. Ультразвуковое снятие заусенцев с мелких деталей (см. рис. 2.7.2, а) проводится в ванне, заполненной водно-глицериновой смесью, в которой взвешены зерна абразива. Кроме чисто кавитаци-

онного разрушения наиболее слабых участков-заусенцев, происходит дополнительная обработка их абразивными зёрнами. При возникновении акустических течений зерна абразива и детали из-за различной плотности и размеров получают неодинаковые скорости ( $v_a \neq v_d$ ), происходит их проскальзывание и снятие заусенцев размером до 0,1 мм [2].

В России этот способ усовершенствован путем создания в ультразвуковой ванне избыточного статического давления (0,4 ... 0,6 МПа), что позволило значительно интенсифицировать процесс снятия заусенцев (в 10 раз и более) [14].

Кавитационные пузырьки образуются в месте соединения заусенца с деталью. При атмосферном давлении малые пульсации пузырьков обычно не приводят к разрушению заусенцев, а при повышении давления до 5 МПа заусенцы разрушаются через несколько секунд. Установлена избирательность процесса: в первую очередь разрушается место соединения заусенца с деталью и ее острые кромки, а поверхность самой детали почти не имеет следов эрозии.

### 2.7.10. Характеристики ультразвуковых головок

Технологический процесс	Вид головки	Мощность, Вт	Габариты, мм	Тип преобразователя	Крепление к станку	Вид крепления инструмента к головке	Инструменты	Охлаждение зоны обработки
Сверление отверстий и фрезерование канавок алмазным инструментом в неметаллах ( $D = 1 \dots 3,0$ мм)	Вращающаяся	До 100	$D = 40,$ $L = 60$ (без конуса Морзе)	Пьезо-керамический	Конус Морзе № 2	Пайка инструмента в корпус и зажим в цанге	Прессованные	Поливом
Сверление отверстий и фрезерование канавок алмазным инструментом в неметаллах ( $D = 3 \dots 20$ мм)	То же	До 250	$D = 80,$ $L = 120$ (без конуса Морзе)	Магнито-стрикционный	Конус Морзе № 3	Зажим в цанге и резьбовое соединение M12×1,25 мм	Прессованные	Прокачка через инструмент
Шлифование плоскостей алмазным инструментом ( $l = 0 \dots 60$ мм)	То же	До 400	$D = 90,$ $L = 120$ (без конуса Морзе)	Магнито-стрикционный и пьезо-керамический	Конус Морзе № 3	Резьбовое соединение или инструмент входит в состав преобразователя	Прессованные алмазные кольца	Прокачка через инструмент или поливом
Сверление, зенкерование, развертывание металлов (фрезерование концевыми фрезами) ( $d = 2 \dots 5$ мм)	То же	До 100	$D = 70,$ $L = 80$	То же	Цанга	Стандартные инструменты со специальной заточкой	Головки АГЦ с доработкой	Прокачка через цангу или поливом
Выглаживание металлических поверхностей алмазными и эльборовыми наконечниками ( $R = 0,5 \dots 4$ мм)	Не вращающаяся	До 250	$D = 70,$ $L = 250$	Пьезо-керамический	В резцедержателе на токарном станке	Резьбовое M10×1,0 мм	Стандартный выглаживатель со специальной доработкой	Поливом масла

Главное преимущество ультразвукового метода перед виброгалтовкой и другими способами удаления заусенцев - сохранение формы и точных размеров деталей.

Снятие заусенцев под повышенным статическим давлением проводится в установках УЗВД6 и УЗВД8, оборудованных магнитострикционными преобразователями. Рабочий объем ванны 700 и 1200 см<sup>3</sup>, соответственно.

Повышенное статическое давление в ванне создается сжатым воздухом. В качестве абразива применяются электрокорунд, карбид кремния и др. с размером зерен 3 - 20 мкм. Обычно суспензия содержит воду, глицерин и абразив (отношение 1:1:1).

Установка УЗВД6 предназначена для удаления заусенцев размером до 0,1 мм с мелких (массой до 10 г) деталей из латуни, стали и др. Одновременно в ванну загружают детали в два-три слоя (от 500 до 20000 шт.). Процесс ультразвуковой обработки продолжается 10 ... 15 мин. Размер заусенцев снижается с 0,1 до 0,01 мм.

Химически активные добавки интенсифицируют процесс обработки; например 2%-ный раствор медного купороса снижает время обработки на 90%.

Детали в процессе обработки должны находиться в постоянном движении. Способность деталей под действием акустических течений удерживаться во взвешенном состоянии зависит от отношения ее массы  $m$  к поверхности  $F_d$ . Эффективное снятие заусенцев наблюдается для деталей, имеющих отношение  $m/F_d$  не более  $5 \cdot 10^{-3}$  г·мм<sup>-2</sup>. При обработке в абразивной суспензии зерна абразива могут внедряться в поверхность деталей. Поэтому после удаления заусенцев необходимо в течение 1-2 мин провести обычную ультразвуковую очистку деталей в воде или слабых щелочных растворах, после чего абразивные зерна смываются. Применение установок УЗВД6 и УЗВД8 позволяет устранить операции ручной зачистки заусенцев, а также получить тонкодисперсные однородные порошки любых материалов.

#### 2.7.4. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ И УПРОЧНЯЮЩЕ-ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ

Способ применения ультразвука для интенсификации процессов резания путем сообщения режущим инструментам высокочастотных колебаний малой амплитуды ( $A = 3 \dots 12$  мкм) предложен А.А. Ворониным и А.И. Марковым (Авт. свид. № 121638 от 12.1.1956 г. Бюлл. № 15, 1959) [1, 3, 5-11, 16-18]. Возбуждение в процессе резания вынужденных ультразвуковых колебаний оказывает сложное и многогранное воздействие, которое

выражается:

в периодическом изменении величины и направления вектора действительной скорости резания;

в периодическом изменении кинематических углов режущего инструмента;

в изменении характера трения на рабочих гранях инструмента;

в изменении условий формирования поверхностного слоя детали;

в повышении динамической устойчивости технологической системы;

в улучшении условий доступа в зону резания смазочно-охлаждающих жидкостей (технологических сред).

Эффективность действия ультразвука на процесс резания зависит от многих факторов: значений амплитуды и частоты колебаний и их направления, свойств обрабатываемого и инструментального материалов, характеристик режима резания.

Наибольший эффект улучшения качества поверхности, уменьшения сил резания и повышения точности обработки достигается при сообщении ультразвуковых колебаний в направлении главного движения и при резании с небольшими окружными скоростями ( $v \leq 0,5$  м/с), малыми подачами на оборот ( $S \leq 0,4$  мм) и малыми глубинами резания ( $t \leq 2$  мм). Применение ультразвука целесообразно как при работе лезвийными, так и абразивными инструментами. Применяются два метода возбуждения колебаний в зоне резания:

1) сообщение колебаний обрабатываемой детали;

2) сообщение колебаний режущему (или деформирующему) инструменту.

Первый метод легче реализовать на существующем оборудовании и требуется более простая оснастка [7], однако его технологические возможности ограничены - можно вести обработку деталей сравнительно небольших размеров. Этот метод реализован в зубодолбежном полуавтомате 5111V3 [6]: применение станка при обработке колес с модулем 0,3 ... 1 мм позволяет повысить скорость резания на 30%, стойкость долбяков в 2 раза и точность обработки (на две степени).

Значительно большие технологические возможности дает второй метод, при котором ультразвуковые колебания малой амплитуды сообщаются режущему инструменту - резцу, сверлу, зенкеру, развертке, метчику, раскатчику. Для этой цели могут быть использованы специальные резьбонарезные станки (СРС-2, СРС-3, СРС-901) или ультразвуковые головки с магнитострикционными и пьезокерамическими преобразователями. Эти головки (см.

табл. 2.7.10) можно быстро установить на существующих металлорежущих станках - токарных, сверлильных, фрезерных. Эффективность ультразвука существенно зависит от амплитуды колебаний.

В табл. 2.7.11 приведены рекомендуемые значения амплитуды ультразвуковых колебаний инструментов.

### 2.7.11. Рекомендуемые значения амплитуды колебаний $A$ , мкм

Инструмент	$A$ , мкм, при диаметре инструмента, мм		
	1,0-2,5	3-5	6-8
Сверла, зенкеры	2-3	4-6	8-10
Развертки	1-3	3-5	6-8
Метчики	1-2	2-4	4-6
Раскатчики	2-4	5-7	8-10

Вылет инструмента должен быть равен длине полуволны ( $\lambda/2$ ) и иметь высокое сопротивление усталости. При обработке отверстий малого диаметра ( $D \leq 5$  мм) можно применять обычные конструкции режущих инструментов и крепить их к ультразвуковой колебательной системе с помощью цангового патрона.

Инструменты - метчики для нарезания резьбы более 8 мм отличаются от стандартных наличием резьбового хвостовика для закрепления в концентраторе-волноводе.

Расчет резонансной длины метчика  $L$ ,

работающего в режиме продольных колебаний, ведут аппроксимируя метчик по длине  $L$  тремя участками  $a$ ,  $b$ ,  $c$  с постоянными площадями соответственно  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ .

Уравнение собственных частот имеет вид [6]:

$$\operatorname{tg}(kb) = \frac{(F_1/F_2) \operatorname{tg}(ka) + (F_3/F_2) \operatorname{tg}(kc)}{(F_1/F_2) \operatorname{tg}(ka) \operatorname{tg}(kc) - 1},$$

где  $k$  - волновое число;  $k = \omega/C$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $C$  - скорость звука в материале метчика. Рабочая частота  $f$  может быть 18; 22 или 44 кГц.

Ультразвук наиболее эффективен при нарезании резьбы малого и среднего диаметра в жаропрочных и титановых сплавах. Применение ультразвука частотой 22 ... 44 кГц и амплитудой 3 ... 5 мкм позволяет повысить производительность процесса до 3 раз (за счет уменьшения количества метчиков в комплекте) и период стойкости инструмента до 1,5-2 раз, а также устранить случаи разрушения метчиков. Ультразвуковые колебания позволяют получить хорошее качество резьбы даже в таких вязких материалах, как медь.

Весьма эффективно применение ультразвука при отделочных процессах абразивно-алмазной обработки - суперфинишировании, хонинговании, доводке (притирке).

В табл. 2.7.12 приведены сравнительные данные по обрабатываемости наружным алмазным хонингованием - обычном ( $A = 0$ ) и ультразвуковым ( $A > 0$ ), где  $Q$  - производительность ( $\text{мм}^3/(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$ ). Брусок АСМ 40/28 М1 100 % [9].

### 2.7.12. Шероховатость и производительность при обычном и ультразвуковом хонинговании

Параметр	12X18H9T		30XГСА (48 ... 50 HRC)		Сталь 45 (38 ... 40 HRC)	
	$A = 0$	$A = 5$ мкм	$A = 0$	$A = 4$ мкм	$A = 0$	$A = 3$ мкм
$Q$ , $\text{мм}^3/(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$	7,8	32	6,7	49	29	396
$R_a$ , мкм	0,45	0,6	0,32	0,4	0,5	0,76

Для снижения шероховатости деталей цикл ультразвукового хонингования следует заканчивать при пониженных значениях  $p_{\text{ст}} = 0,4$  МПа и  $A = 0,5 \dots 1$  мкм.

Зависимость удельного съема  $q$  от  $A$  носит экстремальный характер:  $q_{\text{max}}$  при обработке различных материалов наблюдается при  $A = 2 \dots 6$  мкм. Удельная сила прижима  $p_{\text{ст}}$  в меньшей мере влияет на  $q$ : при  $p_{\text{ст}} > 1,2$  МПа значение  $q$  снижается. Увеличение  $v$  сопровождается ростом  $q$ .

На оптимальных режимах производительность  $Q$  ультразвукового хонингования выше в 4-13 раз, чем обычного (для различных материалов); в 1,4-4 раза возрастает удельный съем  $q$ . Износостойкость поверхностей при обычном и ультразвуковом хонинговании практически одинакова. Точность обработки при ультразвуковом хонинговании выше, чем при обычном. Для обеспечения более высокой точности необходимо связывать величину  $A$  с погрешностью формы детали.

При ультразвуковой доводке отверстий алмазосодержащим инструментом целесообразно возбуждать ультразвуковые колебания, ориентированные определенным образом относительно обрабатываемой поверхности. На предварительных операциях - нормальные колебания, обеспечивающие интенсивное исправление исходной погрешности формы отверстия. На отделочных операциях - поперечные колебания, направленные перпендикулярно вектору скорости резания и касательно к обрабатываемой поверхности отверстия.

Амплитуда  $A$  поперечных ультразвуковых колебаний должна находиться в пределах  $0,07d_a < A < 0,16d_a$ , причем большие значения следует принимать для меньшей зернистости алмазного инструмента.

Направление колебаний оказывает влияние и на шероховатость поверхности. Наибольшая шероховатость наблюдается при доводке с нормальными колебаниями; поперечные колебания обеспечивают шероховатость в 1,2-1,5 раза меньшую, чем при доводке без ультразвука. В табл. 2.7.13 приведены зависимости шероховатости отверстий от давления  $p_{ст}$  и амплитуды колебаний  $A$  [8].

2.7.13. Эмпирические зависимости для расчета  $R_a$  при ультразвуковой обработке

Обрабатываемый материал	Направление ультразвуковых колебаний	Зависимость для расчета $R_a$
40X 30 ... 35 HRC	Нормальное	$0,2 p_{ст}^{0,14} A^{0,55}$
	Продольное	$0,35 A^{0,29}$
	Поперечное	$0,05 p_{ст}^{0,2} A^{0,11}$
	Без колебаний	$0,09 p_{ст}^{0,15}$
12X18H10T	Нормальное	$0,396 p_{ст}^{-0,23} A^{0,63}$
	Продольное	$0,278 A^{0,11}$
	Поперечное	$0,055 p_{ст}^{0,1} A^{0,08}$
	Без колебаний	$0,123 p_{ст}^{0,17}$
BT3	Нормальное	$0,33 A^{0,34}$
	Продольное	$0,587 A^{0,35}$
	Поперечное	$0,05 p_{ст}^{0,1} A^{0,12}$
	Без колебаний	$0,08 p_{ст}^{0,33}$

Ультразвук способствует также повышению точности обработки (табл. 2.7.14).

2.7.14. Интенсивность исправления исходной погрешности формы отверстия

Обрабатываемый материал	Метод обработки отверстий		
	С поперечными колебаниями	С нормальными колебаниями	Без колебаний
40X	54-76%	82-82%	43-80%
12X18H10T	41-53%	90-74%	52-60
BT3	90-84%	80-84%	75-55%

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекренев Н.В., Марков А.И. Качество поверхности отверстий при ультразвуковой доводке // Сверхтвердые материалы. 1986. № 6. С. 56-60.

2. Бронин Ф.А., Чернов А.П. Удаление заусенцев и диспергирование порошковых материалов при воздействии ультразвука. М.: Машиностроение. 1979. 54 с.

3. Горбунов А.А. Изготовление мелко-размерной резьбы метчиками с воздействием ультразвука. М.: Машиностроение. 1981. 44 с.

4. Казанцев В.Ф. Ультразвуковое резание / Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука. 1970. С. 9-70.

5. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с японс. М.: Машиностроение. 1985. 424 с.

6. **Марков А.И.** Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение. 1980. 237 с.

7. **Марков А.И.** Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение. 1968. 365 с.

8. **Марков А.И., Бекренев Н.В.** Ультразвуковая доводка отверстий алмазным инструментом / Прогрессивные технологические процессы и оборудование ЭФХК обработки. МДНТП. 1989. С. 88-93.

9. **Марков А.И., Ермак П.А.** Ультразвуковое алмазное хонингование сталей // Вестник машиностроения. 1982. № 4. С.52-55.

10. **Марков А.И., Устинов И.Д.** Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента. М.: Машиностроение. 1979. 54 с.

11. **Марков А.И., Устинов И.Д.** Ультразвуковое алмазное сверление и фрезерование хрупких неметаллических материалов. М.: Машиностроение. 1979. 40 с.

12. **Муханов И.И.** Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом. М.: Машиностроение. 1978. 44 с.

13. **Орлов П.Н., Сагателян Г.Р.** Доводка труднообрабатываемых материалов свободным абразивом с наложением ультразвуковых колебаний. М.: Машиностроение. 1983. 80 с.

14. **Ультразвук:** Маленькая энциклопедия, под ред. И.П. Голямина. М.: Советская энциклопедия. 1979. 400 с.

15. **Markow A.J.** Ultrasonic machining of intractable materials, London, Jliffe books btd. 1966. 386 p.

16. **Марков А.И.** Оптимизация и управление процессом ультразвукового резания // Вестник машиностроения. 1996. № 10. С. 19-22.

17. **Марков А.И., Ивкин Е.И., Бекренев Н.В.** Ультразвуковая интенсификация глубоких отверстий // СТИН. 1996. № 12. С.23-27.

18. **Марков А.И., Ивкин Е.И.** Ультразвуковая интенсификация процессов резания труднообрабатываемых материалов. В сб.: Машиностроение, приборостроение, энергетика. М.: МГУ, 1995. С. 44-48.

подвода ее в зону резания. Так, например, широко распространенная механическая обработка применяет механическую энергию при равномерном относительном движении инструмента и заготовки.

Промышленное освоение комбинированных методов обработки обладает тремя безусловными достоинствами. Они обеспечивают значительное повышение производительности и позволяют при использовании одной и той же обрабатываемой системы, т.е. на одном рабочем месте, путем регулирования последовательно осуществлять как черновую, так и чистовую обработку. Таким образом, освоение комбинированных методов обработки приводит к повышению как производительности обработки, так и качества деталей. Кроме того, в ряде случаев освоение комбинированных способов обработки позволяет достигнуть новых технических эффектов, например, значительно увеличить прочность, износостойкость и достигнуть других эксплуатационных параметров деталей. Наглядным примером, показывающим изложенные достоинства комбинированных методов, является например (см. ниже), анодно-механическая обработка.

#### 2.8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Комбинированные методы обработки классифицируются по следующим основным признакам:

- 1) числу и наименованиям подводимых физико-химических воздействий;
- 2) способу подвода каждого воздействия в зону обработки;
- 3) характеру размещения физико-химических воздействий в пространстве и во времени;
- 4) количественным характеристикам совмещаемых воздействий (прежде всего энергии каждого из них) и соотношений их значений между собой.

**Число и наименование подводимых физико-химических воздействий - первый признак** - делит комбинированные методы обработки на классы. *Первый класс* - методы обработки, использующие один и тот же вид энергии, но два различных способа ее подвода (например, точение с наложением низкочастотной вибрации для дробления стружки); *второй класс* - методы обработки, совмещающие два вида энергии, подводимой в зону обработки (например, резание с пропусканьем электрического тока по цели заготовка-инструмент или с предварительным индукционным нагревом срезаемого слоя); *третий класс* - методы обработки, совмещающие три различных вида энергии или два различных вида энергии

## Глава 2.8

### КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Комбинированные методы обработки совмещают воздействие нескольких физико-химических явлений. Простые методы обработки, в отличие от комбинированных, используют один вид энергии с одним способом

и два способа ее подвода. Примером комбинированного метода обработки третьего класса может быть глубокое сверление отверстий в труднообрабатываемых материалах с наложением низкочастотной осевой вибрации и активных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

Комбинированный метод третьего класса применяется для обработки высокотвердых материалов с малой глубиной резания и подачей на оборот до 1,5 мм, в котором используются три вида воздействия: нагрев обрабатываемого материала в зоне резания пропусканием через цепь инструмент-заготовка электрического тока, охлаждение твердосплавной пластинки с помощью СОТС и воздушный способ охлаждения сходящей стружки. Для этого использованы режущие пластинки специальной конструкции и державки. Пластина имеет особую форму: основание и передняя поверхность ее параллельны, а боковые поверхности выполнены клиновыми с расширением книзу, что обеспечивает возможность закрепления пластинки в клиновом пазу с помощью крепежного клина и винтов. Режущая кромка криволинейна, очерчена двумя радиусами, а на передней поверхности вдоль кромки имеется отрицательная фаска. Для точной установки пластинки в радиальном направлении служит сменный упор, контактирующий с задним торцом пластинки. Подвод СОТС для охлаждения пластинки в процессе работы проводится по каналам, расположенным под основанием пластинки в державке. Державка электрически изолирована от суппорта с помощью трех изолирующих накладок, привернутых к одной из сторон державки. Охлаждение сходящей стружки осуществляется воздухом, подводимым через патрубок с соплом из трубопровода. Электрический ток включается после врезания на полную глубину; рекомендуемая сила тока 125 ... 140 А. Скорость резания при этом методе обработки 15 ... 80 м/мин.

Комбинированный метод обработки четвертого класса может быть пояснен на примере сверления, с использованием электрического и механического воздействия, алмазными инструментами цилиндрических и фасонных отверстий в твердых сплавах, закаленных сталях, магнитных сплавах и других токопроводящих труднообрабатываемых материалах (рис. 2.8.1). Инструмент закрепляется в шпинделе станка специальной головкой, которая, кроме передачи равномерного вращения и подачи, обеспечивает также подачу электролита во внутреннюю полость инструмента. На эту схему обработки алмазным инструментом накладывают воздействие ультразвуковых колебаний. Помимо равномерного и вибрационного механических воздействий

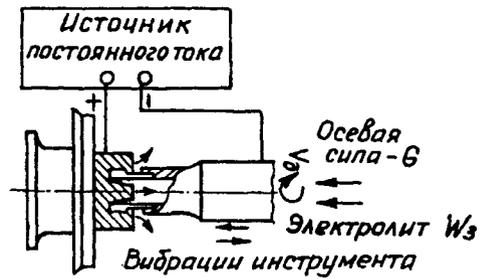


Рис. 2.8.1. Схема комбинированного сверления с наложением вибрации

при этом методе обработки действуют два вида электрического воздействия: электрохимическое и электроэрозионное.

Максимальную производительность обработки обеспечивает комбинированный метод обработки при преимущественном механическом воздействии; в этом случае абразивный съем должен осуществляться при весьма высоких давлениях (300 ... 500 МПа). Если решающее значение при выполнении операции имеет обеспечение высокой стойкости инструмента, то основное значение в процессе съема заданного припуска должно иметь электрохимическое воздействие. При определенных режимах обработки существенное значение может иметь электроэрозионное воздействие, которое обусловлено интенсивными электроэрозионными разрядами, происходящими вследствие контактирования токопроводящей связки алмазного слоя инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки. Электроэрозионный процесс обработки рекомендуется при выполнении операций шлифования отверстий.

**Способ подвода совмещаемых физико-химических воздействий - второй признак** - делит комбинированные способы на методы с параллельным или последовательным подводом энергии. К *первому методу* относится, например, механическая обработка с пропусканием через зону резания электрического тока, *ко второму* - резание с предварительным подогревом слоя материала, снимаемого с заготовки с помощью индуктора токов высокой частоты, размещаемого на суппорте станка впереди реза.

При последовательном подводе энергии эффективность совмещения одних и тех же видов энергии зависит также от порядка их следования. Например, в промышленности используются два комбинированных метода протягивания, в которых совмещены обычный процесс резания и пластическое деформирование материала. Первый метод выполняется протяжками, у которых режущие зубья

располагаются впереди выглаживающих; так, например, применяется протяжка, режущая часть которой изготавливается из быстрорежущей стали, а последующее поверхностное пластическое деформирование осуществляется выглаживающими кольцами из твердых сплавов. Обработка деформирующе-режущими протяжками обеспечивает обратную схему последовательной комбинированной обработки; они работают по схеме опережающего пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Одна секция такой протяжки имеет твердосплавный деформирующий элемент. За ней следует и осуществляет процесс резания режущий элемент из быстрорежущей стали. Протяжка в целом имеет несколько таких секций и обеспечивает сьем основного припуска. Окончательно поверхность отверстия в обеих рассмотренных конструкциях формируется дополнительными секциями переходных и калибрующих зубьев.

Наименование этого вида комбинированного метода обработки определяется последовательностью действия физико-химических процессов; в соответствии с этим два рассмотренных выше комбинированных метода резания называются режуще-деформационная и деформационно-режущая механическая обработка.

**Количественное соотношение совмещаемых процессов - третий признак** - определяет степень взаимодействия различных видов физического и химического воздействия; они могут приводить только к количественному изменению процесса резания или вызывать его качественное изменение. По третьему признаку комбинированные методы разделяются на два типа.

1) Методы с преимущественным влиянием одного воздействия, например, механического; дополнительное воздействие, например, тепловое, снижая механические характеристики материала срезаемого слоя, повышает эффективность механического воздействия, качественно не изменяя обычного процесса механической обработки. Для комбинированных процессов этого типа различают базовые и дополнительные процессы; соответственно даются определения методу обработки; в качестве базового слова принимается доминирующий процесс; например, для приведенного примера - метод резания называется термомеханической обработкой. Напротив, если доминирующим элементом рабочего процесса будет термическое воздействие - то такой комбинированный метод резания будет называться механо-термической обработкой;

2) Методы, у которых нельзя разделить физико-химические воздействия на основные и дополнительные (см. способ ультразвуково-

вого алмазно-электрического сверления); в этом случае процесс обработки может быть описан специфическими закономерностями, не совпадающими с составляющими их обычными процессами резания.

При комбинированных методах обработки, прежде всего второго типа, воздействие двух физических или химических процессов нельзя принимать как простую арифметическую сумму, так как иногда совмещение двух физических воздействий может дать новые технические эффекты, обеспечивающие коренное повышение производительности обработки, стойкости инструмента и качества изготовления деталей. Для этого перечень совмещаемых процессов, их количественные характеристики, а также последовательность действия должны подбираться таким образом, чтобы они взаимно активизировали друг друга. Так, например, электроэрозивный процесс (помимо обычного воздействия) должен создавать зону предразрушения для последующего механического воздействия, и, напротив, механическое воздействие, вследствие обусловленной им вибрации и образования мелких частиц стружки, заполняющих рабочий зазор между электродами, повышает эффективность электроэрозивного разрушения. Таким образом, критерием совместимости физико-химических процессов с вводимыми энергиями  $E_1, E_2$  является снимаемый в единицу времени суммарный объем обрабатываемого материала комбинированным процессом резания; он должен быть больше арифметической суммы снимаемых объемов каждым процессом отдельно (где  $i$  - число совмещаемых процессов).

Производительность операционного технологического процесса оценивается как объемом, так и площадью обработанной поверхности в единицу времени:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \Pi_i > n_1 + n_2 + \dots + n_n.$$

Таким образом, эффективность определенного комбинированного способа обработки определяется закономерностями суммирования воздействий физических и химических явлений, определяющих фактически имеющий место процесс съема материала. В связи с этим многие сочетания рабочих процессов с точки зрения построения эффективного комбинированного метода обработки могут быть и несовместимыми, т.е. взаимно затруднять протекание комбинированного процесса обработки. Например, известно, что такой эффективный метод обработки для особо прочных сталей, как плазменно-механическое резание, нельзя применять при большинстве

режимом резания вязких материалов типа коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, так как в этом случае интенсивный нагрев плазменной дугой еще более повышает пластичность обрабатываемого материала и тем самым затрудняет его механическое деформирование.

Коэффициент взаимного влияния  $k_v$  комбинированного метода обработки определяет количественные характеристики взаимодействия разнородных видов энергии и способов их подвода. Так, для методов обработки первого класса, например, совмещения механического и теплового воздействий, объемная производительность комбинированного метода  $V_{м.т} > V_m + V_t$ , где  $V_m$ ,  $V_t$  - производительность механического и теплового резания при использовании их отдельно на тех же режимах обработки.

При значениях коэффициента  $k_v > 1$  эффективность комбинированного процесса выше составляющих его обычных процессов резания, и наоборот. Значения коэффициента взаимного влияния могут характеризовать комбинированный метод обработки по объемной  $k_v$  или поверхностной  $k_p$  производительности, степени изменения точности и шероховатости  $k_{ш}$  поверхности и другим показателям, например, величине остаточных внутренних напряжений  $k_0$ .

Любой комбинированный способ обработки имеет единый физико-химический механизм резания; его обобщенные характеристики определяют значения коэффициентов взаимного влияния. Они являются количественными показателями выходных характеристик данного процесса резания; при их расчете следует использовать методы динамического программирования. Это позволяет перейти к пошаговой (последовательной) оптимизации любого метода резания, в том числе комбинированного. Эти методы созданы специально для многоэтапных способов проектирования. Проектируемый для заданной операции комбинированный метод обработки состоит из совокупности оптимальных шаговых решений:

$$X^* = (X_1^*, X_2^*, X_3^*, \dots, X_n^*),$$

где  $X_1^*$  - соответствует совокупности наименований вводимых процессов;  $X_2^*$  - способы их подвода;  $X_3^*$  - значение энергии каждого процесса.

Оптимальный комбинированный метод обработки имеет место при  $X^* < X_1$ . Следовательно, решая задачу проектирования необхо-

димого метода обработки, его оптимизацию на каждом шаге следует осуществлять с учетом будущих последствий на предстоящих шагах. Таким образом, улучшение на каждом шаге должно быть таким, чтобы на всех оставшихся до конца шагах плюс данный шаг сумма выигршей была бы наибольшей.

## 2.8.2. ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЖУЩАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Метод обработки, совмещающий последовательное действие пластического деформирования материала снимаемого слоя и затем - процесса резания, разработан в МГТУ им. Н.Э. Баумана; он получил название - резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) и относится к группе комбинированных деформационно-режущих методов обработки. Так, например, при токарной обработке метод резания с ОПД осуществляется путем последовательного воздействия деформирующего инструмента - ролика и затем - реза. Необходимое деформирующее усилие ролика обеспечивается механическим или пневматическим устройством. Однако наиболее удобны гидравлические устройства; при этом регулирование силы обкатки производится с помощью стандартной маслопитающей станции.

Физический механизм резания с ОПД, обеспечивающий снятие материала срезаемого слоя, состоит в совмещении двух процессов - опережающего пластического деформирования и непосредственно процесса резания. При этом методе обработки к началу воздействия режущего инструмента на материал срезаемого слоя часть работы, затрачиваемой на пластические деформации в процессе стружкообразования при обычном резании, предварительно уже выполняется дополнительным устройством. Следовательно, в процессе резания с опережающим пластическим деформированием режущим инструментом совершается не вся работа, а только ее часть. Это обеспечивает снижение силы и температуры резания, а следовательно, повышает стойкость инструмента и производительность обработки.

Схема обработки резанием с опережающим пластическим деформированием применительно к типовым операциям - точению, протягиванию, абразивной обработке - представлена на рис.2.8.2. Воздействие инструмента, производящего опережающее пластическое деформирование, может быть оказано на поверхность резания (рис.2.8.2, а) или на обрабатываемую поверхность (рис.2.8.2, б). На черновых операциях применение резания с ОПД приводит к повышению стойкости инструмента или производительности обработки.

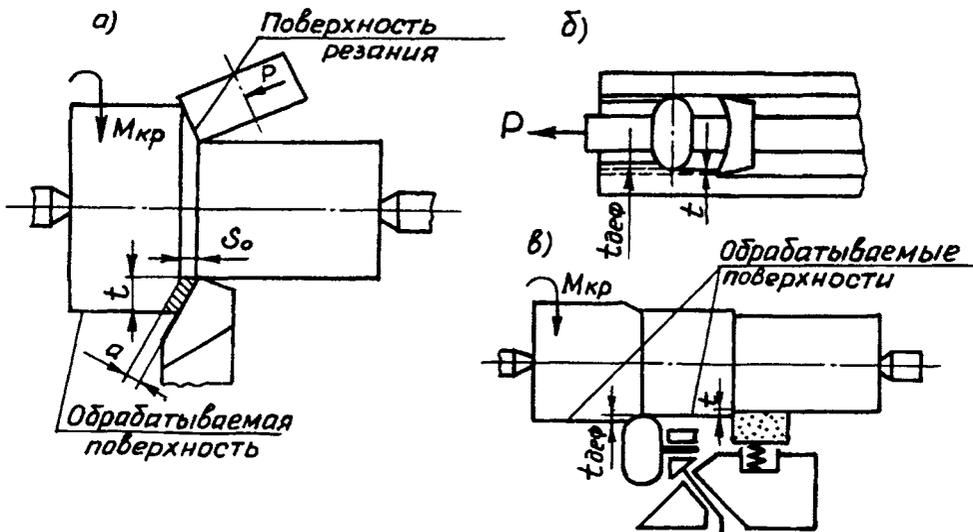


Рис. 2.8.2. Схемы комбинированной обработки с опережающим пластическим деформированием: а - точение; б - протягивание; в - шлифование

На чистовых операциях, выполняемых абразивным инструментом, ОПД используют прежде всего как средство повышения качества поверхности. Повышение стойкости и качества поверхности одновременно могут быть достигнуты при протягивании, когда впереди режущих зубьев инструмента устанавливают выглаживающие, которые производят ОПД по обрабатываемой поверхности. Процесс резания с ОПД наряду со значительным повышением производительности обработки и качества изделий может обеспечивать и эффективное стружкодробление при подаче на оборот более 0,2 мм. В этом случае процесс ОПД надо осуществлять с помощью рифленого ролика.

Применение ОПД цилиндрическим роликом с зубьями для разделения стружки значительно повышает стойкость резцов (в 2,8-4,5 раза) и обеспечивает надежное дробление стружки. Обработка производилась резцами из быстрорежущей стали P18 при обработке заготовок из рафинированной стали 50РАСШ, а также сталей 12Х18Н9 и 16Х11Н2ВМФ. Соотношение между глубиной внедрения зубьев ролика и толщиной среза должно быть 0,7-0,8.

Токарный инструмент для комбинированной обработки имеет деформирующий элемент, располагаемый за режущей пластиной в направлении, обратном направлению подачи (рис. 2.8.3). Сменная пластинка 2 установлена на штифте 9 и закреплена на дер-

жавке 1 и пластине 8 посредством винта 7 и клина. Упрочнение обрабатываемой поверхности осуществляет ролик, расположенный в игольчатом подшипнике 4. Осевая составляющая силы обкатывания воспринимается шариком 5, на который опирается торец ролика. Сила воздействия деформирующего ролика 3 регулируется гайкой 6. Точение таким инструментом обеспечивает точность обработки по седьмому качеству и параметр шероховатости поверхности  $Ra = 0,32 \dots 0,63 \text{ мкм}$ .

Комбинированный процесс резания с ОПД с использованием торцового ролика отработан в МВТУ им. Н.Э. Баумана совместно с Могилевским политехническим институтом. Торцовый ролик работает по принципу качения и скольжения, т.е. производит накачивание с одновременным выглаживанием. Профиль рабочей поверхности торцового ролика образован дугой окружности, центр которой перемещается по направляющему цилиндру. Комбинированный инструмент для обработки валов состоит из прямоугольного резца 1 (рис. 2.8.4) и торцового ролика 2. Торцовый ролик, следуя за резцом, вращается с помощью обрабатываемой детали 3 вместе с осью в подшипниках, установленных в корпусе 4, имеющем возможность осевого перемещения в державке 5. Сила прижатия торцового ролика к обрабатываемой детали регулируется прижатием пружины 6 посредством гайки 7. Державка 5 вместе с торцовым роликом устанавли-

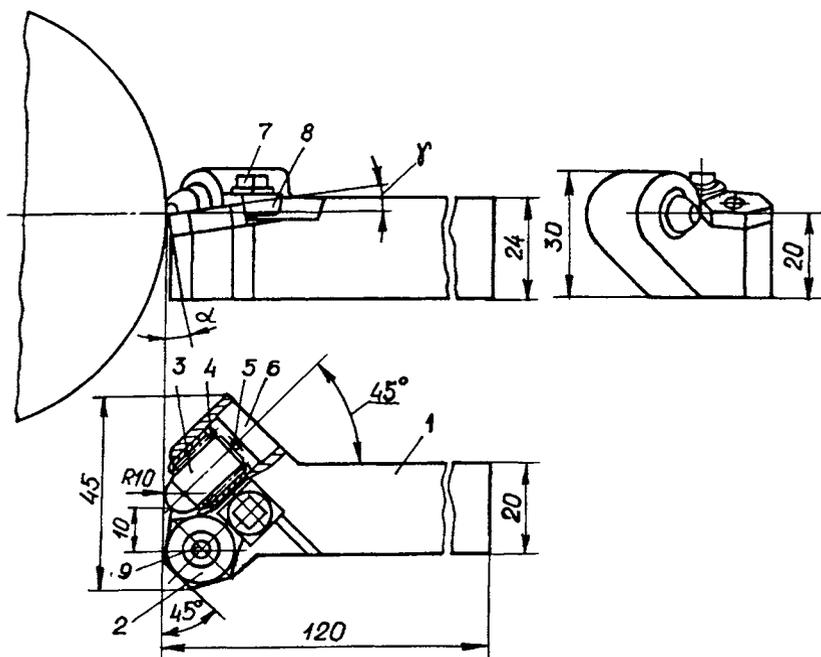


Рис. 2.8.3. Инструмент для точения - отделочно-упрочняющей обработки ОПД

вается цапфой 8 в отверстие оправки 9 и крепится в резцедержателе 10 станка. После установки необходимого угла разворота оси торового ролика  $\varphi_y$  относительно образующей обрабатываемой поверхности и величины смещения  $h$  его относительно оси детали державка 5 крепится сухарями 11. Существуют две схемы установки торового ролика относительно обрабатываемой поверхности: с поворотом оси в направлении подачи и с поворотом оси в направлении, противоположном направлению подачи. При обеих схемах установки ролика могут быть прямая и обратная схемы обработки. Прямая схема обработки характеризуется перемещением точки рабочей поверхности торового ролика от обработанной поверхности к необработанной, а обратная - наоборот.

### 2.8.3. КОМБИНИРОВАННОЕ ВИБРОМЕХАНИЧЕСКОЕ РЕЗАНИЕ

Механическая обработка с наложением на обычно принятую кинематическую схему выполнения типовых операций вибрации - (или кратко - вибрационное резание) находит все более широкое промышленное применение. Эта группа комбинированных методов использует два вида разнородного механического воздействия - равномерное и вибрационное.

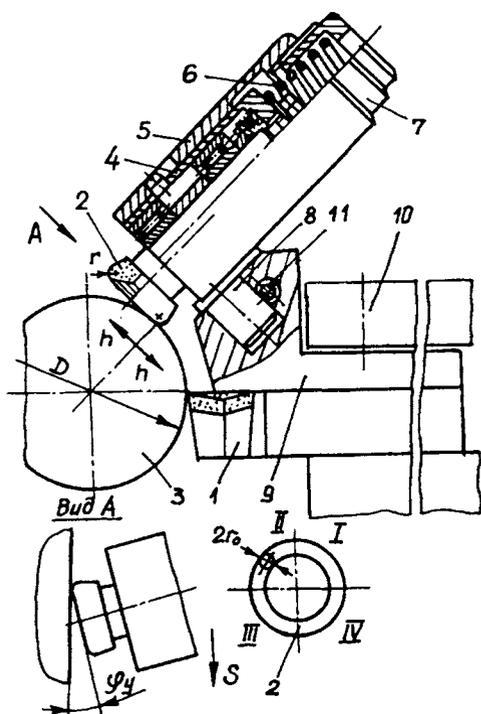


Рис. 2.8.4. Инструмент для точения - отделочно-упрочняющей обработки ОПД торовым роликом

В современной технологии механической обработки можно отметить два направления рационализации операции механической обработки с помощью вибрации.

Первое направление связано с гашением неблагоприятных вибраций при механической обработке, ведущих к снижению качества поверхности, точности обработки и стойкости инструмента. Особое значение это направление имеет при резании труднообрабатываемых материалов.

Второе направление связано с освоением метода вибрационного резания - положительного использования вибрации. Применение вибрационного резания обеспечивает эффективное дробление стружки (что является одним из условий успешного осуществления высокопроизводительных методов обработки на универсальном оборудовании и при автоматизации операций механической обработки), а также значительное улучшение обрабатываемости резанием разнообразных материалов, прежде всего, труднообрабатываемых. Применение вибрационного резания не противоречит широкому использованию средств гашения вибраций, что свидетельствует о том, что познание физической сущности вредного явления, его правильное использование приводит к полезным практическим результатам и внедрению в производство.

Процесс вибрационного резания заключается в том, что на обычно принятую кинематическую схему обработки на данной операции накладывается дополнительное вибрационное движение инструмента или заготовки. Общими физическими особенностями резания с вибрацией являются:

- 1) кратковременное периодическое увеличение скоростей резания;
- 2) переменная циклическая нагрузка на деформируемый в процессе резания материал, обусловленная переменными скоростями и рабочими углами резания;
- 3) снижение сил трения на поверхностях контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой заготовкой;
- 4) повышенная эффективность применения смазочно-охлаждающих жидкостей.

Эти особенности резания приводят к улучшению условий работы режущего инструмента в результате: снижения действующих на них сил резания и температур; периодического отдыха режущей кромки инструмента вследствие кратковременного уменьшения или полного снятия нагрузки на режущий клин инструмента (как при фрезеровании); отсутствия у режущей кромки уступов и лунок для стружкодробления. Их заточка приводит к образованию дополнительных внутренних напряжений и микротрещин, что ослабляет режущую кромку.

Воздействие этих положительных факторов вибрации при оптимальных условиях обработки может превалять над отрицательными факторами вибрации, заключающимися в переменной нагрузке на режущую кромку инструмента, увеличении высотных параметров шероховатости поверхности и снижении долговечности отдельных узлов и станков в целом.

Основными технологическими условиями рационального применения вибрационного резания являются:

- 1) правильный выбор направления вибрации;
- 2) определение параметров вибрации, обеспечивающих наибольшую эффективность процесса для данной операции.

Типовые кинематические схемы обработки резанием с вибрацией показаны на рис.2.8.5, в. На обычно принятую схему механической обработки (рис. 2.8.5, а) могут быть наложены осевые вибрации по оси  $X$ , радиальные - по оси  $Y$  и тангенциальные - по оси  $Z$ , а также в направлении, не совпадающем ни с одной из этих осей, например, в направлении вектора скорости при обычном резании.

Процесс резания с радиальной вибрацией значительных амплитуд по оси  $Y$  отрицательно сказывается на результатах обработки - увеличиваются параметры шероховатости обработки, поскольку перемещение режущей кромки при вибрации непосредственно фиксируется на обработанной поверхности (рис. 2.8.5, з). Неудовлетворительны в этом случае и условия работы режущей кромки, поскольку большая нагрузка при дополнительном колебательном движении воспринимается вершиной инструмента и вспомогательной режущей кромкой. Результатом этого являются повышенный износ и выкрашивание твердосплавных кромок. Поэтому эта кинетическая схема вибрационного резания может найти практическое применение только для колебаний высоких частот типа ультразвуковых.

Резание с осевыми колебаниями применяется для дробления стружки. Наряду с этим оно обеспечивает получение параметра шероховатости поверхности  $Ra = 1,25 \dots 2,5$  мкм, сохранение точности обработки, стойкости инструмента, что и при обычном резании в тех же условиях. Основными особенностями вибрационного резания с осевыми колебаниями являются большое изменение подач (толщины среза) за один цикл колебаний инструмента, а также существенное изменение рабочих углов резания.

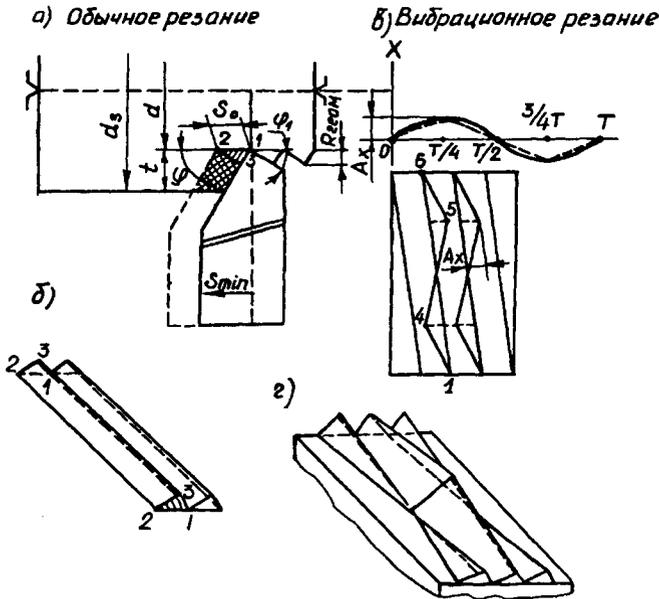


Рис. 2.8.5. Схемы обработки без наложения (а) и с наложением вибрации (б); вид неровностей при обработке без наложения (в) и с наложением вибрации (г)

Долговечность инструмента при точении с колебаниями в осевом направлении при применении оптимальных режимов вибрации характеризуется следующими данными - число выкрашиваний твердосплавных режущих кромок не увеличивается по сравнению с обычным точением; при этом в зависимости от режимов резания и вибрации износ задней поверхности сохраняется таким же, как и при обычном точении, или несколько превышает его (на 15 ... 20%). Во всех случаях глубина износа передней поверхности уменьшается вследствие увеличения ширины лунки. Это обусловлено переменностью подачи, толщин среза, а следовательно, и радиуса сходящей стружки; в результате ширина лунки и ее площадь возрастают за счет некоторого снижения ее глубины.

Применение точения с вибрацией в осевом направлении является эффективным средством стружкодробления; при этом стойкость и число переточек инструмента, производительность и точность обработки сохраняются теми же, что и при обычном точении в тех же условиях. При вибрационном точении параметр шероховатости поверхности  $Rz = 50 \dots 100$  мкм при использовании стандартных типов твердосплавных резцов и  $Ra = 1,25 \dots 2,5$  мкм при использовании резцов типа Колесова, что делает этот метод пригодным для черновой и получистовой обработок.

Вибрационное сверление обычно осуществляют с осевыми колебаниями; обрабатываемость при этом повышается. Это происходит прежде всего вследствие надежного измельчения стружки. Для рационализации операций сверления удаление образующейся стружки является решающим фактором. Так, например, для сверления отверстий диаметром 1,5 ... 2,5 мм в деталях из коррозионно-стойкой стали и жаропрочных сплавов обычно используют настольно-сверлильные станки с ручной подачей. Стружка при сверлении, образующаяся в виде ленты, с большим трудом идет по винтовым канавкам и вызывает периодическое образование пробок, что приводит к необходимости периодического вывода сверла из отверстия в процессе обработки. Применение принудительного механического привода вызывает массовые поломки сверл, что делает невозможным автоматизацию этих трудоемких и широко распространенных операций механической обработки.

Промышленное освоение метода вибрационного сверления позволяет получить мелкодробленую стружку в удобной для удаления из зоны резания форме; благодаря этому можно установить механический привод. Вместе с возможностью автоматизации внедрение станка для вибрационного сверления отверстий диаметром 1,5 мм в деталях из коррозионно-стойкой стали (с засверловкой кон-

трочных отверстий в косой торец гайки) позволили ликвидировать ручной труд, увеличить производительность обработки в 2,5 раза и стойкость инструмента в 3 раза. Станок конструкции МГУ им. Н.Э. Баумана задает электродинамическим вибратором колебания упругой системы вибратор - шпиндель - сверло в направлении подачи сверла, т.е. вдоль оси вращения.

Вибрационное сверление глубоких отверстий диаметром 25 ... 35 мм в коррозионно-стойких и жаропрочных сталях проводили специальными сверлами двухстороннего резания с наружным подводом СОТС и внутренним отводом стружки сверлами, изготовленными из быстрорежущей стали P18 ( $2\varphi = 130^\circ$ ,  $\gamma = 5^\circ$ ). Нежесткость системы изменяет кинематику процесса обработки. Так, например, при подаче на оборот  $S_0 = 0,1$  мм выход режущих кромок сверла из обрабатываемого материала происходит при размахе колебаний, задаваемых вибротоком,  $2A = 0,2$  мм, что в 4 раза больше, чем это следовало бы ожидать при абсолютно жесткой системе.

Вибрационное резание с тангенциальными колебаниями, т.е. резание с колебаниями в направлении окружной составляющей скорости резания, применяют для существенного повышения производительности обработки и стойкости инструмента как при резании труднообрабатываемых материалов, так и для рационализации многих трудоемких операций. Метод обработки резанием с тангенциальной вибрацией показал положительные результаты в лабораторных условиях при точении, развертывании, нарезании резьб, шлифовании и абразивной заточке инструмента, а также в производственных условиях, например, при использовании вибропил и виброножниц, а также для улучшения операций фрезерования.

**Вибрационное резание может осуществляться тремя методами:** 1) установкой в обрабатываемую систему дополнительного узла вибратора; 2) использованием самого процесса резания в качестве генератора возникновения вибрации; 3) путем задания программы обработки осциллирующим движением; в этом случае для создания необходимых колебаний используется имеющийся привод станка с программным управлением.

**Вибраторы** создают оптимальные режимы колебательного движения для данной операции; эти специальные устройства имеют независимую регулировку как по необходимой мощности, так и по форме, амплитуде и частоте. Для осуществления резания с вибрацией как средства стружкодробления необходимы низкочастотные вибраторы, поскольку

при принятых скоростях резания (до 200 м/мин) для получения стружки длиной 10 ... 20 мм (учитывая усадку стружки) достаточно иметь частоту вынужденных колебаний не более 50 Гц. Для этой цели можно применять механические (центробежные или эксцентриковые), пневматические и гидравлические вибраторы.

Использование автоколебаний, обусловленных процессом резания, для улучшения обрабатываемости или дробления стружки является новым средством рационализации операций механической обработки. В этом случае отпадает необходимость наличия специального энергетического источника колебаний, а применяется автоколебательный вибросуппорт.

#### 2.8.4. МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕЗАНИЯ

Комбинированные методы обработки строятся на основе использования в качестве доминирующего процесса рассмотренные выше электрические виды воздействия - электроэрозийные и электрохимические; они дополняются механическим процессом. Эти методы используются при параллельном совместном воздействии на материал снимаемого слоя заготовки.

**Электроконтактное резание** - вид обработки, при котором на заготовку оказывается одновременно механическое, тепловое и электрическое воздействие путем непосредственного контакта быстро перемещающегося инструмента с заготовкой при подводе в зону контакта электрического тока большой плотности.

Диски для электроконтактной резки изготавливают из стальных или алюминиевых листов с покрытием торцовых поверхностей изоляционно-абразивным слоем (эпоксидной смолой), что позволяет во время резки не только предотвращать появление разрядов по боковым поверхностям, но и очищать поверхность реза от оплавленного слоя на глубину 0,2 ... 0,3 мм. Окружная скорость диска при электроконтактной обработке может достигать до 60 м/с. Например, диск выполнен из стали 45, имеет окружную скорость до 50 м/с, почти не подвергается изнашиванию. Это преимущество электроконтактной обработки позволяет сэкономить большое число абразивов. Например, одним абразивным кругом до полного его изнашивания обрабатывают 2000 траков, а стальным диском на электроконтактном станке обрабатывают свыше 500 000 траков для тракторов.

Теплота в зоне контакта инструмента и заготовки выделяется вследствие электрических разрядов ( $Q_3$ ), повышенного сопротив-

ления зоны контакта ( $Q_R$ ) и трения между инструментом и заготовкой ( $Q_{тр}$ ). Сопротивление зоны контакта определяется по закону Джоуля-Ленца. Принимая  $I$  в А, а  $R$  - в Ом,  $T$  - в секундах, получаем

$$Q_R = 0,24I^2RT.$$

Теплота, обусловленная трением, исходя из затрачиваемой на этот процесс мощности  $N_{тр}$ ,

$$Q_{тр} = 0,24N_{тр}T.$$

Обусловленное этими источниками тепло, выделяясь в зоне контакта, размягчает и расплавляет материал срезаемого слоя; движение инструмента обеспечивает механический вынос частиц металла из зоны обработки.

Электроконтактная обработка имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами электрической обработки металлов. При ней не требуются жидкие среды, отсутствуют источники постоянного тока, необходимые при электроискровой и анодно-механической обработке, мало изнашивается режущий инструмент и применяется безопасное для работы напряжение на электродах.

Электроконтактное резание применяется для резки заготовок. Удаление металла из зазора между электродами происходит в результате расплавления и частично испарения металла заготовки с последующим выбросом его воздушным потоком, создаваемым в зазоре между электродом и вращающимся диском. В отдельных случаях для его охлаждения используют подачу жидкости. При зачистке слитков из коррозионно-стойкой стали для улучшения процесса удаления диспергированного металла при больших скоростях съема используют сжатый воздух давлением не менее 0,35 МПа.

Зачистка заготовок сложного контура - другое распространенное применение ЭКО. Создан и успешно работает полуавтомат, предназначенный для электроконтактной зачистки литейных заусенцев по всему контуру звена гусеницы трактора в условиях массового производства. Электроконтактная обработка слитков имеет широкие перспективы промышленного применения. Обработка на специальных металлорежущих станках четырехгранных слитков 1300×400×480 мм продолжается от 8 до 12 ч. Производительность обработки, по данным ЭНИМСа, при использовании электроконтактного метода, может быть повышена в 10 раз при снижении стоимости обработки в 2-3,5 раза.

**Анодно-механическая обработка (АМО)** является комбинированным методом, постро-

енным на совместном механическом, электроэрозионном и электрохимическом воздействиях на материал срезаемого слоя. Под действием постоянного тока в среде электролита происходит анодное растворение обрабатываемого материала, которое приводит к образованию на аноде защитной пленки, тормозящей дальнейшее растворение. Механическое воздействие диска снимает эту пленку, обеспечивая непрерывность электрохимического растворения и интенсифицируя его. В момент срыва пленки происходят электрические разрывы между выступающими неровностями анода и катода, приводящие к электроэрозионному разрушению выступающих участков. Все три процесса - электрохимическое растворение, механическое и электроэрозионное разрушение - тесно связаны между собой, образуя единый комбинированный процесс анодно-механического резания.

Анодно-механическая обработка обладает общим для всех комбинированных методов достоинством - позволяет в широких диапазонах регулировать параметры шероховатости поверхности и точность обработки. Так, чистовые режимы анодно-механической обработки токопроводящим шлифовальным кругом и неметаллической лентой дают возможность получать наиболее низкие параметры шероховатости ( $R_a = 0,01$  мкм) и точность (до 5-6-го качества); наоборот, черновая анодно-механическая обработка позволяет получать очень большие съемы металла, например, по твердым сплавам до 5000 ... 8000 мм/мин.

Чистовую анодно-механическую обработку осуществляют при малых плотностях электрического тока, поэтому основное значение при ее выполнении имеют механизмы анодного растворения и механического снятия пленки движущимся инструментом. Эти процессы происходят преимущественно по вершинам микронеровностей, которые подвергаются более интенсивному электрохимическому воздействию, и только на них происходит непрерывное удаление пленки. Наоборот, во впадинах микронеровностей формируется толстый защитный слой пленки. Все это ведет к уменьшению высотных параметров шероховатости, достижению высокой точности и получению зеркальной поверхности.

Обрабатываемые материалы при АМО определяются комплексом их электрохимических и тепловых характеристик, куда входят электрохимический эквивалент, способность к пассивированию, теплопроводность, теплоемкость, температура плавления; вместе с тем она практически не зависит от механических характеристик обрабатываемого материала. Наиболее хорошо черновой анодно-механической обработке поддаются материалы, обла-

дающие малой теплопроводностью и низкой температурой плавления. Особенно плохо обрабатываются этим методом твердые сплавы, вольфрам (из-за высокой температуры плавления), и медь (из-за высокой теплопроводности). Среднее положение занимают черные металлы. При чистой обработке основное влияние на обрабатываемость оказывают электрохимические параметры.

Режимы АМО определяются электрическими параметрами - плотностью тока, напряжением - и механическими параметрами - давлением инструмента на обрабатываемую поверхность, скоростью относительного движения. Кроме того, к ним относятся вид, способ подачи электролита, его расход и давление.

Анодно-абразивная обработка (ААО) является чистовым комбинированным методом, при котором механическое действие осуществляется абразивным инструментом. Наиболее распространенным видом этой обработки является анодно-механическое шлифование (АМШ). Электропроводящий шлифовальный круг, состоящий из абразивных зерен, электропроводящего наполнителя и связки, соединяется посредством скользящего контакта с отрицательным полюсом источника постоянного тока, т.е. круг одновременно является катодом и режущим инструментом. Заготовка служит анодом. В зазор между обрабатываемым металлом и кругом через форсунку подается электролит. Электропроводящие абразивы получают заполнением расплавленным металлом пор обычных шлифовальных кругов на керамической связке, осаждением металлов и их солей в поры шлифовального круга или изготовлением абразивных инструментов на электропроводящей связке. В последнем случае шлифовальные круги получают шаржированием алмазного порошка в медную или стальную основу. Электролиты представляют собой водные растворы калиевой или натриевой селитры с добавками нитрита натрия в качестве ингибитора коррозии. Таким электролитом является, например, 5- и 10%-ный водный раствор.

Основной рабочий процесс при анодно-абразивной обработке обусловлен следующим физико-химическим механизмом:

1) анодное растворение срезаемого слоя, приводящее к снятию части металла и образованию пленки;

2) нагрев материала срезаемого слоя вследствие пропуска постоянного тока и периодических коротких разрядов через зону обработки, имеющую значительное сопротивление;

3) электроэрозионное разрушение, проявляющееся в виде слабого искрения (даже при обработке на мягких режимах);

4) механическое срезание металла, предельно размягченного анодным воздействием, тепловым и электроэрозионным процессом.

При применении анодно-абразивного шлифования (ААШ) по сравнению с обычным шлифованием снижается параметр шероховатости, получается зеркально-блестящая поверхность с  $Ra = 0,04 \dots 0,16$  мкм при малом уровне структурных изменений и достаточных напряжениях.

Достоинством ААШ по сравнению с обычным шлифованием является отсутствие значительного тепловыделения, поэтому в поверхностном слое не возникают значительные структурные превращения и внутренние напряжения. Работоспособность шлифовального круга поддерживается его самозатачиванием в процессе обработки, которое происходит вследствие выкрашивания выступающих или сильно изношенных абразивных зерен, а также нарушения связки и наполнителя при электрических разрядах. Эти процессы обуславливают получение малых высотных параметров шероховатости поверхности, чему значительно способствует анодное растворение выступающих микронеровностей поверхности.

Давление круга на обрабатываемую поверхность является одним из важнейших параметров ААШ, так как оно определяет степень внедрения режущих зерен и зазор. О давлении можно судить по силе тока. Резание с малым давлением круга на заготовку ведет к малому внедрению режущих зерен в обрабатываемую поверхность, повышенным зазорам, что вызывает уменьшение интенсивности электрохимического и электроэрозионного воздействий. По этим причинам съем металла мал, и велики высотные параметры шероховатости поверхности. Повышение давления до  $0,2 \dots 0,3$  МПа обеспечивает максимальные съем и шероховатость поверхности. Дальнейшее его увеличение ведет к росту удельного веса в процессе съема механического резания, что вызывает ухудшение шероховатости поверхности и точности обработки. Учитывая это, для достижения наилучших параметров шероховатости поверхности и точности обработки анодно-механическое шлифование следует выполнять при небольшом давлении, больших скоростях резания и интенсивном относительном движении заготовки и инструмента (двойных ходах).

Анодно-алмазная обработка является разновидностью анодно-абразивной обработки. Наиболее широко применяется анодно-алмазное шлифование (ААлШ). Его

осуществляют токопроводящими алмазными кругами в среде электролита. Этот метод сочетает высокую скорость электрохимического растворения, обусловленную большими поверхностными плотностями тока (до 200 А/см<sup>2</sup>) и крайне малыми зазорами, с алмазным шлифованием, обеспечивающим интенсивное удаление продуктов растворения. Низкое напряжение снижает интенсивность эрозионных разрушений. Это позволяет получать низкие параметры шероховатости поверхности при большой производительности обработки. Электропроводные круги получают путем заполнения расплавленным металлом пор обычных шлифовальных кругов на керамической связке, с добавлением металлов и их солей в порах шлифовального круга или использованием электропроводных связок. В последнем случае шлифовальные круги получают шаржированием алмазного порошка в медную или стальную основу. Шаржирование осуществляют путем нанесения на поверхность металлического круга тонкого слоя смазки с алмазным порошком и последующей обкаткой роликом из закаленной стали.

Анодно-механическое хонингование (АМХ) является разновидностью отделочной анодно-абразивной обработки электронейтральным инструментом. Оно осуществляется подобно обычному хонингованию и с подачей электролита и электрического тока в зону обработки. Источниками тока в этом случае служат низковольтные генераторы постоянного тока, селеновые и другие типы выпрямителей. При обработке абразив последовательно удаляет оксидный слой, образующийся при электрохимическом растворении; вследствие механического воздействия этот процесс позволяет избежать формирования поляризованных слоев, играющих основную роль при обычной электрохимической обработке. По этой причине метод электрохонингования не требует использования электролитов, вызывающих сильную коррозию. Вследствие резкого снижения удельного веса механического воздействия детали, обработанные этим методом, имеют поверхностный слой, свободный от внутренних напряжений. Электрохонингование является более производительным методом по сравнению с обычным хонингованием.

Электро-химико-ультразвуковая обработка осуществляется путем подвода к детали и инструменту (ультразвуковой головке) постоянного тока, а в качестве абразивной суспензии вместо воды используется электролит, куда вводится абразив - карбид бора зернистостью 50 ... 150 мкм. Ультразвуковые колебания значительно интенсифицируют процессы анодного растворе-

ния металла. Применение комбинированного метода, сочетающего электрохимическую и ультразвуковую обработку, увеличивает производительность в 2-3 раза при одновременном снижении износа инструмента. Хорошие результаты этот метод, разработанный ЭНИМСом, дает и при обработке заготовок из вольфрама. Производительность комбинированного метода не является арифметической суммой производительности составляющих процессов, а превосходит ее в 2,5-3 раза. Точность обработки этим методом ниже точности, полученной при ультразвуковой обработке; погрешность не превышает 0,1 мм.

### 2.8.5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Электромеханическая обработка (ЭМО) основана на сочетании термического и силового воздействия на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к изменению физико-механических и геометрических показателей поверхностного слоя деталей и, как следствие, к повышению износостойкости, предела выносливости и других эксплуатационных характеристик.

Сущность метода ЭМО заключается в том, что в процессе обработки через место контакта инструмента (ролик, пластина) и заготовки проходит ток большой силы и низкого напряжения. Выступы микронеровностей поверхностного слоя подвергаются сильному нагреву и под силовым воздействием инструмента деформируются и сглаживаются, а поверхностный слой упрочняется за счет быстрого отвода тепла в основную массу материала и скоростного охлаждения от температуры фазового превращения металла; при этом нагрев до температур фазовых превращений является необходимым условием упрочняющих режимов обработки.

Электромеханическая обработка характеризуется следующими особенностями.

1. Тепловое и силовое воздействие на поверхностный слой осуществляется одновременно.

2. Тепловыделение в зоне контакта инструмента и заготовки является следствием действия двух основных источников теплоты: внешнего (теплоты, выделяющейся в процессе трения между инструментом и деталью во время обработки) и внутреннего (теплоты, выделяющейся при прохождении тока через место контакта). При этом особенностью второго источника тепловыделения является то, что теплота от него создается одновременно и мгновенно во всем локальном объеме поверхностного слоя, находящегося в контакте с инструментом в данный момент времени.

3. Термический цикл (нагрев, выдержка и охлаждение) весьма кратковременный и измеряется долями секунды. Высокая скорость охлаждения определяется интенсивным отводом теплоты внутрь детали.

В местах локализации тепловыделения в поверхностном слое температура выходит за критическую точку и происходит сначала аустенитное превращение, а затем интенсивная закалка, вызванная большой скоростью отвода теплоты из зоны контакта.

Эффект упрочнения ЭМО достигается благодаря тому, что реализуются сверхбыстрые скорости нагрева и охлаждения, и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Разработаны различные методы электромеханического упрочнения, при реализации которых варьируются следующие условия:

1. *Способ подвода электрического тока к месту контакта инструмента и заготовки:*

подвод от неподвижного контакта, закрепленного на станке (рис. 2.8.6);

подвод от неподвижного контакта через вращающиеся элементы оборудования (рис. 2.8.7);

подвод тока через катящийся ролик (рис. 2.8.8);

подвод тока через катящиеся двоянные ролики (рис. 2.8.9).

Каждый из способов подвода тока обладает своими преимуществами и недостатками.

2. *Род тока:* постоянный и переменный.

Упрочнение при применении постоянного тока позволяет добиться лучшего качества поверхности. Это объясняется лучшим прогревом микронеровностей, уменьшением сопротивляемости их деформированию и снижением вибрации при упрочнении постоянным током. Однако наблюдается резкий перепад твердости упрочненного слоя и неупрочненной сердцевины, что может привести к отслаиванию поверхностного слоя, подвергшегося ЭМО.

Применение переменного тока обеспечивает плавный переход твердости от поверхности к сердцевине, большую глубину упрочнения и более высокую микротвердость упрочненного слоя. Повышение твердости можно объяснить пульсацией переменного тока и образованием сегментообразных светлых полей, имеющих большую поверхность контакта с окружающей средой, что приводит к более интенсивной теплоотдаче и, как следствие, к более интенсивной закалке.

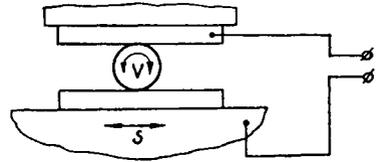


Рис. 2.8.6. Схема подвода тока через неподвижный контакт

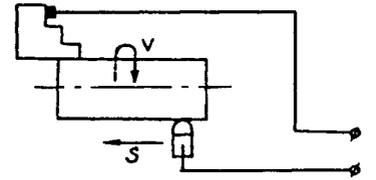


Рис. 2.8.7. Схема подвода тока через вращающиеся элементы оборудования

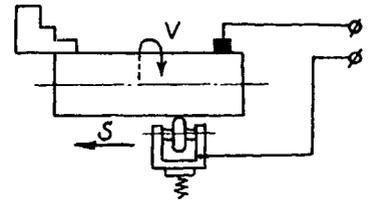


Рис. 2.8.8. Схема подвода тока через ролик

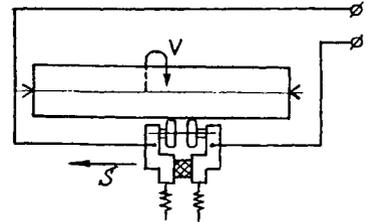


Рис. 2.8.9. Схема подвода тока через двоянные ролики

3. *Способ подачи тока во времени:*

сплошной при постоянной подаче тока, что позволяет получить равномерно упрочненную поверхность;

импульсный при прерывистой подаче тока, что позволяет не допустить перегрева поверхностного слоя при значительной силе тока и, кроме того, формировать на упрочняемой поверхности специфическую структуру, представляющую собой чередование упрочненных и неупрочненных участков.

4. *Вид инструмента:*

пластина, работающая в условиях трения скольжения;

ролик, работающий в условиях трения качения, что снижает тепловыделение внешнего источника теплоты при ЭМО; при этом повышается стойкость инструмента.

В зависимости от назначения и типа обрабатываемых деталей для ЭМО могут быть использованы токарные, фрезерные, сверлильные и другие металлорежущие станки, оснащенные соответствующими приспособлениями для придания требуемого взаимного расположения инструмента и детали.

В качестве источника переменного тока используют, в основном, понижающие трансформаторы с питанием от сети 220/380 В, предназначенные для работы в режиме короткого замыкания тока, в частности, трансформаторы машин для контактной сварки. Мощности трансформатора выбирают в зависимости от его технологического назначения: обрабатываемых деталей, их размеров, конструкции инструмента, серийности производства.

Для многих процессов ЭМО (обработка зубчатых колес, упрочнение цилиндров, плоских поверхностей, восстановление деталей с добавочным металлом), особенно при одновременном использовании нескольких инструментов, а также при обработке крупногабаритных деталей требуется большая мощность источника тока, а сила тока во вторичной цепи может достигать 2000 ... 5000 А. В этих случаях наиболее подходящими являются трансформаторы для контактной сварки мощностью 25 ... 50 кВт.

При выборе мощности трансформатора следует учитывать, что продолжительность его включения при ЭМО может достигать 30 ... 50 % рабочего времени. Для упрочнения малогабаритных деталей перспективным является применение бестрансформаторных схем обработки, основанных на использовании тиристорных преобразователей, что значительно снижает габариты, массу устройства для ЭМО и его стоимость.

В целях минимизации габаритов электрических блоков управления бестрансформаторных схем целесообразно применение высококачественных преобразователей, позволяющих получить на выходе частоту тока до 50 кГц.

В качестве источников постоянного тока могут быть использованы мощные низковольтные выпрямители, а также электромагнитные преобразователи. Регулирование силы тока осуществляется включением в рабочую силовую цепь или в цепь возбуждения балластных реостатов или путем введения в питающую цепь специальных автотрансформаторов.

Управление током при осуществлении процесса ЭМО в импульсном режиме может осуществляться с помощью сварочных прерывателей тока и специальных полупроводниковых регуляторов тока во вторичной цепи трансформаторов или в выходных цепях тиристорных преобразователей.

Одной из важных задач реализации методов электромеханического упрочнения является выбор соответствующего проводимым процессам материала инструмента, являющегося наиболее критичным элементом технологических установок ЭМО, работающим в жестких условиях - при высоких температурных и силовых нагрузках. При этом необходимы высокая электрическая проводимость материала и достаточная износостойкость контактной поверхности. В этой связи наиболее целесообразным является применение в качестве материала инструмента термостойких бронз и твердых сплавов с насыщением объема материалами на основе меди.

Преимуществом инструмента с неподвижным креплением (типа пластин) является возможность получения высоких параметров шероховатости ( $Ra = 0,2 \dots 0,63$  мкм). Однако, сравнительно небольшая стойкость ограничивает его применение обработкой поверхностей небольших размеров (типа шеек валов) в мелкосерийном и ремонтном производстве. Преимущество инструмента с подвижным креплением (ролика) заключается в том, что обладая большой массой, он гарантирует большую стабильность рабочего профиля. Кроме того, ролики имеют высокую стойкость, их используют при упрочнении деталей на большую глубину, при обработке поверхностей больших размеров, когда не предъявляются высокие требования к параметрам шероховатости поверхности, а также при обработке заготовок из чугуна.

Большое значение имеет выбор державок для рабочего инструмента. Регулирование силы прижима инструмента может осуществляться самими державками с помощью спиральных пружин, пневматических и гидравлических устройств, плоских пружин. Державки на основе плоских пружин менее чувствительны к воздействию вибрации. При установке державки ее необходимо изолировать от станка пластинами из изоляционного материала (гетинакс, текстолит). В конструкции державки должна быть предусмотрена тепловая разгрузка пружинящей части путем подведения тока непосредственно к инструменту. В качестве охлаждающей среды инструмента и зоны упрочнения применяют сжатый воздух, эмульсию или раствор электролита на основе  $NaCO_3$ ,  $NaNO_2$ ,  $NaNO_3$ .

Геометрия инструмента выбирается, исходя из обеспечения требуемых диапазонов плотности тока в контакте инструмент-деталь, типа обрабатываемых деталей и способа подвода тока.

Электромеханическое упрочнение связано, в основном, с резким повышением твердости и прочности и в меньшей мере влияет на другие физико-механические характеристики материала.

В зависимости от степени влияния на структуру и свойства поверхностного слоя различают следующие режимы электромеханического упрочнения:

1. *Жесткий упрочняющий режим*, в результате которого в поверхностном слое значительной глубины образуется светлая зона мелкодисперсного мартенсита, а в переходном слое отсутствуют значительные пластические деформации. Данный режим предусматривает высокую поверхностную плотность тока ( $700 \dots 1500 \text{ А/мм}^2$ ) в контакте инструмента с деталью, низкую скорость обработки ( $0,5 \dots 5 \text{ м/мин}$ ) и невысокие требования к параметрам шероховатости поверхности.

2. *Средний упрочняющий режим*, характеризуемый незначительной глубиной упрочнения, наличием светлой и темной зон ферритно-мартенситной структуры поверхностного слоя и значительным деформированием переходного слоя. Поверхностная плотность тока в контакте ниже  $800 \text{ А/мм}^2$ , причем, ее значение непосредственно влияет на наличие или отсутствие фазовых превращений. Скорости обработки аналогичны или несколько выше применяемых на жестком режиме упрочнения. Высокие давления оказывают отрицательное действие на упрочняющих режимах ЭМО. Давление инструмента на обрабатываемую поверхность выбирается исходя из требований к глубине и параметрам шероховатости поверхностного слоя.

3. *Отделочный режим* характеризуется отсутствием фазовых превращений, невысокой поверхностной плотностью тока в контакте, высокими скоростями обработки ( $10 \dots 120 \text{ м/мин}$ ), значительными давлениями инструмента. Применяется, когда не требуется существенная глубина упрочнения. При этом достигается высокая производительность.

Общая закономерность при выборе режимов ЭМО состоит в следующем. Чем больше удельное насыщение энергией поверхностного слоя до момента его охлаждения, тем выше его упрочняемость по глубине. Повышение скорости способствует уменьшению глубины упрочнения. Однако, в весьма тонком поверхностном слое увеличенная скорость может оказаться доминирующим фактором в связи с тепловыделением от трения, что также происходит с увеличением давления в контакте при малых силах тока. При высоких скоростях нагрева возможно неполное аустенитное превращение, однако под действием высоких давлений структура настолько измельчается, что превращение происходит даже при высоких скоростях. Выбор оптимальных режимов ЭМО представляет значительный практический интерес и зависит от требуемой степени и глубины упрочнения,

параметров шероховатости поверхности, закономерностей контактного нагрева, начальных параметров шероховатости, геометрии инструмента, структуры обрабатываемой заготовки, метода электромеханического упрочнения и т.д.

Параметры шероховатости обработанных поверхностей при ЭМО зависят от исходных параметров шероховатости, геометрии инструмента, его шероховатости, значений подачи, давления, силы и рода тока, скорости обработки. Во всех случаях обработка должна осуществляться при достаточной жесткости технологической системы и отсутствии существенной вибрации. При этом параметры шероховатости рабочей поверхности инструмента должны быть ниже требуемых параметров шероховатости после обработки, а подача - меньше применяемой при механической обработке.

Параметры шероховатости обработанной поверхности после ЭМО в значительной мере зависят от подачи и радиуса инструмента. Увеличение радиуса инструмента снижает влияние подачи. С увеличением исходных параметров шероховатости повышается степень неоднородности образованной поверхности и увеличивается вероятность отклонения силы деформирования от оптимального значения. При обработке на упрочняющих режимах ЭМО параметры шероховатости поверхности должны сочетаться с необходимой высокой глубиной упрочнения. При скорости обработки ниже  $5 \text{ м/мин}$  наблюдается значительное уменьшение параметров шероховатости поверхности, что объясняется влиянием повышенного нагрева. Основное влияние на параметры шероховатости оказывает первый рабочий проход; последующие два снижают параметры шероховатости меньше. Дальнейшее увеличение числа рабочих проходов приводит к повышению параметров шероховатости. Практически их не должно быть больше трех. Однако повторные проходы могут приводить к отпуску материала заготовки и снижению поверхностной микротвердости.

Зависимость параметров шероховатости от давления инструмента на поверхность имеет экстремальный характер. Поэтому необходима экспериментальная оптимизация значения давления при совокупности влияния остальных факторов. При упрочнении постоянным током осуществляется лучший прогрев микронеровностей и уменьшение их сопричастности деформированию. Поэтому увеличение силы постоянного тока существенно не ухудшает шероховатость в отличие от переменного, с увеличением амплитуды которого происходит увеличение вибрации и сопричастности неровностей деформирова-

нию, что приводит к повышению параметров шероховатости поверхностного слоя, однако глубина упрочнения при этом повышается и превосходит глубину упрочнения постоянным током при аналогичных его значениях.

Оптимальные режимы электромеханического упрочнения позволяют добиться не только требуемых параметров шероховатости, но и возможности получить закаленную структуру поверхностного слоя с повышенной износостойкостью, что обуславливается его высокой твердостью, прочностью и мелкозернистой структурой. Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое от сил деформирования оказывают благоприятное влияние на различные виды разрушающих нагрузок в совокупности с повышенной пластичностью после ЭМО, что является одной из причин повышения контактной прочности поверхностного слоя. Кроме того, износостойкость повышается за счет образования после ЭМО большей несущей способности профиля, чем после механической и термической обработки, что уменьшает время приработки, а отсутствие прижогов и трещин наряду со снижением числа микронеровностей снижает число микроконцентраторов напряжения, что наряду с упрочнением поверхностных слоев повышает выносливость деталей на удар. Повышение износостойкости деталей машин, работающих в условиях трения скольжения, возможно также за счет электромеханической обработки при протекании электрического тока по импульсной схеме, благодаря чему на упрочняемой поверхности формируется специфическая текстура, представляющая собой чередование упрочненных и неупрочненных участков.

Кроме повышения износостойкости ЭМО повышает также сопротивление усталости поверхностного слоя. Это связано с наличием остаточных напряжений сжатия, появляющихся в мартенситной структуре при умеренных температурах ЭМО, которые выше точки  $A_{C1}$ , и небольших давлениях. Однако при высоких температурах и значительных давлениях можно ожидать появления растягивающих остаточных напряжений в светлой зоне поверхностного слоя, несмотря на его мартенситное строение, что приводит к снижению ЭМО предела выносливости. В условиях ЭМО знак и величина напряжений будут зависеть от совокупности температурного и силового воздействия на поверхностный слой. Применение постоянного тока не дает существенного повышения сопротивления усталости по сравнению с применением переменного тока. Для деталей, работающих при высоких динамических нагрузках и в особенности в местах концентрации напряжений

(переходные сечения, галтели, канавки и др.), целесообразно совместное применение обработки с током и без тока, что способствует образованию в поверхностном слое благоприятных остаточных напряжений сжатия.

Поверхностные слои деталей, обработанные ЭМО, обладают более высокой теплоустойчивостью по сравнению с другими видами термической обработки. Причем, снижение микротвердости поверхностного слоя практически не наблюдается до температуры отпуска около 300 °С, а полное разупрочнение светлой зоны наблюдается при температуре отпуска свыше 600 °С. Интенсивность изменения прочностных свойств поверхностного слоя в процессе старения существенно зависит от режимов ЭМО. Наиболее интенсивное падение прочности наблюдается у образцов с более высокой твердостью, обработанных по более жесткому режиму.

Упрочнение поверхностных слоев ЭМО повышает их коррозионную стойкость (особенно в кислой среде), в частности фреттингостойкость. Это объясняется не только высокой степенью упрочняемости, особой структурой и дисперсностью поверхностного слоя, но и совокупностью благоприятных физико-механических свойств этого слоя. При этом существенное значение имеют особенности микропрофиля поверхности, связанные с увеличением радиусов закругления микровыступов и впадин, а также увеличение опорной поверхности, что приводит к уменьшению контактных давлений сопрягаемых деталей. Влияние плотности тока на фреттингостойкость имеет экстремальный характер, что можно объяснить развитием усталостных трещин в связи с увеличением параметров шероховатости при значительных значениях плотности тока.

Эффективно применение ЭМО для таких деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии, как сопряжения "вал-подшипник качения", "корпусная деталь - подшипник качения", где происходят относительные микроперемещения вследствие вибраций и приложения ударных нагрузок в процессе эксплуатации детали. Таким же воздействием подвергаются детали автотракторных, строительных и горных машин.

В связи с повышением эксплуатационных свойств электромеханическое упрочнение целесообразно применять для широкой номенклатуры деталей, работающих в различных условиях трения и изнашивания.

Так, эффективным является применение ЭМО для деталей транспортного, сельскохозяйственного, дорожного, строительного машиностроения, которые в процессе эксплуатации подвергаются тяжелым нагрузкам в условиях граничного трения и абразивного

изнашивания. В качестве примера можно привести упрочнение шеек рессорных подвесок локомотива; шеек крупногабаритных валов; шкворня поворотного кулака, шаровых опор, чашек дифференциала заднего моста автомобиля; галтелей валов коробок передач; цилиндров двигателей; цилиндров насосов, гидравлических и пневматических механизмов; торцовые поверхности: поршневых колец, дисков тормозных устройств.

Упрочнение плоских поверхностей ЭМО на фрезерных станках имеет существенное значение для таких деталей, как направляющие станин, ножи режущих аппаратов сельскохозяйственных машин, лапы культиваторов, штанги различных типов инструментов, ножи измельчителей кормов. Методы электромеханического упрочнения находят также применение для упрочнения: винтовых поверхностей - ходовые винты станков, глобидные червяки рулевого управления автомобиля, цилиндрические и конические резьбовые соединения (с метрической и трубной резьбой); зубьев зубчатых колес - цилиндрических, конических, червячных; инструмента - сверл, фрез, разверток, зенкеров, пуансонов, матриц, долбяков, червячных фрез, зубострогальных резцов - по передним и задним режущим поверхностям; поверхностей деталей, образованных металллизацией, напылением, нанесением покрытий, наплавкой.

Важную роль ЭМО играет применительно к восстановлению нормально изношенных поверхностей деталей, таких как посадочные поверхности, неподвижные и подвижные соединения и сопряжения с добавочным металлом и без него, упругих свойств пружин.

В условиях серийного производства и ремонта деталей основной задачей совершенствования методов электромеханического упрочнения должно явиться повышение производительности процесса и обеспечение высокого качества обрабатываемых деталей за счет применения многоинструментальных приспособлений, автоматизации технологического процесса ЭМО, развитие САПР ЭМО в целях обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин путем научно обоснованного выбора и нормирования режимов обработки.

#### 2.8.6. МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Магнитно-абразивная обработка (МАО) - абразивная обработка, осуществляемая при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле.

Сущность МАО состоит в преимущественно абразивном удалении припуска с созданием непосредственно в зоне резания магнитного поля от внешнего источника. В качестве абразивного инструмента (АИ) в разных схемах процесса применяют: магнитно-абра-

зивные порошки (в дальнейшем - порошки), шлифовальные круги, бруски, шкурки, абразивные суспензии, магнитно-реологические жидкости с абразивным наполнителем. Перемещения металлической заготовки в магнитном поле сопровождаются появлением в ней индукционных электрических токов перпендикулярного направления, электрической зарядностью обрабатываемой поверхности, многократным перемagnetиванием. Абразивное резание с наложением этих явлений имеет ряд особенностей. По причине действия магнетно- и электропластического эффектов изменяются прочностные характеристики обрабатываемого материала, главным образом, в приповерхностном слое. Снижаются силы, необходимые для диспергирования и пластического выглаживания обрабатываемой поверхности, облегчаются условия для формирования поверхностей с малыми параметрами шероховатости поверхности и с увеличенной опорной площадью. Электрическая зарядность обрабатываемой поверхности интенсифицирует электрохимические явления и поверхностную диффузию полярных молекул поверхностно-активных жидкостей. Этим объясняют необычно высокую эффективность применения химически- и поверхностно-активных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в операциях МАО, по сравнению с традиционными видами абразивной обработки.

Магнитное поле в процессе МАО используют для создания сил резания, сообщения рабочих движений АИ или заготовке, формирования АИ из магнитно-абразивного порошка и управления его жесткостью, для сообщения движений зернам магнитно-абразивного порошка, интенсификации других абразивных методов обработки. Схема хонингования отверстия брусками, прижатыми к обрабатываемой поверхности силами отталкивающихся друг от друга постоянных магнитов, приведена на рис. 2.8.10, а; схема обработки длинномерного отверстия брусками, прижатыми к отверстию упругим баллоном со сжатым воздухом и размещенными в корпусе, вращение и продольное перемещение которому сообщают с помощью наружного статора с трехфазным током и закрепленного на корпусе АИ электромагнита постоянного тока - на рис. 2.8.10, б; схема полирования в контейнере с абразивной суспензией швейных игл, движущихся по окружности контейнера под действием вращающегося магнитного поля наружного статора трехфазного тока - на рис. 2.8.10, в; схема полирования валика магнитно-абразивным порошком, удерживаемым в рабочих зазорах  $\delta$  электромагнитом постоянного тока - на рис. 2.8.10, г; схема интенсификации виброабразивной обработки путем изменения скорости относи-

тельно движения ферромагнитных заготовок и абразивной среды с помощью наружных электромагнитов - на рис. 2.8.10, *д*; схема подмагничивания заготовки при плоском шлифовании для повышения периода стойкости шлифовального круга - на рис. 2.8.10, *е*.

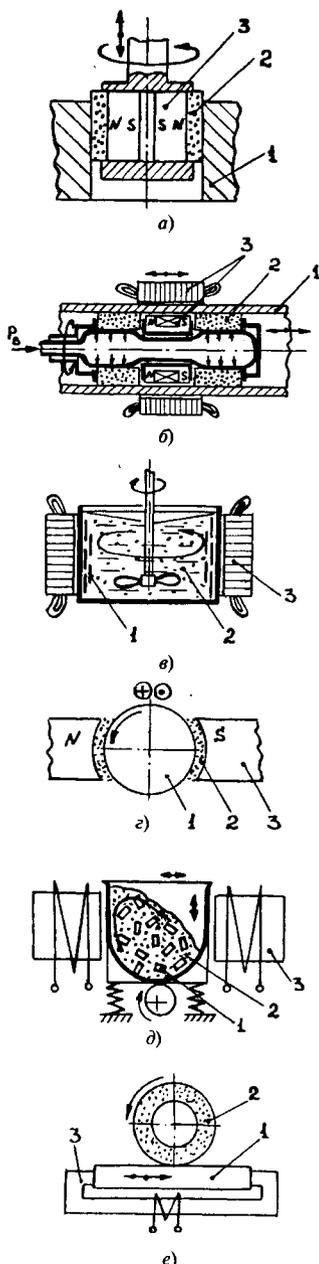


Рис. 2.8.10. Способы магнитно-абразивной обработки:  
1 - заготовка; 2 - абразивный инструмент;  
3 - источник магнитного поля

В способах MAO, использующих в качестве АИ магнитно-абразивный порошок, магнитное поле создают с помощью специальных магнитных индукторов (МИ). *Активная поверхность (АП)* - поверхность с размещенными на ней полюсами МИ, обращенная к обрабатываемой поверхности. *Рабочий зазор  $\delta$*  - пространство между АП и обрабатываемой поверхностью заготовки, заполняемое порошком. *Рабочая зона* - пространство между полюсами МИ, заполняемое порошком, в которое помещена заготовка. На рис. 2.8.11 приведены схемы MAO: *а* - плоских поверхностей с размещением порошка в рабочем зазоре  $\delta$  на торцевой активной поверхности МИ; *б* - наружных цилиндрических поверхностей вращения с порошком в рабочей зоне электромагнита; *в* - фасонных внутренних и наружных поверхностей колец прядильных машин, с порошком в рабочих зазорах  $\delta$ ; *г* - проволоки с целью очистки путем протягивания через вращающуюся воронку, заполненную порошком и помещенную в соленоиде; *д* - листового материала, с помощью порошка, нанесенного на АП вращающихся полюсов электромагнита.

На активной поверхности МИ, в рабочем зазоре и в рабочей зоне порошок удерживается силами магнитного поля и силами трения порошка с АП индуктора. Силы, необходимые для абразивного резания и действующие в контакте порошка с заготовкой, создаются благодаря сжатию порошковой среды в рабочем зазоре (рабочей зоне) магнитными силами и возникновению по этой причине распорных давлений в этой среде, направленных на обрабатываемую поверхность и АП индуктора. При наличии составляющих магнитных сил, направленных к обрабатываемой поверхности, давление порошка на заготовку возрастает. Силы трения в контакте порошка с заготовкой создают дополнительные давления в порошковой среде и на ее границах. Изменяя форму рабочего зазора (рабочей зоны), можно управлять направлением действия магнитных сил и интенсивностью удаления припуска.

Магнитно-абразивную обработку с порошком в качестве АИ применяют на отделочных технологических операциях для полирования поверхностей, их очистки от оксидных и химических пленок, удаления мелких заусенцев, скругления кромок, отделки и упрочнения режущих и штамповых инструментов.

При исходной шлифованной поверхности с параметром шероховатости  $Ra = 3,2 \dots 6,3$  мкм на операции MAO можно производительно получить поверхность с параметром  $Ra = 0,02 \dots 0,08$  мкм. Обработанные этим ме-

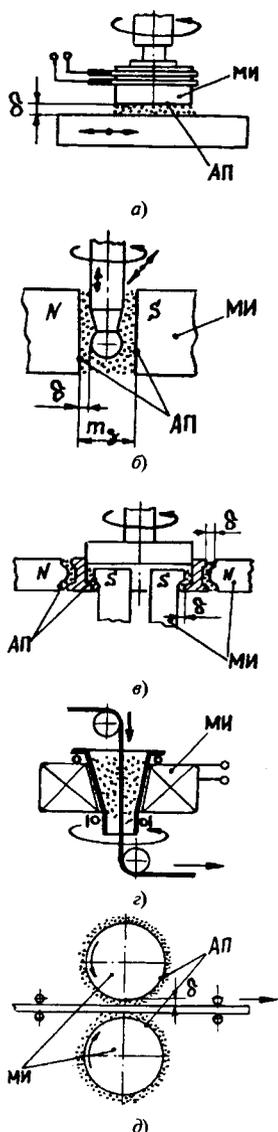


Рис. 2.8.11. Схемы магнитно-абразивной обработки порошком

тодом поверхности отличаются повышенными износостойкостью, циклической долговечностью, коррозионной стойкостью, теплостойкостью. Улучшение названных эксплуатационных свойств стальных заготовок происходит в результате удаления исходного дефектного слоя фазовых и структурных превращений, а также изменения химического состава в тонком приповерхностном слое под воздействием многократного перемагничивания материала заготовки при одновременных массовых микропластических деформациях обрабатываемой поверхности в процессе МАО.

Процесс отличается низкими температурами резания и, соответственно, отсутствием их неблагоприятного воздействия на свойства обработанных поверхностей.

Магнитно-абразивной обработке могут подвергаться ферромагнитные и немагнитные материалы с широким диапазоном твердости и вязкости. При обработке ферромагнитных заготовок легче создать в рабочей зоне (рабочем зазоре) магнитное поле высокой напряженности и обеспечить интенсивную обработку.

Для каждой схемы процесса МАО существует свой перечень управляемых технологических параметров. Наиболее часто встречаются технологические параметры:  $v$  - скорость главного движения;  $v_с$  - скорость подачи;  $v_д$  - скорость дополнительного движения;  $n_0, A_0$  - частота и амплитуда осциллирующего движения;  $B$  - магнитная индукция в рабочем зазоре;  $\delta$  - высота рабочего зазора;  $m_з$  - ширина рабочей зоны;  $\tau$  - длительность обработки (основное время);  $\delta$  - зернистость порошка;  $V_п$  - размер разовой порции порошка. Численные значения технологических параметров в условиях крупносерийного производства оптимизируют экспериментальным путем применительно к конкретным условиям (обрабатываемый материал; форма, размеры, исходные и требуемые параметры шероховатости обрабатываемой поверхности). В условиях мелкосерийного, гибкого производства режим обработки оптимизируют для эталонного обрабатываемого материала, распространяя затем этот же режим на другие материалы. Особенности обработки, связанные с отличием обрабатываемых материалов от эталонного по прочностным и магнитным свойствам, учитывают, изменяя длительность обработки  $\tau$ :

$$\tau = \left( \frac{h}{h_1} \right)^{\frac{1}{m}}; \tag{2.8.1}$$

$$\tau = \left( \frac{Ra_n - Ra_r}{c} \right)^{1/p}. \tag{2.8.2}$$

Здесь:  $h$  - требуемое значение удаляемого припуска;  $h_1$  - значение припуска, удаляемого за первую минуту обработки;  $m$  - показатель степени, характеризующий затухание сьема припуска во времени;  $Ra_n$  - исходное значение параметра  $Ra$ ;  $Ra_r$  - требуемое значение параметра  $Ra$ ;  $c$  - изменение параметра  $Ra$  за первую минуту;  $p$  - показатель степени. Формулой (2.8.1) пользуются, когда задан припуск  $h$ , а формулой (2.8.2) - когда задан требуемый параметр шероховатости  $Ra_r$ .

Параметры  $h_1, m, c, p$  при постоянных условиях обработки (режим, порошок, СОЖ)

являются функциями физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Порция порошка, участвующая в обработке, подлежит периодической замене в связи с постепенным снижением ее режущей способности. Период стойкости порции определяют для конкретной технологической операции. С помощью найденных значений  $h_1$  и  $m$  вычисляют период стойкости

$$T_{\min} = 1 - m \sqrt{\frac{m h_1 \tau_m}{h_{\min}}},$$

где  $\tau_m$  - машинное время на данной технологической операции;  $h_{\min}$  - минимальный припуск, обеспечивающий полученный параметр шероховатости  $R_a$ .

Магнитно-абразивные порошки могут быть изготовлены с зёрнами из монолитного материала, обладающего одновременно абразивными и ферромагнитными свойствами, либо состоять из соединённых между собой абразивного и ферромагнитного компонентов. Способ соединения компонентов в зёрне предопределяет структуру зёрна, распределение абразивных включений по его объёму и, в итоге, эксплуатационные свойства порошка. Характеристиками порошков служат: магнитная проницаемость в рабочем диапазоне магнитной индукции ( $B = 0,8 \div 1,2$  Тл), твердость монолитных зёрен или абразивного компонента составных зёрен, прочность зёрна, зернистость порошка, размер абразивных включений в составном зёрне, процентное соотношение абразивного и ферромагнитного компонентов в зёрне, форма зёрен, структура зёрен, радиусы округления и углы заострения режущих вершин зёрна.

Применение химически- и поверхностно-активных СОЖ при обработке с порошками интенсифицирует удаление припуска и способствует получению поверхностей с более высоким качеством. Вязкие СОЖ из-за фильтрации в порошке масляных составляющих и крупных молекул поверхностно-активных веществ препятствует перемешиванию порошка в рабочем зорзе, "самозатачиваемости" порошка, что способствует быстрому затуханию процесса обработки во времени. Охлаждающие свойства СОЖ в большинстве случаев не имеют существенного значения из-за низких температур на поверхности контакта порошка с заготовкой.

Магнитно-абразивную обработку осуществляют на специализированных и металлорежущих станках, снабженных специальной технологической оснасткой или модернизированных для МАО. Конструкция станка предусматривает приводы рабочих и вспомогательных движений согласно заложенной принципиальной схеме МАО, магнитный индуктор, бункер для порошка с дозатором, устройством

для очистки рабочей зоны от отработанного порошка. При обработке заготовок из ферромагнитных материалов после операции МАО их требуется демагнетизировать. Заготовки из любых материалов после МАО подвергают промывке для очистки от зёрен порошка и пленки шлама.

Магнитные индукторы станков (или сменных устройств) для МАО в своей конструкции могут предусматривать: источники магнитного поля в виде намагничивающих катушек или постоянных магнитов; магнитопроводы, обеспечивающие прохождение и замыкание магнитного потока по кратчайшему пути с наименьшим магнитным сопротивлением; механизмы для изменения размеров рабочего зорза (рабочей зоны); механизмы регулирования напряженности магнитного поля (для индукторов на постоянных магнитах); механизмы или электромагнитные средства для сообщения полюсам МИ рабочих движений.

Электромагнитные индукторы (ЭМИ) позволяют создавать магнитные поля высокой напряженности в рабочей зоне, удобны в регулировании напряженности поля, но обладают увеличенными размерами, требуют питания электрическим током. Известны ЭМИ, питаемые постоянным униполярным пульсирующим и трехфазным токами.

Индукторы на постоянных магнитах компактны, не связаны с электрической сетью и потому удобны в качестве сменных устройств на металлорежущих станках. Регулировка напряженности создаваемого магнитного поля возможна, но затруднена и требует применения дополнительных, достаточно мощных механизмов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
2. Белый А.В., Карпек Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
3. Бойцов А.Г. и др. Упрочнение деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев и др. М.: Машиностроение, 1991. 144 с.
4. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. 304 с.
5. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наук. думка. 1984. 272 с.
6. Суслов А.Г., Гуляев Ю.В., Дальский А.М. и др. Качество машин / Справочник в 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 1995. 430 с.

## Глава 2.9

## УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## 2.9.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ

**Упрочнение** — повышение сопротивления заготовки (детали) разрушению или деформации. В зависимости от условий эксплуатации детали имеют тот или иной вид разрушения, а следовательно, их конструктивная прочность будет определяться различными характеристиками конструкционной прочности материала (КПМ).

Характеристики КПМ можно объединить в две группы: кратковременные и временные.

К первой группе относятся временное сопротивление, предел текучести, относительное сужение при разрыве, ударная вязкость и т.д., которые определяют сопротивление материала действующим нагрузкам при однократном их приложении.

К второй группе относятся длительная прочность, сопротивление усталости, контактная выносливость, износ, термостойкость, коррозия под напряжением и др., которые зависят от продолжительности нагружения.

КПМ можно повысить конструктивными, металлургическими, технологическими и эксплуатационными методами.

Современная технология располагает большим количеством методов упрочнения, которые позволяют повысить практически любую характеристику КПМ.

Различают *объемные* упрочнения, т.е. обеспечивающие примерно одинаковое упрочнение по всему сечению заготовки, и *поверхностное*, при котором осуществляется упрочнение только поверхностного слоя.

Объемное упрочнение применяется для повышения статической прочности деталей, у которых рабочие напряжения распределены по сечению более или менее равномерно. Объемное упрочнение осуществляется как правило термической объемной обработкой. Формирование требуемых эксплуатационных свойств деталей при термической обработке достигается правильным выбором материала, скорости и температуры нагрева, времени выдержки, скорости охлаждения, глубины прокаливаемости, а также сочетанием различных методов термообработки.

Большинство деталей машин работают в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка (давление, нагрев, действие окружающей среды и т.п.) воспринимается главным образом их поверхностным слоем. Поэтому долговечность таких деталей во многом

определяется физико-механическим состоянием поверхностного слоя.

Для таких деталей используют методы поверхностного упрочнения.

Поверхностное упрочнение деталей может осуществляться двумя путями: *изменением (модификацией) состояния поверхностного слоя или нанесением покрытий.*

С физической точки зрения упрочнение металла путем модифицирования представляет собой процесс увеличения дефектов кристаллической структуры (вакансии, внедренные атомы, атомы примеси, дислокации, дефекты упаковки, границы зерен, блоков, субзерен, фрагментов и др.). Особую роль отводят механизму дислокационного упрочнения. Увеличение дефектов кристаллической структуры способствует торможению подвижных дислокаций и, как следствие, повышению сопротивления сдвигу.

С другой стороны, чрезмерное увеличение дефектов кристаллической структуры металлов, может явиться источником большой локальной напряженности в металле и появлением в нем поврежденности в виде субмикро-, микро- и макропор и трещин, снижающих КПМ. Поэтому процесс упрочнения металла технологически должен быть управляем.

Упрочнение путем модификации осуществляется *термообработкой, насыщением поверхностного слоя легирующими элементами, пластической деформацией или физическими полями.*

Распространенным методом нагрева деталей под поверхностную термообработку является нагрев токами высокой частоты (ТВЧ), позволяющий получить сочетание высокой твердости поверхности и вязкости сердцевины.

Широкие возможности по упрочнению поверхностного слоя обеспечивают методы, основанные на использовании *концентрированных потоков (КПЭ) энергии.*

К КПЭ относятся потоки, плотность мощности (в Вт/см<sup>2</sup>) которых свыше 10<sup>2</sup> Вт/см<sup>2</sup>:

Газовое пламя . . . . .	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>
Низкотемпературная плазменная струя . . . . .	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>
Ионные пучки . . . . .	св. 10 <sup>4</sup>
Электрическая дуга . . . . .	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>
Электронный луч . . . . .	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>8</sup>
Лазерный луч . . . . .	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>12</sup>
Электрическая искра . . . . .	10 <sup>8</sup> - 10 <sup>9</sup>

Изменение плотности теплового потока позволяет осуществлять термическую обработку, оплавление, аморфизацию, шоковый удар поверхностного слоя, получая при этом уникальные структуры с высокими физико-

механическими свойствами, в том числе имеющие нестабильные фазы и пересыщенные твердые растворы, которые не удается получить другими методами. Используя КПЭ, можно осуществлять модифицирование поверхностного слоя при атмосферном давлении, в вакууме или в контролируемой атмосфере.

**Насыщение** поверхностного слоя металлами и неметаллами повышает их эксплуатационные свойства за счет увеличения твердости и износостойкости (углерод, азот), жаростойкости (алюминий, хром, кремний) или другие свойства. Скорость внедрения атомов легирующих элементов в кристаллическую решетку основного металла увеличивается с ростом температуры и давления.

Наряду с традиционными методами химико-термической обработки, осуществляемыми с объемным нагревом деталей, применяются методы лазерного, ионного, электроэрозионного поверхностного легирования, которые позволяют получать специфические структуры с высокими эксплуатационными свойствами.

**Поверхностное пластическое деформирование** (ППД) применяется с целью деформационного упрочнения металла и создания в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, а также получения благоприятного профиля шероховатости поверхности. ППД весьма эффективно для повышения сопротивления усталости, особенно для деталей, изготовленных из высокопрочных материалов, имеющих повышенную чувствительность к концентраторам напряжения. Наличие в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений снижает скорость распространения усталостных трещин. Малая шероховатость поверхности, имеющая большой радиус впадин, также способствует снижению концентрации напряжений на поверхности детали. Повышение износостойкости деталей обработкой ППД связано с формированием благоприятного профиля шероховатости, который сочетает хорошую опорную способность с достаточной маслоемкостью поверхности.

Модификация поверхностного слоя *физическими полями* основана на использовании импульсной магнитной обработки, нейтронного облучения и других физических методов, целенаправленно изменяющих тонкую кристаллическую структуру.

**Нанесение покрытий** применяется с целью создания поверхностного слоя, материал которого имеет значительно большую, чем основной материал, износостойкость, корро-

зионную стойкость, жаростойкость и др. свойства.

Применение покрытий позволяет технологическими способами управлять эксплуатационными свойствами поверхностного слоя, изготавливая деталь из недорогих и недефицитных материалов. Поскольку покрытия увеличивают размер, они применяются также при ремонте деталей.

Наряду с традиционными методами нанесения покрытий — химическими и гальваническими (в данной главе не рассматриваются) широкие возможности обеспечивают методы, основанные на использовании КПЭ.

При напылении газотермическими методами в атмосфере образуются покрытия толщиной от десятков микрометров до миллиметра и более.

Нанесение покрытий в вакууме осуществляется атомами или ионами материала покрытия, которые при встрече с поверхностью детали или внедряются в нее (ионная имплантация) или осаждаются на ней и, конденсируясь, образуют тонкий слой покрытия толщиной от долей до нескольких микрометров.

Покрытия, обладающие хорошими эксплуатационными свойствами, можно получить методами электроискровой обработки. Достоинство таких покрытий заключается в хорошей адгезии (сцепляемости) с основным металлом и возможности получения сложного по составу покрытия при сравнительно небольших затратах.

Расширение технологических возможностей упрочнения обеспечивают *комбинированные* технологии, основанные на использовании различных по физической сущности методов упрочнения. К комбинированным относятся методы, сочетающие термическую и механическую обработки, нанесение покрытий и диффузионный отжиг, нанесение покрытий и ППД и др. Например, электроэрозионное легирование поверхностного слоя позволяет в несколько раз повысить износостойкость деталей. Однако при этом в поверхностном слое возникают растягивающие остаточные напряжения, снижающие сопротивление усталости. Поэтому для достижения сочетания износостойкости и сопротивления усталости следует деталь дополнительно упрочнить ППД.

Выбор того или иного метода упрочнения должен быть обоснован, с одной стороны, эксплуатационными условиями работы детали, а с другой, экономическими соображениями.

### 2.9.2. УПРОЧНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБЪЕМНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Термическая обработка включает следующие основные типы: отжиг I рода, отжиг II рода, закалка без полиморфного превращения, закалка с полиморфным превращением, отпуск и старение. Каждый из этих типов термической обработки качественно отличается один от другого характером фазовых и структурных превращений.

*Отжиг I рода* частично или полностью устраняет отклонения от равновесного состояния, возникшее при предыдущей обработке (литье, штамповке, сварке и пр.), причем его проведение не связано с фазовыми превращениями. Различают следующие разновидности отжига I рода: гомогенизация, рекристаллизация, уменьшение остаточных напряжений.

*Отжиг II рода*, полностью основанный на фазовых превращениях, бывает: полный, неполный, изотермический, сфероидизирующий. Разновидностью отжига II рода является также нормализация.

*Закалка без полиморфного превращения* образует пересыщенный твердый раствор.

*Старение* обеспечивает распад пересыщенного твердого раствора с выделением дисперсных фаз, приводящих к упрочнению. Старение подразделяется на естественное (20°C) и искусственное с нагревом до определенной температуры. Закалка на пересыщенный твердый раствор со старением — это основной способ упрочняющей обработки сплавов цветных металлов. Он применяется также для сталей, в частности — мартенситно-старяющихся.

*Закалка с полиморфным превращением* (закалка на мартенсит) связана с мартенситным превращением высокотемпературной

фазы. С целью упрочнения закалке на мартенсит подвергают титановые сплавы, но особенно широко ее применяют в производстве стальных деталей. В зависимости от нагреваемого объема закалку разделяют на объемную и поверхностную, а в зависимости от метода охлаждения, принятого при закалке, различают закалку непрерывную, прерывистую, ступенчатую, изотермическую и закалку с самоотпуском.

*Отпуску* подвергают закаленную на мартенсит сталь для перевода неравновесной структуры в более равновесную, обеспечивающую заданный комплекс свойств. В зависимости от температуры нагрева различают низкий, средний и высокий отпуск. Закалка с высоким отпуском называется *улучшением*.

*Термическая обработка* — совокупность технологических операций, связанных с нагревом, выдержкой и охлаждением.

Основная задача нагрева стали — перевод структуры в аустенитное состояние и получение возможно более мелкого зерна.

Температура нагрева под закалку большинства конструкционных и инструментальных легированных сталей находится в пределах 800–880°C (для каждой марки стали свой узкий интервал закалочных температур). Для сталей с большим содержанием карбидообразующих элементов температура нагрева под закалку значительно превышает критические точки  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ . Например, штамповые стали типа 3Х2В8Ф закалывают с температур 1050...1100°C, а быстрорежущие типа Р9 и Р18 — с температур 1250...1300°C.

Продолжительность нагрева (табл. 2.9.1) должна обеспечить нагрев изделия по сечению и завершение фазовых превращений, но не должна быть слишком большой, чтобы не вызвать рост зерна и обезуглероживание поверхности стали.

2.9.1 Ориентировочная продолжительность нагрева изделий для закалки до 800–850°C в различных печах

Место нагрева	Продолжительность нагрева (в сек) на 1 мм диаметра или толщины изделия, для сечения		
	круглого	квадратного	прямоугольного
В электропечи	40—50	50—60	60—75
В пламенной печи	35—40	45—50	55—60
В соляной ванне	12—15	15—18	18—22
В свинцовой ванне	6—8	8—10	10—12

Продолжительность изотермической выдержки, обеспечивающей завершение фазовых превращений и гомогенизацию аустенита, принимают равной 15—25% от продолжительности сквозного нагрева.

Для предотвращения окисления и обезуглероживания поверхности деталей нагрев под термическую обработку проводят в защитных, контролируемых по углеродному потенциалу средах, в вакууме ( $10^3 \dots 10^{-1}$  кПа), в расплавленных солях  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$  и др.

Режим охлаждения при закалке должен обеспечить необходимую глубину прокаливаемости, но не вызвать при этом значительных закалочных напряжений, приводящих к короблению изделия и образованию закалочных трещин. Он устанавливается по диаграммам изотермического и термокинетического распада аустенита.

В зависимости от степени переохлаждения аустенита различают перлитное превращение, бейнитное (промежуточное) превращение и мартенситное превращение. Последнее происходит в диапазоне температур начала ( $M_n$ ) и конца ( $M_k$ ) превращения мартенсита. Положение мартенситных точек  $M_n$  и  $M_k$  определяется составом аустенита и не зависит от скорости охлаждения.

При закалке сталей возникают тепловые и структурные фазовые напряжения. Наиболее опасны фазовые напряжения, возникающие в результате мартенситного превращения аустенита, так как образуется хрупкая фаза мартенсит. Выше точки  $M_n$  возникают только термические напряжения, причем сталь находится в аустенитном состоянии, а аустенит пластичен.

В качестве закалочных сред для углеродистых сталей наиболее широко используют воду, 10%-ный раствор  $\text{NaOH}$  или  $\text{NaCl}$ , а для легированных — минеральные масла (табл. 2.9.2)

**2.9.2. Скорость охлаждения стали в различных средах**

Закалочная среда	Скорость охлаждения, °C/с, в интервалах, °C	
	650—550	300—200
Вода при 18 °C	600	270
Вода при 74 °C	30	200
10%-ный раствор $\text{NaOH}$ в воде при 18 °C	1200	300
Минеральное масло	100—150	20—50

Находят применение водные растворы полимеров, которые по охлаждающей способности занимают промежуточное положение между водой и маслом.

Сразу после закалки стали применяется отпуск, в результате которого сталь получает требуемые свойства. Кроме того, отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке.

Низкий отпуск (150...250 °C) применяют для режущего, измерительного инструмента, деталей подшипников качения, а также деталей после поверхностной закалки, цементации, нитроцементации и цианирования.

Средний отпуск (350...500°C) применяют главным образом для пружин, рессор и штампов. Структура стали (0,45...0,8% C) после среднего отпуска — троостит отпуска или троостомартенсит с твердостью 40...50 HRC. Температуру отпуска следует выбирать таким образом, чтобы не вызывать необратимой отпускной хрупкости (отпускной хрупкости I рода).

Высокий отпуск (500...680 °C) применяют для среднеуглеродистых (0,3...0,5% C) улучшаемых сталей. Улучшение создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали. Легирующие элементы Mo, W, Cr, V замедляют процессы диффузии и коагуляцию карбидов, поэтому процессы, происходящие при отпуске, в легированных сталях смещаются к большим температурам. Это позволяет полностью снять остаточные закалочные напряжения.

Продолжительность среднего и высокого отпуска обычно составляет 1...2 ч для деталей небольшого сечения и 2...8 ч для массивных деталей.

Для нагрева под закалку, нормализацию и отжиг мелких и средних деталей в термических цехах единичного и мелкосерийного производства применяют камерные печи с защитной атмосферой ( $\text{CH}_3$ ) и без защитной атмосферы ( $\text{CNO}$ ). Для нагрева деталей большой длины применяют шахтные печи типа СШО и СШЗ. В массовом производстве применяются высокомеханизированные закально-отпускные агрегаты, имеющие как универсальное, так и специальное назначение (типа СЗСА, СКЗА).

Все шире применяются вакуумные печи и установки на их основе, в которых проводится термическая обработка с последующей закалкой в азотоводородной атмосфере при давлениях до 2 МПа со скоростями охлаждения, близкими к охлаждению в масле. В таких установках удается получить чистую поверхность деталей при минимальных деформациях.

**Обеспечение конструкционной прочности сталей и сплавов при термической обработке.** Для обеспечения работоспособности детали материал должен иметь комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу в условиях эксплуатации.

Для оценки конструкционной прочности кроме стандартных механических свойств ( $HВ$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ , КСУ) необходимо учитывать работу распространения трещины, предел выносливости, контактное сопротивление усталости, сопротивление износу и т.д.

В промышленности применяются два способа объемной упрочняющей термической обработки: *закалка на мартенсит с последующим отпуском и закалка на пересыщенный твердый раствор с последующим старением.*

Первый вариант применяют для углеродосодержащих сталей, в которых закалка приводит к получению мартенсита высокой твердости и хрупкости. Отпуск проводят с целью снижения хрупкости.

Сплавы, упрочняемые, термической обработкой по второму варианту, в закаленном состоянии пластичны. Старение, приводящее к упрочнению, обеспечивает необходимый уровень прочности и вязкости.

Механические свойства стали в первую очередь определяются содержанием в ней углерода, от которого зависит закаливаемость стали.

После закалки стали на мартенсит твердость (рис. 2.9.1) и предел прочности (рис. 2.9.2) интенсивно растут по мере увеличения концентрации углерода, а ударная вязкость резко снижается. При содержании углерода, большем чем 0,4%,  $\sigma_B$  становится нестабильным из-за увеличения доли хрупкого разрушения.

Повышение конструкционной прочности состоит не столько в повышении прочностных свойств, сколько в том, чтобы при высокой прочности предотвратить хрупкое разрушение и обеспечить высокое сопротивление вязкому разрушению, т.е. обеспечить надежность материала.

Для оценки надежности материала используют параметры ударной вязкости (КСУ, КСВ, КСТ), температурный порог хладноломкости ( $T_{50}$ ), характеризующие сопротивление хрупкому разрушению.

Стандартный комплекс механических свойств и вышеперечисленные параметры оценки надежности достаточны для расчетов

на прочность и оценки надежности сталей с  $\sigma_B \leq 1200$  МПа, титановых сплавов с  $\sigma_B \leq 800$  МПа, алюминиевых сплавов с  $\sigma_B \leq 450$  МПа.

Для высокопрочных сталей и сплавов (при значениях прочности больших, чем указано выше) надежность работы материала должна оцениваться с учетом критерия трещиностойкости  $K_{IC}$ . Этот критерий дает возможность определить уровень допустимых напряжений при известной длине трещины и, наоборот, размер безопасной трещины при заданном среднем напряжении.

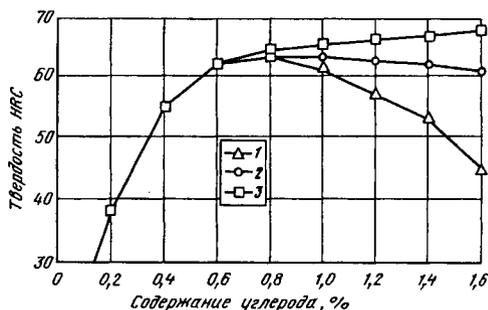


Рис. 2.9.1. Зависимость твердости закаленной стали от содержания углерода:

1 — объемная закалка; 2 — закалка ТВЧ; 3 — микротвердость мартенсита

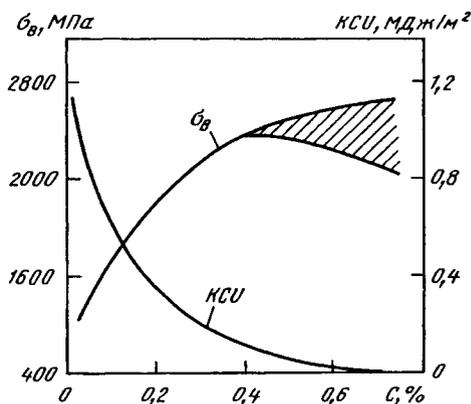


Рис. 2.9.2. Влияние углерода на механические свойства закаленных низколегированных сталей

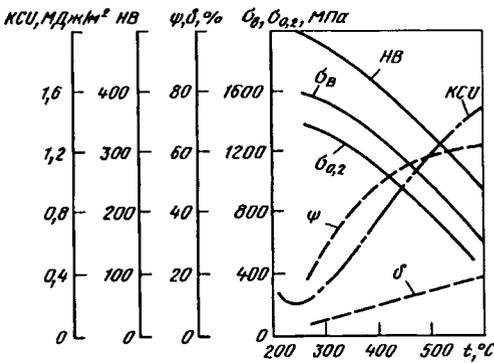


Рис. 2.9.3. Зависимость механических свойств стали 40 от температуры отпуска

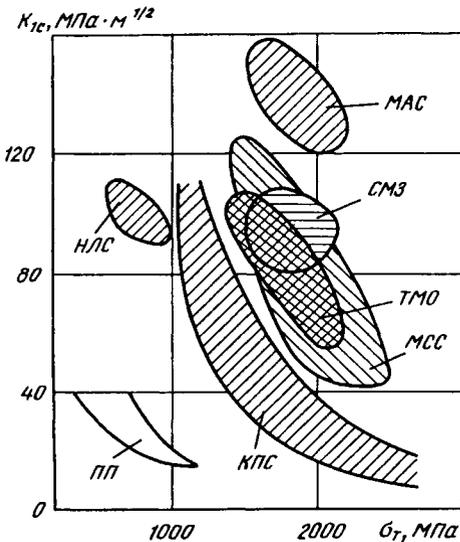


Рис. 2.9.4. Диаграмма конструкционной прочности сталей:

МАС — метастабильные аустенитные стали;  
 СМЗ — стали со сверхмелким зерном;  
 ТМО — стали после термомеханической обработки;  
 МСС — мартенситно-старяющие стали;  
 КЛС — средне- и высокоуглеродистые конструкционные стали;  
 НЛС — низколегированные низкоуглеродистые стали ( $\leq 0,2\%$  C); ПП — эвтектоидные стали со структурой пластинчатого перлита

С повышением температуры отпуска прочность снижается, а пластичность и ударная вязкость увеличиваются (рис. 2.9.3). Изменяя температуру отпуска можно обеспечить разное соотношение характеристик прочности и надежности.

По характеристикам прочности и надежности все стали могут быть распределены на группы (рис. 2.9.4).

В промышленности широко применяются углеродистые и легированные средне- и высокоуглеродистые стали, упрочняемые закалкой с отпуском. К ним относятся стали улучшаемые, рессорно-пружинные, шарикоподшипниковые.

Улучшение применяется для деталей, работающих при статических, циклических и ударных нагрузках (валы, оси, штоки, шатуны, зубчатые колеса, рычаги и др.), в условиях концентрации напряжений.

При выборе улучшаемой стали (45, 40X, 40XC, 35XГСА, 40XФА, 40X2H2МА, 38XНЗМА и др.) кроме предела текучести, вязкости, чувствительности к надрезам важное значение имеет порог хладноломкости ( $T_{50}$ ), который должен быть на 40...60 °C ниже температуры эксплуатации детали.

Легированные улучшаемые стали имеют следующий уровень механических свойств:  $\sigma_{в} \geq 1000$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 800$  МПа,  $\delta \geq 10\%$ ,  $\psi \geq 45\%$ ,  $KCU \geq 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>.

Термически улучшаемые стали приобретают высокие механические свойства при обеспечении требуемой прокаливаемости, получении мелкого зерна и недопущении развития отпускной хрупкости.

Прокаливаемость определяется присутствием легирующих элементов. Однако не следует стремиться к применению сталей с излишней прокаливаемостью, поскольку необходимое для этого высокое содержание хрома, марганца и кремния способствует росту склонности к хрупкому разрушению.

Для деталей, испытывающих в основном напряжения растяжения или сжатия (шатуны, ответственные болты, детали шарикоподшипников и др.), а также сложнапряженное состояние (торсионные валы, рессоры, пружины и др.), т.е. в тех случаях, когда сердцевина детали испытывает значительные напряжения, закалка должна обеспечить сквозную прокаливаемость; закаленный слой в центре заготовки должен иметь структуру, состоящую из 90% мартенсита и 10% троостита.

Для надежного обеспечения прочности ответственных деталей, работающих в основном на изгиб и кручение (полуоси, валы, поворотные кулачки и др.), сердцевина которых не испытывает воздействия существенных напряжений, закаленный слой со структурой 90% мартенсита должен располагаться на глубине не менее 1/2 радиуса от поверхности детали.

Величина зерна стали не оказывает существенного влияния на стандартный комплекс механических свойств при испытании

на статическое растяжение и твердость; измельчение зерна резко повышает ударную вязкость, работу распространения трещины, снижает порог хладноломкости, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений и склонность сталей к закалочным трещинам и деформациям. Применение сталей с повышенной прочностью возможно только при измельчении зерна (8 балл и выше).

Измельчению зерна способствует раскисление стали А1, легирование карбидообразующими элементами (Ti, V, Zr, Nb, W, Mo), повышение скоростей нагрева при закалке.

Для наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей машиностроения применяются высокопрочные стали. Их особенностью является повышенная чувствительность к концентраторам напряжений и зависимость предела выносливости от временного сопротивления. Если для сталей нормальной и повышенной прочности (до  $\sigma_B = 1200$  МПа) при увеличении  $\sigma_B$  возрастает предел выносливости  $\sigma_R$  ( $\sigma_R/\sigma_B \approx 0,5$ ), то в высокопрочных сталях повышение  $\sigma_B$  приводит к уменьшению  $\sigma_R$  (рис. 2.9.5). Аналогичная зависимость характерна и для высокопрочных алюминиевых сплавов.

Высокопрочные среднелегированные стали (30ХГСН2А, 25Х2ГНТА, 30Х2ГН2СВМА, 40ХГСН3ВА и др.) упрочняются двумя способами: закалкой и низким отпуском и изотермической закалкой на  $\sigma_B = 1650 \dots 2100$  МПа. Изотермическая закалка приводит к меньшему упрочнению, по сравнению с низкоотпущенным состоянием, но обеспечивает меньшую чувствительность к концентраторам напряжений и более высокое сопротивление разрушению.

Для тяжело нагруженных деталей в авиационной промышленности, в ракетной технике, в судостроении, приборостроении (для упругих элементов), в криогенной технике применяются мартенситно-старяющие высокопрочные стали (03Н18К9М5Т, 03Н12К15М10, 03Х11Н10М2Т и др.), которые превосходят по конструкционной прочности (см. рис. 2.9.4) и технологичности среднеуглеродистые высокопрочные стали.

Высокая прочность сталей достигается совмещением мартенситного превращения и старения мартенсита. После закалки на воздухе образуется безуглеродистый железоникелевый мартенсит, отличающийся высокой пластичностью ( $\delta = 18 \dots 20\%$ ;  $\psi = 70 \dots 80\%$ ) и вязкостью ( $KCU = 2,0 \dots 2,5$  МДж/м<sup>2</sup>). В закаленном состоянии стали сравнительно легко обрабатываются давлением, резанием, хорошо свариваются. Они обладают неограниченной прокаливаемостью и незначительной деформацией и короблением.

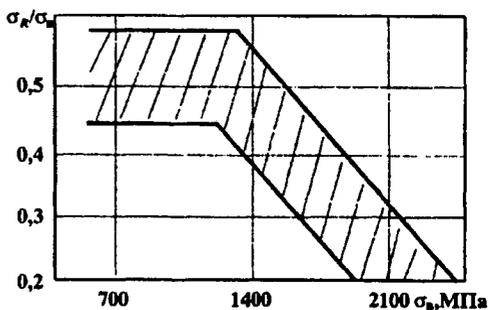


Рис. 2.9.5. Зависимость отношения  $\sigma_R/\sigma_B$  от временного сопротивления для различных сталей

Для изготовления силовых пружин и рессор применяют углеродистые и легированные стали (65, 75, 60С2А, 60С2Н2А, 50ХГФА и др.). Стали после термической обработки имеют высокий предел упругости, выносливости и релаксационной стойкости. Применяют два вида упрочняющей обработки: закалку со средним отпуском на структуру троостит и изотермическую закалку на нижний бейнит. Изотермическая закалка позволяет получить высокие механические свойства при малой деформации детали. Уровень механических свойств легированных упрочненных сталей:  $\sigma_B \geq 1800$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 1600$  МПа,  $\delta \geq 5\%$ ,  $\psi \geq 20\%$ . Предел упругости составляет  $\sigma_{0,01} \geq 880 \dots 1150$  МПа, при твердости 38...48 HRC.

Для подшипников качения применяются высокоуглеродистые низколегированные шарикоподшипниковые стали (ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ и др.). Типичной термической обработкой этих сталей является неполная закалка (820...850°C) в масле и низкий отпуск при 150...170°C. Для повышения стабильности размеров применяют обработку холодом (-70... -80°C). После термической обработки стали имеют высокую твердость (HRC > 60), износостойкость и сопротивление контактной усталости.

Необходимая надежность сталей обеспечивается сквозной прокаливаемостью, снижением количества неметаллических включений и газов при использовании специальных переплавов в вакууме и рафинировании синтетическими шлаками, а также устранением карбидной неоднородности.

Применение упрочняющей обработки при сохранении достаточного уровня пластичности и вязкости позволяет обеспечить следующий уровень статической прочности:

для сталей  $\sigma_B = 1600 \dots 2200$  МПа, титановых сплавов  $\sigma_B = 1000 \dots 1250$  МПа, алюминиевых сплавов  $\sigma_B = 550 \dots 600$  МПа.

Основная термическая обработка, применяемая для титановых сплавов, — отжиг. Упрочняющая термическая обработка, особенно для крупных деталей, недостаточно распространена. Это объясняется малой прокаливаемостью сплавов, низким значением пластичности и вязкости разрушения ( $K_{1C}$ ) и короблением деталей.

Упрочнению подвергаются ( $\alpha + \beta$ ) — сплавы (ВТ6, ВТ14, ВТ16, ВТ22 и др.). Упрочнение состоит из закалки и старения. Механические свойства сплава ВТ22 после упрочняющей обработки:  $\sigma_B = 1450$  МПа,  $\delta = 6\%$ ,  $KCU \geq 0,3$  МДж/м<sup>2</sup>; для сравнения после отжига:  $\sigma_B = 1150$  МПа,  $\delta = 15\%$ ,  $KCU = 0,9$  МДж/м<sup>2</sup>.

После термического упрочнения временное сопротивление алюминиевых сплавов достигает  $\sigma_B = 500 \dots 700$  МПа при пластичности  $\delta = 8 \dots 10\%$ . Термическая обработка алюминиевых сплавов (дуралюмины Д, авиали АВ, высокопрочные В, ковочные АК и др.) состоит из закалки на пересыщенный твердый раствор и последующего естественного или искусственного старения. После закалки сплавы имеют сравнительно невысокую прочность и высокую пластичность ( $\delta = 20 \dots 25\%$ ).

После зонного старения сплавы чаще имеют повышенный предел текучести и относительно невысокое отношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B \leq 0,6 \dots 0,7$ , повышенную пластичность, хорошую коррозионную стойкость, низкую чувствительность к хрупкому разрушению, но низкую теплоустойчивость.

После фазового старения отношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  повышается до  $0,9 \dots 0,95$ , а пластичность, вязкость, сопротивление хрупкому разрушению и коррозии под напряжением снижаются, но повышаются тепло- и жаростойкость.

### 2.9.3. УПРОЧНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Методы поверхностного термического упрочнения:

1. Поверхностная закалка стали и чугуна при газопламенном нагреве.
2. Поверхностная закалка стали и чугуна при индукционном нагреве.
3. Химико-термическая обработка стали.
4. Поверхностная лазерная закалка стали и чугуна.
5. Поверхностная закалка стали и чугуна при нагреве электрической дугой (плазмой).

Метод 3 рассматривается в п. 2.9.4, методы 4 и 5 — в п. 2.9.6 данной главы.

**Поверхностная закалка стали и чугуна при газопламенном нагреве** осуществляется в результате местного нагрева поверхности детали специальными горелками, работающими на смеси углеродных газов (чаще всего ацетилена) с чистым кислородом. Активная зона нагрева имеет форму небольшого круга или узкого прямоугольника длиной до  $8 \dots 10$  см.

При обработке длинных деталей применяется непрерывно-последовательная закалка, при которой газовая горелка и обрабатываемое изделие совершают относительное движение; вслед за горелкой движется закалочный душ.

При обработке цилиндрических или плоских деталей закаленный слой получает соответственно форму спиральных или плоских полос. В местах стыка полос наблюдается снижение твердости закаленной стали и структура неполной закалки. При обработке цилиндрических деталей с небольшим отношением высоты к диаметру (например, шеек коленчатых валов) применяется метод закалки "за один оборот", при котором стык закаленных полос и пониженная твердость располагаются по образующей цилиндра.

**Поверхностная закалка стали и чугуна при индукционном нагреве** осуществляется по схеме, представленной на рис. 2.9.6. Деталь 1 помещается в зону переменного магнитного поля катушки или проводника, которые называются индуктором 2. Это поле, в соответствии с законом электромагнитной индукции, возбуждает на поверхностных слоях детали электродвижущую силу и ток той же частоты, что и ток индуктора. Этот ток вызывает нагрев той зоны детали, в которой он протекает.

Преобразователь 3 превращает ток частотой 50 Гц в ток частотой от 2,4 до 440 кГц и напряжением от 400 до 800 В.

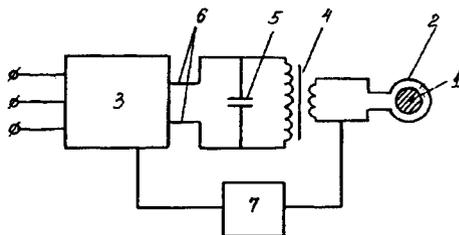


Рис. 2.9.6. Схема индукционного нагрева

Понижающий трансформатор 4 согласует напряжение индуктора и преобразователя. Конденсаторная батарея 5, повышает  $\cos \varphi$  с 0,2—0,4 до значения, близкого к 1, и разгружает преобразователь частоты от реактивного тока.

Если индуктор сконструирован на напряжение, одинаковое с напряжением преобразователя частоты, то он присоединяется непосредственно к клеммам 6 преобразователя частоты.

Система автоматического управления установкой 7 поддерживает необходимую мощность, отбираемую от преобразователя, и регулирует длительность нагрева.

Для индукционной поверхностной закалки применяют следующие частоты переменного тока: средние — 2400...10000 Гц; высокие — 70 000...440 000 Гц.

Для получения токов средней частоты используют машинные или тиристорные преобразователи частоты. Тиристорные преобразователи имеют высокий КПД (более 90%) и не содержат движущихся частей, что определяет меньшую трудоемкость и простоту при уходе и ремонте.

Для выработки высоких частот используются ламповые генераторы или преобразователи частоты, работающие на мощных транзисторах. Транзисторные преобразователи имеют более высокий КПД (90...92%) и возможность получать переменные токи как высоких, так и средних частот.

Ток индуктора  $I_n$ , частота тока  $f$  и мощность  $P_d$ , выделяемая в нагреваемой детали, связаны соотношением:

$$P_d = k I_n^2 \sqrt{\rho \mu f},$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от размеров индуктора и детали;  $\rho$  — удельное сопротивление;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость нагреваемого металла. Приблизительно считают, что ток проникает в сечение индуктора и нагреваемой детали на глубину

$$\delta \approx 5000 \sqrt{\rho / \mu f}.$$

Значения  $\delta$  для меди (из которой обычно изготавливают индукторы) и для стали 45 даны в табл. 2.9.3.

2.9.3. Глубина (мм) проникновения тока в металл при различных частотах тока

Частота тока, Гц	Сталь 45		
	$t = 20^\circ\text{C}, \rho = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}, \mu = 1$	$t = 20^\circ\text{C}, \rho = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}, \mu = 50$	$t = 850^\circ\text{C}, \rho = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}, \mu = 1$
50	10	4,5	80
1000	2,2	1,0	18
2500	1,4	0,64	11
4000	1,1	0,50	8,7
8000	0,8	0,35	6,2
10000	0,7	0,32	5,5
70000	0,27	0,12	2,1
400000	0,11	0,05	0,9

Принципиальные особенности индукционного нагрева по сравнению с нагревом в печах и нагревательных ваннах:

1. Тепло выделяется непосредственно в поверхностных слоях нагреваемой детали, а не передается в нее извне. Это позволяет осуществлять нагрев с большой скоростью и получать более мелкую кристаллическую структуру стали с более высокими свойствами прочности и пластичности.

2. Варьируя мощность и время нагрева, можно достигать как поверхностного, так и сквозного нагрева детали.

3. Форма и размер зоны нагрева зависят от формы и размеров индуктора. Поэтому при индукционном нагреве возможен местный нагрев.

Индукционный нагрев характеризуют: удельная мощность, т.е. мощность, выделяемая в 1 см<sup>2</sup> нагреваемой поверхности (кВт/см<sup>2</sup>), время нагрева ( $\tau$ ), скорость нагрева в области фазовых превращений (т.е. при температуре выше 740 °С) и конечная температура. Процесс индукционной поверхностной закалки состоит из следующих этапов: индукционный нагрев, закалочное охлаждение, пауза, а течение которых выполняется низкотемпературный (150...250 °С) самоотпуск и повторное

охлаждение. Схемы заправки представлены на рис. 2.9.7.

При одновременной поверхностной закалке вся зона, подлежащая закалке, обрабатывается одновременно (рис. 2.9.7, а); закалочный душ (спреер) совмещен с индуктором. При последовательной закалке (рис. 2.9.7, б) деталь после нагрева подается в зону охлаждения душем. При непрерывно-последовательной закалке (рис. 2.9.7, в) деталь и система индуктор — закалочный душ в процессе обработки непрерывно движутся относительно друг друга с постоянной скоростью (обычно от 0,5 до 3 см/с).

Непрерывно-последовательная закалка позволяет обрабатывать детали сколь угодно большой длины с помощью источника тока сравнительно небольшой мощности.

**Варианты индукционной поверхностной заправки:** индукционная поверхностная заправка (ИПЗ); индукционная объемно-поверхностная заправка (ОПЗ). Основные параметры этих вариантов приведены в табл. 2.9.4.

Глубина поверхностной заправки зависит от удельной мощности и времени нагрева (рис. 2.9.8). Структура закаленного слоя — мартенсит; переходный слой — сочетание структуры мартенсита и феррита. При ОПЗ (см. табл. 2.9.4) применяется сравнительно небольшая удельная мощность и большее время нагрева, что позволяет достаточно равномерно нагревать до закалочной температуры детали практически любой сложной формы.

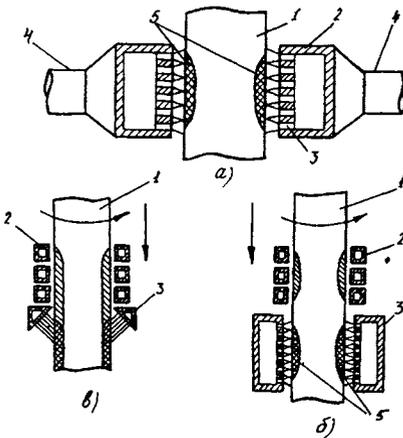


Рис. 2.9.7. Схемы индукционной поверхностной заправки:

1 — закаливаемая деталь; 2 — витки индуктора; 3 — закалочный душ; 4 — патрубок, подводящий закалочную воду; 5 — закаленный слой

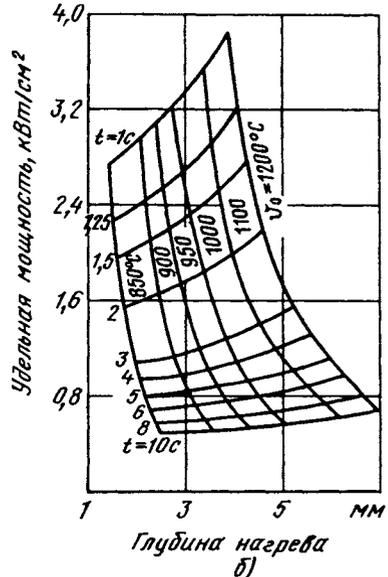
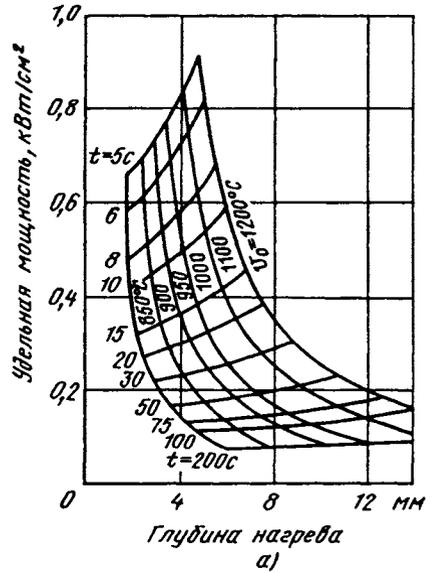


Рис. 2.9.8. Графики для выбора удельной мощности и времени нагрева в зависимости от необходимой глубины нагрева и температуры поверхности стали:

а — частота тока 10 кГц; б — 4 кГц

## 2.9.4. Параметры ИПЗ и ОПЗ стали

Параметр	ИПЗ	ОПЗ
Удельная мощность, кВт/см <sup>2</sup>	0,5—1,5	0,05—0,2
Скорость нагрева в области фазовых приращений, °С/с	30—300	2—10
Время нагрева, с	2—15	20—150
Вид охлаждения	Любое при условии, что скорость охлаждения больше критической скорости закалки стали	Интенсивное охлаждение водяным душем или потоком
Применяемые стали	Стандартные конструкционные стали	Специальные стали с пониженной или регламентированной прокаливаемостью

При этом достигается либо сквозной нагрев сечения детали (при диаметре или толщине до 50-60 мм), либо нагрев рабочей зоны детали например, зубьев шестерен) и некоторого слоя под ней.

Интенсивное охлаждение водяным душем или потоком создает большой градиент скоростей охлаждения по сечению закаливаемой детали (рис. 2.9.9): поверхность охлаждается со скоростью 8000...20000 °С/с, сердцевина (в зависимости от толщины детали) со скоростью 10—150 °С/с. При этом, в зоне поперечного сечения *I*, где скорость охлаждения больше критической скорости закалки стали  $v_{кр}$ , образуется структура закаленной стали — мартенсит с твердостью HRC > 60, пределом прочности — 2400...2700 МПа. Более глубокие слои *II* закаляются на структуру тонкой ферритно-цементитной смеси (троостит).

Основными факторами, обуславливающими высокий комплекс свойств стали после поверхностной индукционной закалки являются:

1) получение при нагреве более мелкого зерна аустенита и как следствие — уменьшение размеров кристаллов закаленной стали — мартенсита;

2) создание в поверхностном закаленном слое сжимающих остаточных напряжений.

После термической обработки при нагреве в печах конструкционных сталей зерно стали соответствует 7-8 баллу по стандартной шкале (средняя площадь зерна 1000...500 мкм<sup>2</sup>), а при индукционном нагреве до оптимальных температур — 9-10 баллу. Применением сталей, выплавленных по специальной технологии, удается получить зерно

11-12 балла (средняя площадь 60...30 мкм<sup>2</sup>) т.е. по площади в 15-30 раз мельче. Измельчение зерна резко повышает сопротивление стали разрушению (рис. 2.9.10), обеспечивает высокую твердость (около 60 HRC) при сохранении достаточного уровня пластичности, что позволяет использовать высокопрочные состояния стали (2400...2700 МПа) для тяжело нагруженных деталей.

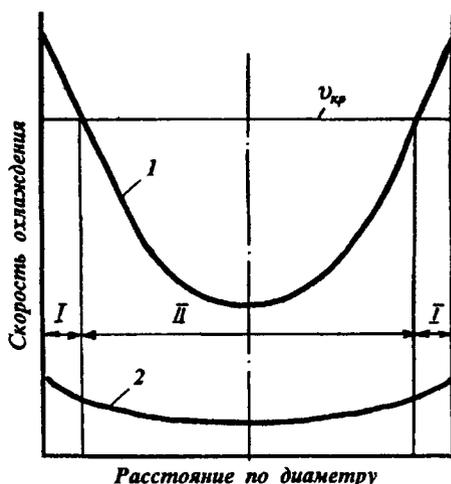


Рис. 2.9.9. Схема распределения по сечению закаливаемой стальной детали скорости охлаждения и получаемых структур при ОПЗ:

- I* — скорость охлаждения при использовании интенсивного водяного душа или потока;  
 2 — скорость охлаждения при закалке в минеральном масле; *I* — слой закалки на мартенсит;  
 II — объемы стали, закаливаемые на структуру тонкой ферритно-цементитной смеси (троостит);  
 $v_{кр}$  — критическая скорость закалки стали.

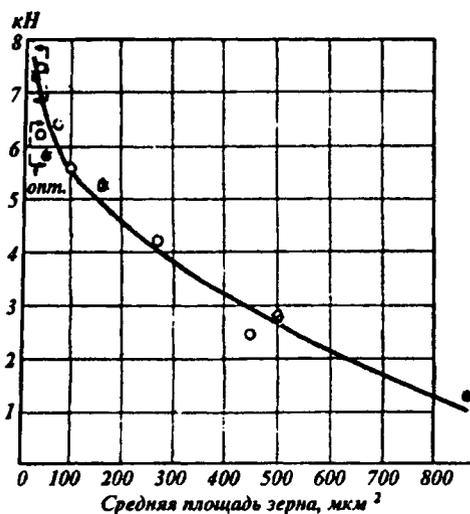


Рис. 2.9.10. Зависимость разрушающей нагрузки при изгибе от среднего значения площади зерна аустенита.

Сталь 45; образцы диаметром 6 мм; закалка с разных температур; отпуск 145 °С; расстояние между опорами 80 мм

Сквозная закалка деталей с размером сечения более 10-15 мм<sup>2</sup> на высокую твердость (55...60 HRC и более) создает в поверхностных слоях деталей растягивающие остаточные напряжения (около 200—300 МПа), что отрицательно сказывается на сопротивлении усталости деталей. Низкий отпуск (до 200...250 °С) несколько снижает уровень растягивающих остаточных напряжений. При высоком отпуске (500...700 °С) растягивающие остаточные напряжения устраняются и даже переходят в небольшие (~100 МПа) сжимающие напряжения.

При поверхностной и объемно-поверхностной закалке в поверхностном слое создаются сжимающие остаточные напряжения порядка 600...800 МПа. При низком отпуске (180...200 °С) они снижаются незначительно — до 500—600 МПа. Столь высокий уровень сжимающих остаточных напряжений в 1,5—2 раза повышает предел выносливости, что при работе в тяжелых условиях повышает долговечность ответственных деталей машин в 8-10 раз.

**Выбор стали для индукционной закалки** по содержанию углерода и по уровню прокаливаемости имеет определяющее значение для обеспечения конструкционной прочности детали.

Детали, для которых главным требованием является обеспечение высокого сопротивления усталости, следует изготавливать из среднеуглеродистых сталей (0,4...0,6% С). Детали, работающие при высоких контактных напряжениях, создающих опасность контактного выкрашивания ("питтинга"), либо работающие в условиях, стимулирующих износ поверхности деталей, следует делать из эвтектоидных (0,8% С), либо из заэвтектоидных сталей с содержанием углерода 1,0-1,2%, а иногда и с более высоким.

Детали несущих систем автомобилей, тракторов, экскаваторов: лонжероны, стойки, поперечины и т.п., изготавливаемые из низкоуглеродистых сталей (≈0,2% С) можно с успехом упрочнять индукционной закалкой, обеспечивая предел прочности 800...1000 МПа и предел усталости 400...600 МПа.

При индукционной поверхностной закалке применяются среднеуглеродистые конструкционные стали 40, 45, 40X и им подобные.

При индукционной объемно-поверхностной закалке применяют стали с пониженной (ПП) или регламентированной (РП) прокаливаемостью, которые обеспечивают получение закаленного слоя 0,1-0,2 от диаметра или толщины детали.

Стали 40, 55 пониженной прокаливаемости (ГОСТ 1050) применяются для шестерен, крестовин кардана и других деталей с тонким сечением упрочняемого элемента детали. Сталь ШХ4 (ГОСТ 801) применяется для тяжело нагруженных подшипников качения среднего габарита, например для подшипников букс ж.д. вагонов.

Сталь 47ГГ (ГОСТ 4543) применяется для тяжело нагруженных валов, например, полуосей грузовых автомобилей.

Применение сталей РП и ПП позволяет не только обеспечить высокие эксплуатационные параметры деталей, но и экономить легирующие элементы: хром, марганец — до 1%, никель — до 3%, молибден — до 0,25%.

Получение наиболее высокого комплекса прочностных свойств деталей при поверхностной или объемно-поверхностной закалке достигается применением после закалки низкого отпуска при температурах 150...250 °С (предпочтительно при температурах 180...200 °С).

Низкий отпуск целесообразно реализовать в виде самоотпуска. При закалке с самоотпуском закалочное охлаждение прерывается с таким расчетом, чтобы остаточная теплота,

сохранившаяся в детали, произвела отпуск, аналогичный отпуску в печи.

Самоотпуск можно осуществлять двумя способами:

1) по истечении определенного времени после окончания охлаждения, обычно через 5...20 с деталь подвергается повторному охлаждению;

2) деталь после прекращения закалочного охлаждения выдерживается на воздухе, медленно охлаждаясь до температуры окружающей среды (обычно 30...40 мин).

Самоотпуск при индукционной закалке позволяет:

1) исключить отпуск в печах и создать условия для выполнения термической обработки в едином технологическом потоке с механической обработкой с полной автоматизацией процесса;

2) надежно предохранять детали от закалочных трещин.

**Охлаждение при индукционной закалке, при поверхностной и объемно-поверхностной закалках** осуществляется интенсивным водяным душем или потоком. Наименьшая неравномерность охлаждения и практически полное отсутствие трещин наблюдается при весьма малых скоростях охлаждения в интервале температур образования мартенсита (ниже 300°C) — 3...10 °C/с (закалка в масле), либо при интенсивной подаче воды на закаливаемую поверхность (скорость охлаждения 800—2500 °C/с). Однако, охлаждение в масле может применяться только для легированных сталей, имеющих низкое значение критической скорости закалки стали.

При средней интенсивности охлаждения (закалка погружением в спокойную воду, закалка душем или потоком малой интенсивности) имеет место значительная неравномерность охлаждения и наблюдается массовое появление трещин при закалке. Для обеспечения интенсивного и равномерного охлаждения, обеспечивающего отсутствие трещин при закалке, необходимо, чтобы средняя скорость воды, омывающей закаливаемую поверхность, находилась в пределах не менее 8...10 м/с.

Предотвращению образования трещин при индукционной закалке способствуют:

нагрев до минимальной температур, обеспечивающих полное превращение исходной феррито-цементитной структуры в аустенит;

интенсивное и равномерное охлаждение; самоотпуск при температурах 150...200°C.

Технико-экономический эффект индукционной поверхностной закалки достигается:

1) увеличением сопротивления усталости и износостойкости; в ряде случаев — снижением массы деталей вследствие увеличения допустимых рабочих напряжений;

2) повышением скорости закалки с возможностью встраивания этого процесса в комплексные поточные или автоматические линии с законченным циклом их изготовления (механическая и термическая обработка);

3) заменой легированных конструкционных цементуемых или улучшаемых сталей углеродистыми или специальными низколегированными сталями пониженной или регламентированной прокаливаемости, что позволяет на металлургических заводах снизить в 3—7 раз расход ферросплавов (марганца, хрома, кремния) и вовсе исключить расход никеля и молибдена; при этом стоимость стали снижается на 30...50%;

4) улучшением экологии, так как процесс использует только электроэнергию и техническую воду и не дает никаких вредных выбросов и отходов.

#### 2.9.4. УПРОЧНЕНИЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Химико-термическая обработка (ХТО) — совокупность процессов диффузионного насыщения поверхностного слоя одним или несколькими химическими элементами в сочетании с предварительной или последующей термической обработкой. При ХТО формируется одно- или многокомпонентный диффузионный слой, обладающий комплексом высоких механических и физико-химических свойств.

ХТО включает большое число способов (рис.2.9.11). Диффузионное насыщение неметаллами (C, N, B) используют для упрочнения поверхности деталей машин и инструментов. Насыщение поверхности металлами (Cr, Al, Zn, Ti, Be и др.) или Si и B с металлами применяют для получения защитных покрытий, стойких к коррозии и коррозионно-механическому изнашиванию при нормальных и высоких температурах.

Ниже рассмотрены основные способы упрочняющей ХТО.

**Цементация** — процесс диффузионного насыщения поверхности углеродом. После цементации проводят закалку и низкий отпуск. Толщина науглероженного слоя 0,5...2,0 мм. Цементации подвергают низкоуглеродистые стали (табл. 2.9.5), которые слабо упрочняются при закалке.

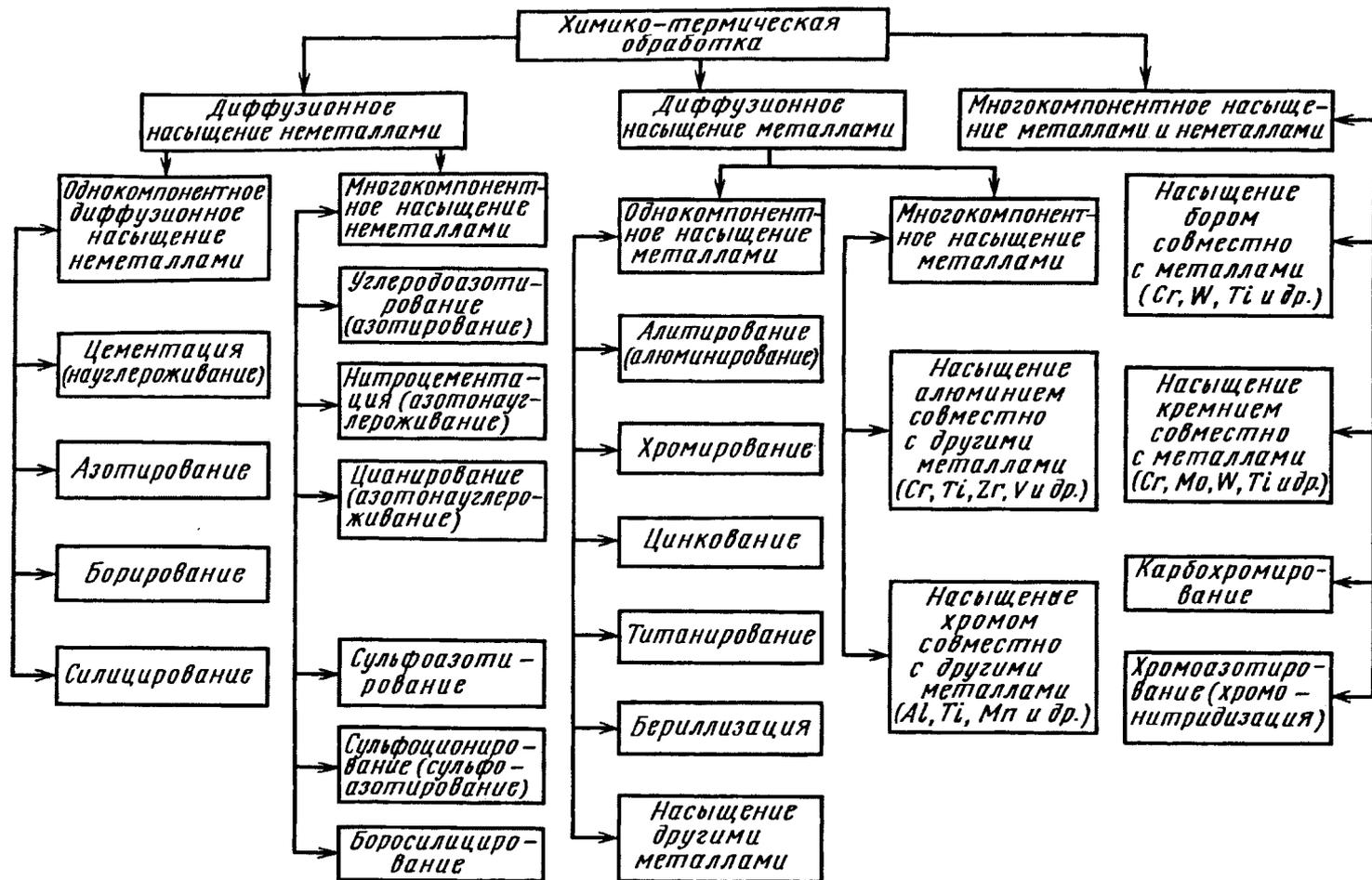


Рис 2.9.11. Способы химико-термической обработки

## 2.9.5. Стали для цементации (нитроцементации)

Марка стали	Термическая обработка после цементации (основной вариант)	Температура отпуска °С	Структура цементованного слоя
Низколегированные 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ, 20ХГР, 20ХНМ, 15ХГНТА, 25Х2ГНТА	Непосредственная закалка (после подстуживания), низкий отпуск	180	Мартенсит + остаточный аустенит (до 25%)
Хромоникелевые 12ХН3А, 20ХН3А, 20Х2Н4МА, 18Х2Н4МА	Отпуск (650...680°С), неполная закалка, обработка холодом, низкий отпуск	180	Мартенсит + избыточные карбиды ( $M_3C$ , $M_7C_3$ , $M_{23}C_6$ ) + остаточный аустенит (до 10%)
Теплостойкие ком- плекснолегированные: 14ХГСН2МА, 12Х2НВФА, 25ХГНМФБ, 20Х3МВФА, 16Х3НВФМБ	Отпуск (650...680°С), неполная закалка, обработка холодом, низкий отпуск	220 250 250 300 350	Мартенсит + избыточные карбиды ( $M_3C$ , $M_7C_3$ , $M_{23}C_6$ , $MC$ ) + остаточный аустенит (до 10%)

В результате детали приобретают твердую (58...63 HRC) поверхность и вязкую (28...43 HRC) сердцевину, устойчивую к ударным нагрузкам. Недостаток цементации — большие деформация и коробление деталей, которые устраняются шлифованием. Цементации отдают предпочтение при производстве наиболее нагруженных деталей машин — зубчатых колес, валов-шестерен, крупногабаритных колес подшипников, шарниров синхронного хода и других. Предел выносливости при изгибе деталей повышается на 20—30 % (при наличии концентраторов напряжений — на 80...100 %) и может достигать 1000 МПа, предел контактной выносливости — на 60...100% (до 2800 МПа), износостойкость — в 3—10 раз, сопротивление фреттинг-коррозии — в 2—5 раз. Эксплуатационные свойства цементованных деталей зависят от структуры и свойств сердцевины и в более значительной степени — от насыщенности углеродом диффузионного слоя, его фазового состава и структуры. Они растут по мере увеличения прочности и твердости сердцевины, достигая максимума при 1200 МПа и 43 HRC.

Цементованный слой характеризуют: концентрация углерода на поверхности  $C_n$ , %; эффективная толщина  $h_{эф}$ , мм; градиент концентрации углерода

$$\alpha = (C_n - C_{1,3h_{эф}}) / C_n \cdot 100, \%$$

Концентрация углерода в цементованном слое определяет уровень и распределение твердости (рис. 2.9.12). Часть цементованного слоя, имеющая  $C \geq 0,4$  %, и твердость HRC  $\geq 50$ , принимают за эффективную его толщину  $h_{эф}$ .

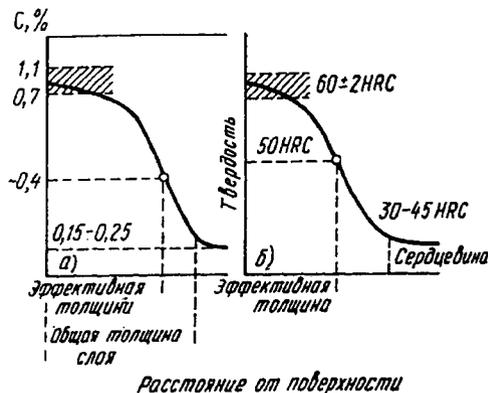


Рис. 2.9.12. Схемы распределения концентрации углерода (а) и твердости (б) по толщине цементованного слоя после закалки и отпуска

Максимальная циклическая прочность (выносливость при изгибе) достигается при концентрации углерода на поверхности (~0,8%) и толщине слоя  $h_{эф} = 0,5...0,7$  мм.

Высокая износостойкость и контактная выносливость достигаются при повышенной насыщенности цементованного слоя и структуре, содержащей избыточную карбидную фазу. Контактная выносливость растет по мере увеличения эффективной толщины цементованного слоя и снижения градиента концентрации  $\alpha$  до 5...10 %.

Качество слоя резко снижается при укрупнении зерна, образовании сетки цемента, большого количества остаточного аустенита, окислении легирующих элементов и образовании трооститной сетки из-за недостаточной прокаливаемости цементованного слоя.

Обеспечение требуемых характеристик цементованного слоя достигается путем управления процессом науглероживания, который описывается уравнением массопереноса углерода

$$J = \beta(C_{атм} - C_{п}) = -D(dC/dx).$$

Левая часть равенства характеризует удельный поток углерода из газовой среды к насыщаемой поверхности металла (внешний массоперенос). Он пропорционален разности концентрации (активности) в газовой среде ( $C_{атм}$ ) и на поверхности ( $C_{п}$ ) и коэффициенту массопереноса (скорости перехода) углерода  $\beta$ , зависящему от состава газовой среды, ее давления, скорости циркуляции.

Правая часть уравнения характеризует диффузионный поток углерода, который отводится от поверхности и формирует цементованный слой. Он пропорционален коэффициенту диффузии углерода  $D$  и градиенту концентрации углерода, который является движущей силой процесса диффузии.

Применяют два типа технологических атмосферы:

- 1) атмосферы с контролируемым углеродным потенциалом;
- 2) атмосферы с контролируемым расходом технологических газов.

В атмосферах 1-го типа требуемая концентрация углерода в слое задается ее углеродным потенциалом, который в конце процесса, как правило, составляет 0,8%. Атмосферы 2-го типа обладают более высокой науглероживающей способностью, достаточной для образования на поверхности стали избыточных карбидов. Процесс насыщения регулируют в кинетическом режиме, останавливая его после достижения заданной концентрации углерода.

Контролируемые атмосферы по химическому составу подразделяют на три вида: эн-

дотермическая (20% CO; 40% H<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O до 3%, остальное — N<sub>2</sub>); экзодотермическая (20% CO; 20% H<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O до 1,5%, остальное — N<sub>2</sub>); синтетическая на основе азота. Первые две атмосферы получают в специальных генераторах путем непрямого сжигания природного газа. Синтетическую ("безгенераторную") атмосферу создают непосредственно в рабочем пространстве печи путем подачи нескольких компонент: например, азота, метанола и углекислого газа или воздуха и метана, или азота, водорода и метана.

Углеродный потенциал эндоатмосферы составляет 0,5...0,7%. Для его увеличения к эндоатмосфере (к газу-носителю) добавляют до 5% CH<sub>4</sub>. Расход атмосферы достигает 6 м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>3</sup> объема печи.

Технологические варианты науглероживания зависят от типа производства.

В условиях массового и крупносерийного производства применяют газовую цементацию, которую проводят в автоматизированных безмуфельных печах непрерывного действия большой (700 кг/ч) производительности или камерных печах типа СНЦА меньшей производительности. Используют контролируемые атмосферы 1-го типа с автоматическим регулированием углеродного потенциала.

Основной тип обрабатываемых деталей — зубчатые колеса из низколегированных сталей. Типовой режим их упрочнения включает цементацию при температуре 930°C, подстуживание до 850°C, ступенчатую закалку в горячем масле и отпуск при 180°C.

Применяют также двухстадийный режим цементации. В первой зоне печи поддерживают высокий (1,1...1,3%) углеродный потенциал, во второй зоне его снижают до 0,8%. Концентрационные кривые углерода приобретают характерную горизонтальную площадку (рис.2.9.13).

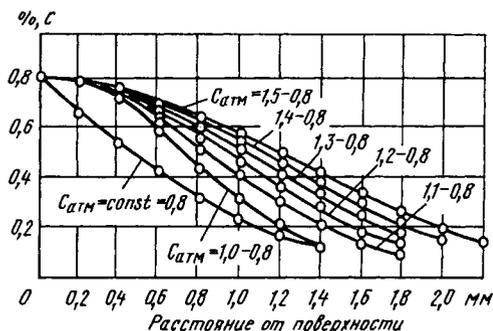


Рис. 2.9.13. Распределение концентрации углерода по толщине цементованного слоя после одностадийного и двухстадийного режимов науглероживания при различном углеродном потенциале  $C_{атм}$  на второй стадии (на первой стадии  $C_{атм} = 0,8\%$ )

В условиях серийного производства используют универсальное быстро переналаживаемое оборудование.

Широкое применение получила цементация в шахтных печах типа Ц (с подачи жидких углеводородов) и СШЦМ из-за простоты конструкции печей, их компактности, возможности комплектования садки из деталей различной формы и размеров.

Контролируемые атмосферы используют в универсальных печах типа СНЦА, снабженных герметизированным тамбуром и закалочным баком.

Однако применение контролируемых атмосфер ограничено. Обеспечение высоких концентраций углерода на поверхности возможно при больших (12% и более) добавках метана к эндогазу, что выше равновесного значения и приводит к выделению сажи. Использование эндоатмосферы ограничивается также ее взрывоопасностью, токсичностью, развитием внутреннего окисления, наводороживанием, большой длительностью обработки.

Цементация в "безгенераторных" атмосферах кроме преимуществ, связанных с отсутствием специальных газовых генераторов, отличается сокращением на 20 % длительности науглероживания и снижением на 30% расхода насыщающих газов. В мелкосерийном производстве применяют цементацию в кипящем слое и из паст. Интенсификация процесса и повышение качества упрочнения деталей обеспечивается высокотемпературной вакуумной цементацией и ионной цементацией.

**Высокотемпературная вакуумная цементация (ВВЦ)** осуществляется в специальных установках при температуре 1000...1100 °С в среде метана с двухступенчатым режимом его подачи. На первой стадии парциальное давление метана составляет 150...400 гПа; поверхность детали интенсивно насыщается углеродом до образования карбидов и выделения сажи (углеродный потенциал достигает 100%). На второй стадии метан удаляют из камеры, что стимулирует диффузионное рассасывание углерода в слое. Время процесса существенно сокращается. Недостатком ВВЦ являются неравномерность науглероживания деталей сложной формы из-за образования застойных зон и неравномерного выпадения сажи, укрупнение зерна и снижение механических свойств слоя и сердцевины.

**Ионная цементация (ИЦ)** отвечает требованиям гибкой, интенсивной и энергосберегающей технологии. Сущность ее состоит в том, что детали помещают на катод в газоразрядную камеру, через которую при небольшом расходе (до 0,1 м<sup>3</sup>/ч) и пониженном дав-

лении (1,3...26 гПа) прокачивают углеродсодержащую газовую смесь (СН<sub>4</sub>+Аг+Н<sub>2</sub>). Между катодом и анодом от специального источника электропитания прикладывают постоянное или пульсирующее напряжение (400...800 В), которое возбуждает тлеющий разряд, ионизирующий газовую среду. Положительные ионы, разгоняясь в прикатодной области, бомбардируют поверхность деталей, очищают ее (за счет катодного распыления) от оксидов и возможных загрязнений и поставляют насыщаемый элемент.

Тлеющий разряд в 3—5 раз ускоряет внешний массоперенос [ $\beta$  достигает (350...400) · 10<sup>-5</sup> см/с], формирует высокий углеродный потенциал у поверхности и, как следствие, высокий градиент концентрации углерода в приповерхностных слоях. В результате ускоряется и диффузионный массоперенос; время насыщения при температуре процесса 920...950 °С для получения слоев толщиной 1,0...1,5 мм сокращается до 2—3 ч.

Дополнительные преимущества:

1) высокая равномерность науглероживания и, как следствие, уменьшение деформации деталей;

2) гибкость управления составом газовой среды и электрическими параметрами процесса;

3) отсутствие внешнего и внутреннего окисления;

4) возможность замены специальных покрытий, в том числе медных, для защиты отдельных поверхностей от науглероживания путем установкой защитных экранов (втулок, пробок и т.п.);

5) возможность обработки коррозионно-стойких сталей типа 20Х13 за счет удаления оксидной пленки на начальной стадии процесса — катодного распыления;

6) снижение до 80% расхода газового карбюратора и до 50% потребления электроэнергии.

Для ионной цементации преимущественно применяют двухкамерные установки, состоящие из цементационной и закалочной камер.

Обработка деталей проводится по различным технологическим вариантам и завершается непосредственной закалкой в масле или в потоке инертного газа.

**Нитроцементация (НЦ)** — процесс диффузионного насыщения поверхности азотом и углеродом, осуществляемый в среде науглероживающего газа и аммиака. Этот процесс аналогичен цементации и проводится на том же оборудовании.

В условиях массового производства НЦ осуществляют в безмуфельных печах непрерывного действия в контролируемой по углеродному потенциалу атмосфере с дозирован-

ной подачей аммиака. Для получения слоя толщиной 0,5...0,8 мм нитроцементации зубчатых колес ведут при температуре 860...880 °С в среде эндогаза, к которому добавляют 0,5...0,8% метана и 0,6...1,3% аммиака. Продолжительность насыщения 6—7 ч.

Нитроцементованный слой имеет мартенситно-аустенитную структуру, содержит 0,7...0,9% С и 0,1...0,3% N. Присутствие азота повышает износостойкость, теплостойкость, выносливость при изгибе, а также контактную долговечность.

НЦ более технологична, чем цементация. При ее проведении не требуется подсуживания перед закалкой, увеличивается прокаливаемость слоя, снижаются деформация и коробление деталей. Время технологического цикла сокращается на 50%.

Для обеспечения высокой конструкционной прочности деталей при НЦ необходимо строго регламентировать степень насыщения поверхности углеродом и азотом.

Известен способ высокоскоростной НЦ для упрочнения деталей автомобиля из среднеуглеродистых сталей 40X, 40XФ при нагреве с помощью ТВЧ в парах триэтанолamina. Режим обработки включает скоростной нагрев до 1050 °С и выдержку 200 с для получения диффузионного слоя толщиной ~0,4 мм, который после закалки с повторного индукционного нагрева на толщину 2...4 мм приобретает высокую (HRC ≥ 64) твердость и в 1,5...2 раза более высокую износостойкость, чем у деталей, упрочненных только закалкой.

В условиях серийного производства для НЦ преимущественно применяют камерные печи типа СНЦА, в которых возможна непосредственная закалка.

**Ионную нитроцементацию (ИНЦ)** проводят в среде, состоящей из смеси азота, водорода и углеводорода. Опытные установки ИНЦ аналогичны установкам для ионной цементации. Важное преимущество ИНЦ — отсутствие внешнего и внутреннего окисления, которое снимает ограничения на толщину диффузионного слоя и допустимую концентрацию азота.

При ИНЦ предпочтительны двухстадийные режимы. Они обеспечивают глубокое проникновение азота в толщину слоя (рис. 2.9.14). В результате твердость менее интенсивно снижается по толщине слоя, а ее высокий уровень (HV ≥ 700) сохраняется на расстоянии до 1 мм (см. рис. 2.9.14, б), обеспечивая в 2 раза более высокое сопротивление контактной усталости, чем при газовой цементации. Заметно возрастает и износостойкость; она становится соизмеримой с износостойкостью азотированных слоев.

Азотирование — насыщение легированных сталей азотом. В отличие от цементации

и нитроцементации азотирование формирует слой более твердый (800...1200HV) и в 1,5—4 раза износостойкий, имеющий повышенную (до 450 °С) теплостойкость и высокий уровень (600...800 МПа) остаточных сжимающих напряжений, способствующих увеличению предела выносливости гладких образцов на 25...30%, а с концентраторами напряжений — в 2 раза и более.

Незначительное коробление является важным преимуществом азотирования. К его недостаткам относятся большая длительность (24...90 ч) и небольшая (0,3...0,5 мм) толщина диффузионного слоя, ограничивающая уровень контактных нагрузок.

Строение и свойства азотированного слоя зависят от состава стали и режима обработки, прежде всего температуры процесса (рис. 2.9.15). Высокая твердость достигается при азотировании легированных сталей — 38X2MЮА, 40X, 40XФ, 40XНМА, 38XНМФА, 30X3М, 30X3МФ, 30XГТ и др. Максимальное упрочнение формируется при температурах азотирования 500...520 °С, когда образуются дисперсные нитриды, полностью когерентные с матрицей. При температуре 550...600 °С частицы нитридов укрупняются и когерентность нарушается, что приводит к снижению твердости (см. рис. 2.9.15, а, б).

Наибольшая твердость поверхности (1100...1200HV) достигается при азотировании стали 38X2MЮА.

Азотирование находит применение для повышения износостойкости мартенситно-старееющих, коррозионно-стойких, быстрорежущих и штамповых сталей, высокопрочного чугуна, титановых сплавов.

Для газового азотирования используют шахтные и камерные печи.

Для получения высокой твердости (900...1000 HV) и толщине слоя ~ 0,3 мм азотирование проводят при температуре 500...520 °С (24...48 ч). Для получения слоя толщиной 0,5...0,6 мм и высокой твердости применяют двухступенчатое азотирование: 1-я ступень при 510...520 °С (15 ч), 2-я ступень — при 540...560 °С (25 ч).

Фазовый состав слоя регулируют путем изменения азотного потенциала атмосферы. При разбавлении аммиака азотом или аргонном диффузионный слой приобретает развитую нитридную зону и высокое сопротивление абразивному изнашиванию. При добавлении к аммиаку углеродосодержащего газа и повышении температуры процесса до 570 °С на поверхности образуется карбонитридный или карбоксинитридный слой, обладающий повышенной стойкостью к адгезионному изнашиванию.

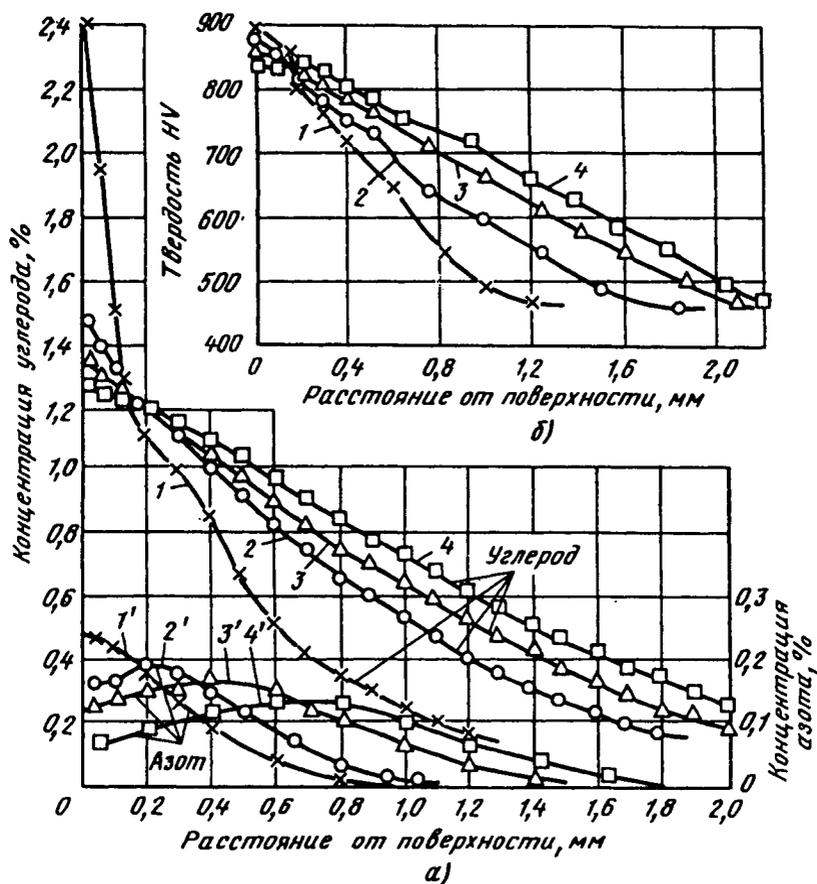


Рис. 2.9.14. Кривые распределения концентрации: углерода 1—4, азота 1<sup>1</sup>—4<sup>1</sup> (а) и твердости (б) по толщине диффузионного слоя стали 20X3MВФ после ионной нитроцементации при одностадийном режиме 1, 1<sup>1</sup> (продолжительность стадии 1 ч) и двухстадийном режиме 2—4, 2<sup>1</sup>—4<sup>1</sup>; время второй стадии: 1ч — 2,2<sup>1</sup>; 1,5 ч — 3,3<sup>1</sup>; 2,5 ч — 4,4<sup>1</sup>; (температура процесса 980 °С)

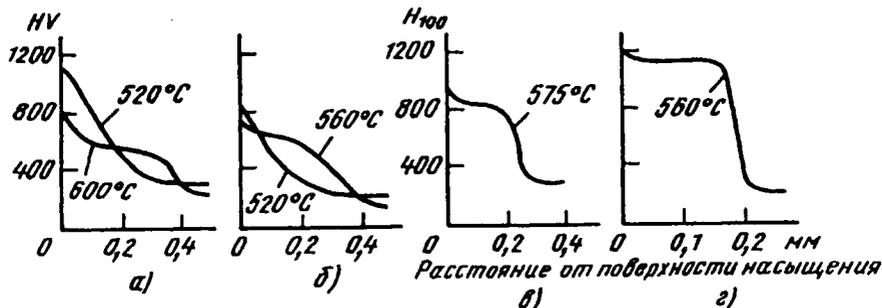


Рис. 2.9.15. Распределение твердости по толщине азотированного слоя: а — сталь 38X2MЮА; б — сталь 38XН3МФА; в — мартенситно-старяющая сталь 03X12H9Д2ТБ; г — коррозионно-стойкая сталь 12X13

Такой процесс применяют для упрочнения зубчатых колес, работающих в условиях умеренных контактных нагрузок, кулачковых и колечных валов, гильз цилиндров и других деталей. Для инструмента из быстрорежущих сталей температура процесса составляет 540...560 °С, из хромистых сталей (X12M, X12Ф1) — 500...520 °С, выдержка 1...3 ч.

**Ионное азотирование** осуществляют в азотсодержащей плазме тлеющего разряда. Длительность процесса ионного азотирования улучшаемых сталей сокращается в 2 раза, а при толщине слоя до 0,3 мм — в 3—4 раза.

Для ионного азотирования используют промышленные установки с полностью автоматизированным циклом обработки. В них вместо аммиачной плазмы используют диссоциированный аммиак либо азотводородную (95 % N<sub>2</sub> + 5 % H<sub>2</sub>) плазму.

Процесс ионного азотирования проводят в две стадии: катодное распыление и собственно насыщение.

Катодное распыление выполняют в течение 20...60 мин при напряжении разряда около 1000 В и давлении 13...26 Па. Ионы и нейтральные частицы газа, бомбардируя поверхность деталей (катода), очищают ее от оксидных пленок и активизируют. Температура поверхности при этом не превышает 250 °С. Затем устанавливают рабочий режим обработки, при котором напряжение составляет 300...600 В, давление 1,3...13,3 гПа, удельная мощность разряда 0,8...1,0 Вт/см<sup>2</sup>. Поверхность детали в результате бомбардировки большим количеством ионов нагревается до 450...580 °С. Ионы и атомы азота адсорбируются на поверхности, поглощаются ею и диффундируют вглубь металла. Параллельно идет процесс катодного распыления, который: 1) снижает высоту шероховатости окончательно обработанной поверхности детали; 2) создает условия для равномерного насыщения трудноазотируемых сталей без дополнительной депассивирующей обработки; 3) уменьшает размеры деталей, компенсируя обычное их увеличение.

Фазовый состав слоя регулируют изменением давления и состава насыщающей атмосферы. Снижением давления и введением в плазму аргона достигается формирование слоя без хрупкой ε-фазы. Именно такой слой толщиной 10...20 мкм создают при азотировании быстрорежущей стали, стойкость инструмента из которой увеличивается в 2—4 раза.

Ионное азотирование эффективно для повышения износостойкости титановых спла-

вов. Процесс проводят при температуре 900 °С (3...4 ч) в аргоне с незначительной добавкой азота. Разрушение под влиянием катодного распыления нитридной корочки, тормозящей диффузию азота, дает возможность получить слой высокой твердости толщиной до 0,15 мм.

**Борирование.** Насыщение поверхностей бором применяют для обеспечения высокой (1500...2000HV) твердости и износостойкости. Износостойкость борированной стали 45 в 4—6 раз выше износостойкости цементованных и в 1,5—3 раза нитроцементованных сталей.

Борированному слою свойственна также высокая теплостойкость (до 700 °С), окалиностойкость (до 800 °С) и коррозионная стойкость в различных агрессивных средах. Недостатки борирования — высокая хрупкость слоя и малая его толщина (0,1...0,2 мм). Борированный слой склонен к скалыванию и имеет небольшую несущую способность.

В зависимости от технологии получения борированный слой может быть однофазным, состоящим из столбчатых кристаллов борида Fe<sub>2</sub>B (1500HV), или двухфазным (FeB+Fe<sub>2</sub>B), в котором расположенные сверху кристаллы бориды FeB обладают высокой (2000HV) твердостью и хрупкостью.

Борированию подвергают углеродистые и легированные стали разного структурного класса. Углерод и легирующие элементы уменьшают толщину боридного слоя, что предопределяет необходимость повышения температуры борирования.

Насыщение бором проводят при температуре 850...1050 °С в течение 2...10 ч. Наиболее часто применяют электролитное борирование в расплаве боры (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) с добавками В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> и NaCl. Катодом служит деталь, анодом — графитовые электроды или тигель.

Борирование проводят также в газовых средах, порошковых смесях, в кипящем слое, тлеющем разряде. Состав сред и режим процесса подбирают таким образом, чтобы получить однофазный слой, обладающий меньшей хрупкостью.

Для повышения несущей способности слоя, подслоя и сердцевину упрочняют, применяя непосредственную закалку. Хорошие результаты дает поверхностная закалка с нагревом ТВЧ.

Борирование применяют для деталей нефтяных насосов, дисков турбобура, пальцев и втулок гусеничных машин и других деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания.

### 2.9.5. УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

**Технологическая сущность ППД. Поверхностное пластическое деформирование.** (ППД) — это метод обработки деталей без снятия стружки, при котором пластически деформируется только поверхностный слой деталей. В результате ППД уменьшается шероховатость поверхности, увеличивается твердость (микротвердость) металла, в поверхностном слое детали возникают сжимающие остаточные напряжения. Это улучшает эксплуатационные показатели детали ППД — повышается выносливость деталей в 1,5–2,3 раза, сопротивление схватыванию, контактная выносливость, и другие эксплуатационные показатели изделия. Особенно эффективным является упрочнение деталей, имеющих конструктивные или технологические концентраторы напряжений, выточки, галтели и др. Достоинством ППД является технологическая универсальность и экономичность метода.

По характеру взаимодействия инструмента с деталью методы ППД подразделяется на статические и ударные.

**Статическое ППД** осуществляется перемещением инструмента вдоль обрабатываемой поверхности с постоянной или закономерно изменяющейся силой деформирования  $P$  или глубиной внедрения  $h_d$  (рис. 2.9.16, а). В зоне контакта инструмента с деталью образуется область пластического течения — *очаг деформации* (ОД), размеры которого зависят от технологических факторов. При перемещении инструмента последовательно деформируется поверхностный слой детали.

**Ударное ППД** осуществляется нанесением инструментом случайно распределенных (рис. 2.9.16, б) или регулярных ударов (рис. 2.9.16, в) по детали. Размеры ОД зависят от кинетической энергии, сообщаемой инструменту. Обработку ведут так, чтобы пластические отпечатки покрыли обрабатываемую поверхность с определенной степенью перекрытия.

**Физические представления об упрочнении деталей ППД.** Основным механизмом холодной пластической деформации металлов и сплавов является внутризеренное сдвиговое перемещение одних частей кристалла относительно других, осуществляемое с помощью многочисленных видов движения дислокации по плоскостям скольжения. С накоплением деформации дислокации размножаются, взаимодействуют между собой и другими дефектами кристаллического строения, в результате чего их движение затрудняется, а напряжение пластического течения  $\sigma_s$  и твердость металла ( $\sigma_s = 0,32 \text{ НВ}$ ) растут. Увеличение сопротивления пластической деформации называется деформационным упрочнением (наклепом) (рис. 2.9.17).

Зависимость  $\sigma_s$  от степени деформации сдвига  $\Gamma$  определяется опытами на растяжение, сжатие или др., однако, согласно гипотезе о единой кривой упрочнения, эта зависимость будет справедлива и для ППД.

Если пластическая деформация сопровождается значительным выделением тепла, то это может привести к снижению  $\sigma_s$ , т.е. к разупрочнению.

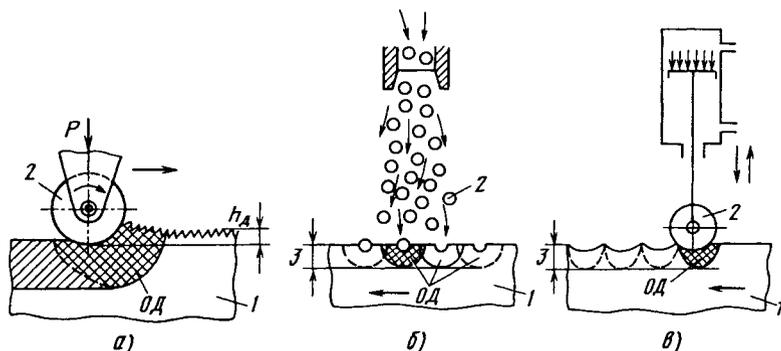


Рис. 2.9.16. Схемы статического (а) и ударного (б) и (в) ППД  
1 — деталь; 2 — инструмент; 3 — упрочненный слой

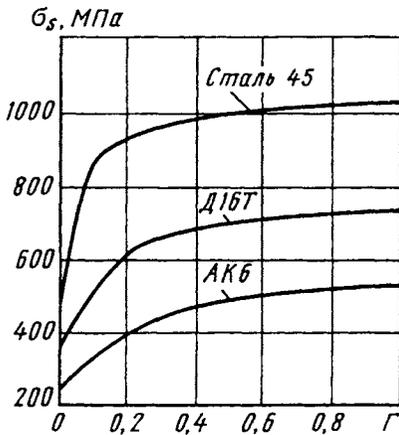


Рис. 2.9.17. Кривые упрочнения

Скорость деформирования в диапазоне  $10^{-4} \dots 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  мало изменяет вид зависимости  $\sigma_s = \sigma_s(\Gamma)$ , однако при больших скоростях  $\sigma_s$  возрастает, что надо учитывать при ударных методах ППД.

После достижения определенного значения  $\Gamma$  рост  $\sigma_s$  практически прекращается. Для каждого материала имеется такое значение накопленной деформации, превышение которого не приводит к дальнейшему упрочнению металла. Более того, при чрезмерном увеличении  $\Gamma$  произойдет сильное снижение ресурса пластичности металла и, как следствие, снижение эксплуатационных характеристик детали.

Степень деформационного упрочнения  $\delta$  металла определяется приращением твердости (или  $\sigma_s$ ):

$$\delta = [(H - H_{исх}) / H_{исх}] \cdot 100\%$$

где  $H$  и  $H_{исх}$  — твердость (микротвердость) упрочненного и исходного металла соответственно.

Параметры состояния поверхностного слоя деталей, наиболее существенно влияющие на их долговечность (шероховатость, степень и глубина упрочнения, остаточные напряжения, степень истощения ресурса пластичности металла и др.), зависят от размеров и напряженно-деформированного состояния ОД, накопленной деформации, которые, в свою очередь, зависят от материала детали и технологии ППД.

В результате проведения технологических и ресурсных экспериментов устанавливают математические зависимости, связывающие параметры состояния поверхностного слоя с режимами ППД — с одной стороны, и характеристикой конструкционной прочности детали — с другой стороны.

Более глубокому пониманию этих связей способствует проведение экспериментов с использованием расчетно-экспериментальных методов механики сплошных сред и теории обработки металлов давлением.

В качестве примера на рис. 2.9.18 приведены результаты исследования методом координатных сеток процесса обкатывания вала роликом, которые показывают изменения вдоль очага деформации АВСЕД (по линии тока  $a-\theta$ ), скорости относительных удлинений  $\epsilon'_x, \epsilon'_y$  и сдвигов  $\gamma'_{xy}$ , интенсивности скоростей деформации сдвига  $\Gamma'$  ( $\Gamma = \int \Gamma'$ ), степени истощения ресурса пластичности  $\psi$ , а также параметров напряженного состояния и показателя напряженного состояния П.

Подобные результаты позволяют не только установить важные технологические закономерности упрочнения, но и являются основой для построения адекватной расчетно-технологической модели, которая является основой моделирования процесса ППД на ЭВМ и оптимизации технологических решений.

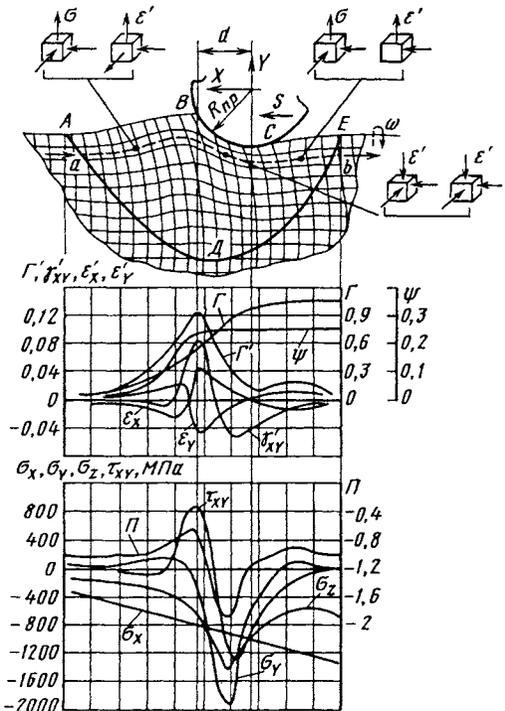


Рис. 2.9.18. Механика упрочнения поверхностного слоя при обкатывании

В общей постановке задача моделирования ППД включает в себя решение нескольких подзадач: определение размеров и формы ОД, расчет поля напряжений и скоростей деформаций в ОД, определение траекторий смещения частиц металла в ОД и расчет вдоль этих траекторий  $\sigma_s$ ,  $\Gamma$ ,  $\delta$ , степени исчерпания ресурса пластичности металла  $\psi$ , остаточных напряжений и др.

Обработка результатов моделирования позволяет получить ряд важных выводов, во многом справедливых и для других методов ППД, которые являются основой технологических расчетов:

- степень деформации сдвига (накопленная деформация) поверхностного слоя и глубина упрочнения зависят от размеров очага деформации, главным образом от размеров пластического отпечатка  $d$  и его кривизны  $R_{np}$  (рис. 2.9.19), где  $d$  — параметр очага деформации (см. рис. 2.9.18);  $R_{np}$  — профильный радиус инструмента;

- степень деформационного упрочнения металла и контактные напряжения зависят от накопленной деформации и кривой упрочнения данного металла;

- контактные напряжения в соответствии с кривой упрочнения металла после достижения определенного значения степени деформации стабилизируются, приближаясь по своей величине к твердости металла НВ (см. рис. 2.9.19);

- оптимальная степень деформации сдвига поверхностного слоя  $\Gamma = 0,5 \dots 0,8$  (степень деформации  $\epsilon = \Gamma / \sqrt{3}$ ).

**Статические методы ППД.** К статическим методам ППД относятся: накатывание, выглаживание, дорнование (деформирующее протягивание), поверхностное редуцирование.

**Накатывание** подразделяется на *обкатывание* (рис. 2.9.20, а), т.е. накатывание вала выпуклой или плоской поверхности, и *раска-*

*тывание* — накатывание отверстия или вогнутой поверхности (рис. 2.9.20, б).

Для накатывания применяют стандартные шарики или ролики различной конструкции и профиля, изготавливаемые из сталей ШХ15, 18ХВГ, 8Х4В9Ф2, Р18, Р6М5 и др., твердостью 60...62 НРС.

Предварительная обработка — точение, растачивание, фрезерование или шлифование. Твердость детали не более 45 НРС.

Простейшие однороликовые (см. рис. 2.9.20, а) или одношариковые накатные приспособления снабжены упругим элементом для поддержания постоянства силы накатывания. Эти приспособления устанавливают в резцедержателях металлообрабатывающих станков, в том числе с ЧПУ.

Для повышения производительности в массовом производстве используют многоинструментальные приспособления или специальные станки, например, для бесцентрового обкатывания, в которых сила обкатывания обеспечивается гидравлически.

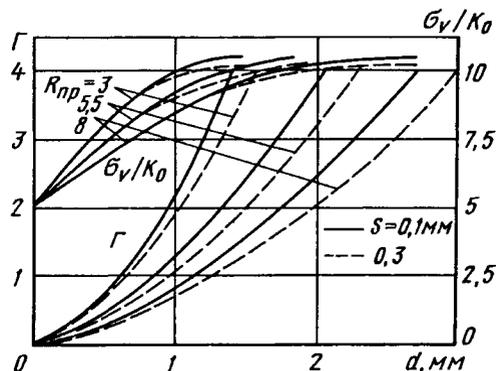


Рис. 2.9.19. Зависимость степени деформации сдвига  $\Gamma$  и контактных напряжений  $\sigma_v$ , отнесенных к пределу текучести при сдвиге неупрочненного материала  $K_0$  от  $d$ ,  $R_{np}$  и подачи  $S$

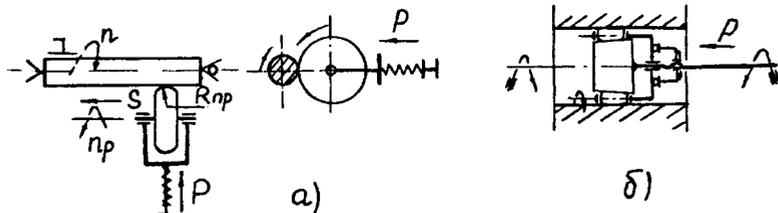


Рис. 2.9.20. Схемы накатывания:

а — обкатывание вала роликом; б — раскатывание отверстия многороликовым инструментом

Для чистовой обработки в массовом и серийном производствах широко используют многороликовые инструменты (см. рис. 2.9.20, б), в которых ролики (или шарики) устанавливают в сепараторе. Размер настройки роликов, определяющий натяг, а следовательно, степень деформации поверхностного слоя, регулируется перемещением опорных конусных элементов. Поверхности малой протяженности, в том числе фасонные, обкатывают с радиальной подачей ролика, профиль которого соответствует профилю детали. При использовании рифленого ролика профиль рифлений переносится на деталь.

Накатывание зубчатых колес и резьб осуществляется фасонным инструментом, как правило на специальных станках.

По своему назначению накатывание подразделяется на *сглаживающее, упрочняющее, рельефообразующее*.

Сглаживающее ППД применяется для получения малой шероховатости поверхности, упрочняющее — достаточной толщины поверхностного слоя с высоким уровнем деформационного упрочнения и сжимающих остаточных напряжений. Сглаживающая и упрочняющая обработки различаются главным образом режимами деформирования и формой рабочей части ролика.

Для упрочняющей обработки используют ролики кругового профиля с малым (3...8 мм) профильным радиусом, для чистовой — большим профильным радиусом или конические ролики малого диаметра (6...20 мм). Шарики, благодаря своей простоте и доступности, используют в единичном и серийном производствах.

*Выглаживание* — метод ППД, осуществляемый при скольжении инструмента по поверхности деформируемого материала (см. рис. 2.9.21, а). В качестве инструмента для выглаживания применяют наконечники различной формы (см. рис. 2.9.21, б). Материал наконечника — алмаз или сверхтвердые синтетические материалы.

Наиболее часто в машиностроении используют процесс алмазного выглаживания (АВ).

Отличием алмазного выглаживания от накатывания является высокая твердость и малый профильный радиус деформирующих инструментов (0,5...4 мм). Это позволяет осуществлять локальное деформирование поверхностного слоя с малыми силами. В связи с этим рациональная область использования алмазного выглаживания — обработка зака-

ленных деталей, сверхтвердых покрытий или деталей, имеющих малую жесткость.

Для АВ применяют, как правило, упругие державки, устанавливаемые на универсальные или специальные металлообрабатывающие станки.

Точность обработки при накатывании и выглаживании упругим инструментом остается на уровне исходной. При работе жестким инструментом она на 10...15 % увеличивается за счет неравномерного сглаживания шероховатости.

Управляющими технологическими факторами накатывания и выглаживания, влияющими на шероховатость и упрочнение, являются: радиальная сила деформирования  $P$  (или заданный натяг  $h_z$ , если обработку осуществляют жесткими инструментами), подача  $S$ , диаметр ролика (шарика)  $D_p$ , профильный радиус инструмента  $R_{np}$  (в плоскости подачи), скорость  $v$ , шероховатость поверхности заготовки  $Rz_{исх.}$ , количество деформирующих инструментов в наладке  $Z$ , число рабочих ходов и др.

Основными технологическими факторами накатывания и выглаживания являются сила деформирования  $P$ , подача  $S$  и профильный радиус инструмента  $R_{np}$  (рис. 2.9.22).

Применяют два подхода к расчету режимов упрочнения: с использованием эмпирических зависимостей и по параметрам очага деформации. В последнем случае силу  $P$  выбирают из условия обеспечения степени деформации сдвига  $\Gamma_{opt}=0,5...0,8$  и глубины упрочнения в диапазоне  $h_z=(0,02...0,1)$  от радиуса детали.

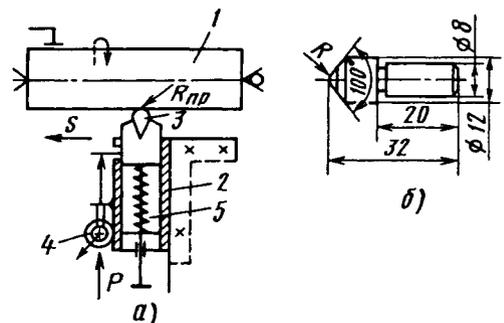


Рис. 2.9.21. Схема процесса и инструмент для алмазного выглаживания:

1 — деталь; 2 — державка; 3 — алмаз;  
4 — индикатор; 5 — пружина

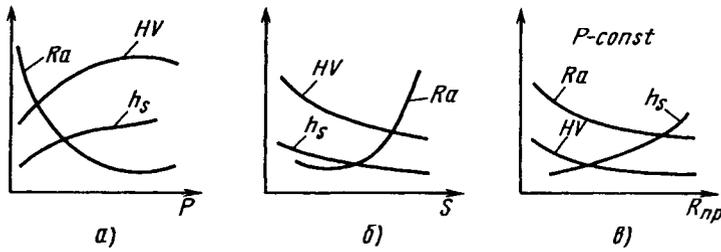


Рис. 2.9.22. Влияние  $P(a)$ ,  $S(б)$  и  $R_{np}(в)$  на параметры поверхностного слоя

Расчет  $P$  при упрочняющем накатывании роликом с подачей и при выглаживании осуществляется по следующему алгоритму:

- определяют параметр  $d$  ОД (см. рис. 2.9.18), необходимый для обеспечения требуемого значения  $h_s$ :  $d = h_s/2,25$ ;
- определяют  $R_{np}$  из условия обеспечения требуемого значения  $d$  и  $\Gamma$ :  $R_{np} = (4...5) d/\Gamma$ ;
- $Z$  определяют площадь контакта инструмента с деталью:

$$F = 1,05d \sqrt{\frac{2l_{max} R_p R_d}{R_p + R_d}} (1 + 0,35 \sqrt{\frac{R_p + R_d}{R_d}}),$$

где  $R_d$  — радиус детали;

$$l_{max} = \sqrt{R_{np}^2 - (d - S)^2} - \sqrt{R_{np}^2 - d^2} \text{ или приближенно } l_{max} \cong Sd / R_{np}.$$

- определяют силу обкатывания  $P = \sigma_y F$ , где  $\sigma_y$  — среднее напряжение на контакте, которое определяют по кривой упрочнения ( $\sigma_y \cong 3\sigma_s$ ) или для приближенных расчетов принимают равным НВ.

Проверку правильности выбранной силы осуществляют при отладке процесса или измерением микротвердости поверхностного слоя или профилографированием очага деформации и измерением на профилограмме  $d$ . При накатывании жесткими инструментами заданный натяг  $h_s$  выбирают в диапазоне 0,03...0,3 мм в зависимости от исходной шероховатости, точности заготовки и жесткости инструмента.

Подача влияет, с одной стороны, на производительность процесса, а с другой, — на шероховатость поверхности. Подачу выбирают из отношения  $d/S$  на один ролик, равной 2...6. При использовании многороликовых приспособлений подачу увеличивают в  $Z$  раз, где  $Z$  — число роликов.

Рекомендуемые подачи для чистового обкатывания и режимы алмазного выглаживания приведены в табл. 2.9.6 и табл. 2.9.7 соответственно.

Скорость накатывания и выглаживания мало влияет на параметры упрочнения и выбирается в диапазоне 30—150 мм/мин. Малые скорости снижают производительность обработки, а большие приводят к повышению температуры поверхностного слоя и, как следствие, — к снижению упрочнения.

Накатывание и выглаживание следует осуществлять за один рабочий ход.

Смазочно-охлаждающая технологическая среда — машинное масло, сульфозфрезол. ППД чугуна осуществляют без охлаждения.

**2.9.6. Подачи на оборот (мм) при чистовом обкатывании роликами кругового профиля**

Профильный радиус ролика, мм	Ra после обкатывания, мкм						
	0,63		0,32		0,16		
	Ra до обкатывания, мкм						
	5,0	2,5	1,25	2,5	1,25	1,25	0,63
5	0,07	0,15	0,3	0,07	0,15	0,07	0,15
6,3	0,09	0,18	0,36	0,09	0,18	0,09	0,17
8	0,12	0,23	0,46	0,12	0,23	0,12	0,19
10	0,15	0,29	0,56	0,15	0,29	0,15	0,21
12,5	0,18	0,37	0,64	0,18	0,34	0,18	0,24
16	0,23	0,49	0,72	0,23	0,39	0,23	0,27
20	0,29	0,58	0,80	0,29	0,42	0,29	0,30
25	0,37	0,83	0,88	0,37	0,48	0,35	0,35
32	0,47	0,94	1,0	0,47	0,54	0,39	0,39
40	0,58	1,12	1,12	0,58	0,60	0,43	0,43
50	0,74	1,24	1,24	0,74	0,66	0,48	0,48

## 2.9.7. Оптимальные режимы алмазного выглаживания

Твердость обрабатываемого материала	Исходная шероховатость $R_a$ , мкм	Радиус алмаза, мм	Режимы обработки			Шероховатость обработанной поверхности, $R_a$ , мкм
			Сила $P$ , Н	Подача на оборот, мм	Скорость, м/мин	
50—65 HRC <sub>3</sub>	0,32	1,3—2	200—250	0,02—0,04	50—100	0,08
	0,16		150—200			0,08
	0,08		120—150			0,04
30—50 HRC <sub>3</sub>	0,63	1,5—2	120—150	0,03—0,05	50—100	0,16
	0,32		120—150			0,04—0,08
	0,16		100—120			0,02—0,04
20—25 HRC <sub>3</sub>	2,5	2—2,5	120—150	0,03—0,08	50—200	0,32—0,63
	1,25		100—120			0,16
	0,63		80—100			0,08—0,16
300 HB	1,25	2,5—3,5	120—150	0,06—0,10	50—200	0,32—0,63
	0,63		100—120			0,16
	0,32		80—100			0,08—0,16
	0,16		80—100			0,04—0,08
	0,08		60—80			0,02—0,04

*Вибронакатывание* — это рельефообразующая обработка, осуществляемая стальными закаленными шариками с наложением на инструмент дополнительных осциллирующих движений для получения на обрабатываемых поверхностях регулярных микрорельефов (рис. 2.9.23). В зависимости от траектории движения инструмента на поверхности детали образуются канавки различного рисунка.

При использовании в качестве инструмента алмазных выглаживателей процесс называют *вибровыглаживанием*.

Основное назначение вибронакатывания — повышение стойкости и задиростойкости, улучшение прирабатываемости, уменьшение момента трогания, повышение гидроплотности, нанесение декоративного рельефа, увеличение жесткости листовых материалов и др.

Вибронакатывание осуществляется на металлообрабатывающих станках, преимущественно токарных. Осцилляционное движение создается устройствами различных видов.

Существует большое количество типов устройств для вибронакатывания, отличающихся траекторией движения инструмента (эксцентричное вращение, сложное движение и т.д.) и характером привода вибратора (механический, электромагнитный, гидравлический и т.д.).

Нанесение микрорельефа возможно также другими методами: *накатыванием фасонными роликами, регулярными ударами и др.*

Управляющие параметры вибронакатывания: сила  $P$ , амплитуда колебаний инструмента  $a$ , частота двойных ходов инструмента  $N$ , радиус шара или радиус алмазного выглаживателя  $R_{пр}$ , частота вращения детали  $n$  и подача  $S$  назначаются по заданным характеристикам микрорельефа: виду рельефа, ширине  $b$  и глубине  $h$  канавок, относительной суммарной площади канавок  $F$ .

Силу обработки выбирают в основном исходя из глубины канавок, заданной для определенного радиуса инструмента. Зависимость глубины канавок от силы обработки приведена на рис. 2.9.24. Радиус инструмента (1...15 мм) выбирают в зависимости от ширины и глубины канавок, жесткости детали и твердости обрабатываемого материала. Оптимальная площадь канавок  $F = 35...45\%$  от номинальной.

Амплитуду колебаний инструмента назначают в диапазоне  $a = 0...4$  мм; частоту колебаний  $N = 900...3000$  дв.ход/мин. Величины  $n$  и  $S$  назначают исходя из заданного рисунка микрорельефа и возможности станка.

Накатывание и выглаживание существенно повышают конструкционную прочность деталей (табл. 2.9.8—табл. 2.9.10).

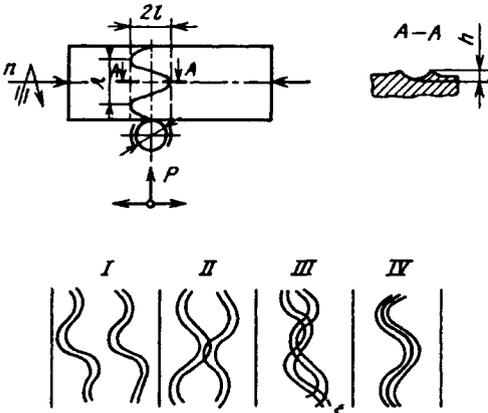


Рис. 2.9.23. Схема вибронакатывания и виды регулярных микрорельефов:

*I* — канавки не касаются друг друга; *II* — канавки касаются друг друга; *III* — канавки пересекаются; *IV* — канавки накладываются друг на друга

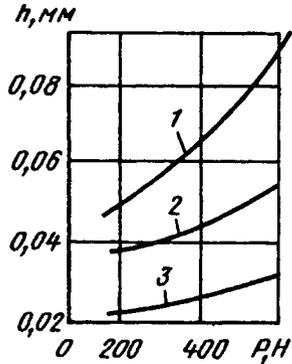


Рис. 2.9.24. Зависимость глубины канавки от силы вибровыглаживания:

*1* — алюминиевый сплав АК4; *2* — сталь 45; *3* — азотированная сталь 38ХМЮА ( $R_{\text{сф}} = 2,5$  мм,  $n = 1400$  мин<sup>-1</sup>,  $S_0 = 0,09$  мм).

### 2.9.8. Сопротивление усталости образцов, вырезанных из чугуных коленчатых валов дизеля 2Д100 (три коренные и две шатунные шейки) при испытании на изгиб при асимметричном цикле.

Метод упрочнения	Предел выносливости на базе 2 млн циклов	
	МПа	%
Неупрочненные	40	100
Азотированные в газовой среде 96 ч	50	125
Обкатывание	71	178
Азотирование + обкатывание	89	222

### 2.9.9. Долговечность подшипников качения при 10% и 50% вероятности разрушения (ШХ15; 58-59 HRC)

Метод обработки	T <sub>10</sub> ,	T <sub>50</sub> ,	% (T <sub>10</sub> )	% (T <sub>50</sub> )
	млн циклов	млн циклов		
Суперфиниширование	11,2	84,6	100	100
Алмазное выглаживание ( $P = 120$ Н, $R_{\text{пр}} = 1,3$ мм, $S_0 = 0,038$ мм, $v = 100$ м/мин)	27,7	313,2	250	370

### 2.9.10. Весовой износ калибра пробки из стали У10А (61 HRC) диаметром 12 мм, длиной 10 мм

Метод обработки	Износ при 17200 циклах испытания в паре со втулкой из стали 45 (45...48 HRC)			
	Весовой, мг	Линейный, мкм	Весовой, %	Линейный, %
Доводка, $R_a = 0,10$ мкм	1,33	1,2	100	100
Выглаживание алмазное, $P = 196$ Н, $R_{\text{пр}} = 1,5$ мм, $S_0 = 0,02$ мм, $n = 19,1$ рад/с	1,02	0,8	76,7	66
Вибровыглаживание, $P = 432$ Н, $R_{\text{пр}} = 1,5$ мм, $S_0 = 2$ мм, $n = 16,8$ рад/с, $N = 2800$ дв.ход/мин; $a = 0,6$ мм	0,86	0,7	64,7	58
Выглаживание алмазное + вибровыглаживание	0,8	0,6	60	50

**Дорнование** — метод ППД при поступательном скольжении дорна по охватывающей его поверхности цилиндра. Синонимами термина "дорнование" является "деформирующее протягивание" (рис. 2.9.25). Обработка наружной поверхности называется поверхностным редуцированием или калиброванием. Для достижения правильного взаимного расположения инструмента и детали применяют плавающую самоустанавливающуюся планшайбу.

При отношении  $l/d_0 < 7$  ( $l$  — длина отверстия,  $d_0$  — его диаметр до обработки) дорнование осуществляют по схеме прошивания, в противном случае — протягивания.

Основным технологическим параметром дорнования является натяг  $i = d_{ин} - d_0$ , где  $d_{ин}$  — диаметр деформирующего инструмента.

Малые натяги ( $i \leq 0,5$  мм) применяют для толстостенных деталей (отношение толщины стенки к радиусу отверстия  $h/r > 0,5$ ), у которых нежелательно существенное изменение размеров после обработки. Большие натяги ( $i$  до 20% от  $d_0$ ) вызывают сквозную деформацию тонкостенных цилиндров ( $h/r > 0,2$ ), в результате изменяется не только диаметр отверстия, но и наружной поверхности, а также уменьшается длина детали.

Инструментом для дорнования служат деформирующие протяжки с одним или несколькими деформирующими элементами, цельные или сборные.

Материал деформирующих элементов (твердый сплав ВК15, ВК10-М, а при малых натягах ВК8) обеспечивает высокую износостойкость и прочность. Остальные элементы сборных оправок изготавливают из углеродистых сталей, закаленных до твердости 40—45 HRC. Стойкость деформирующих элементов из твердого сплава при обработке стальных деталей составляет 50...100 км суммарной длины обработки.

Рабочая форма деформирующих инструментов чаще всего представляет собой два усеченных конуса с углами  $\varphi = 3...5^\circ$ , соединенных цилиндрической калибрующей ленточкой шириной 0,1...3 мм в зависимости от материала детали и толщины стенки.

Для дорнования используют протяжные станки или прессы.

В качестве смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) для углеродистых и низколегированных сталей, а также цветных металлов, применяют сульфозеол МР-1, МР-2, эмульсии; для высоколегированных жаростойких и коррозионно-стойких сталей — САМ-1, САМ-4, САМ-5, САМ-6.

Качество обработанных поверхностей при дорновании зависит от исходной шероховатости, материала детали, толщины стенок, режима обработки, СОТС и угла деформирующего инструмента. Предварительная обработка отверстий — растачивание, зенкерование, развертывание.

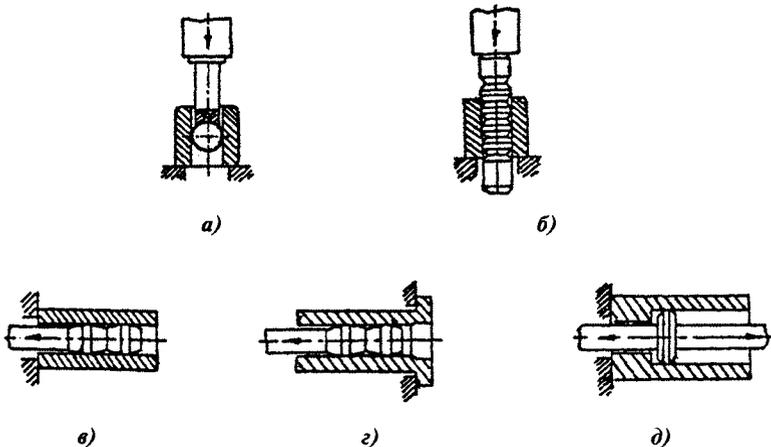


Рис. 2.9.25. Схемы дорнования:

а и б — прошивание шариком или оправкой;

в и г — протягивание по схеме сжатия (в) и растяжения (г); д — глухих отверстий.

Существенным технологическим параметром дорнования, влияющим на шероховатость поверхности, является натяг на деформирующий элемент  $i$  и суммарный натяг  $\Sigma i$  (рис. 2.9.26). Шероховатость поверхности будет тем ниже, чем меньше величина  $i$ .

Если необходимо осуществить большую деформацию и получить малую шероховатость отверстия, нужно 70...80 % деформации произвести с большими натягами, а остальные 25...20 % — с малыми натягами, как показано на рис. 2.9.26 штриховой линией.

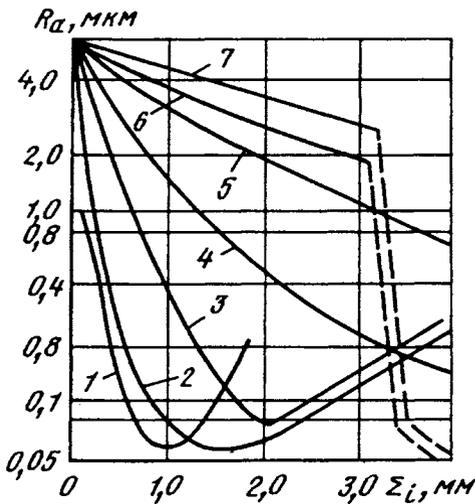


Рис. 2.9.26. Зависимость шероховатости поверхности от натяга при дорновании стали 45:

- 1 —  $i = 0,05$  мм; 2 —  $i = 0,1$  мм; 3 —  $i = 0,2$  мм;  
4 —  $i = 0,4$  мм; 5 —  $i = 0,8$  мм; 6 —  $i = 1,6$  мм;  
7 —  $i = 3,2$  мм

При дорновании в результате пластической деформации происходит упрочнение металла, величина которого зависит от суммарного натяга.

Наиболее эффективным для получения требуемой точности является первый проход. Поэтому дорнование следует вести оправками с двумя — шестью деформирующими элементами.

Силу подбирают опытным путем или расчетом. Прилагая к оправке или детали осевые вибрации с частотой 20 Гц и амплитудой 0,3...1,5 мм, можно существенно снизить силу дорнования.

Дорнование наряду с раскатыванием является эффективным методом упрочнения отверстий (табл. 2.9.11).

### 2.9.11. Долговечность двухрезных образцов поперечных болтовых стыков из сплава Д16Т ( $\sigma_B = 450...470$ МПа)

Метод обработки отверстия	Долговечность в циклах $N \cdot 10^4$ при отнулевом растяжении $\sigma_{max} = 110$ МПа	
	Стык без герметика	Стык с герметиком
Развертывание	2,5	2
Раскатывание	3,5	3,5
Дорнование со снятием наплывов на торцах отверстий	9	11,5
Дорнование с фаской, снятой перед дорнованием	13	16
Дорнование без доработки торцевых кромок	16	21

**Ударные методы ППД.** К ударному ППД относятся методы: обработка дробью, виброударная обработка, ударно-барабанная обработка, чеканка, центробежная ударная обработка, обработка щеткой. Разновидностью ударных методов ППД является ударное накачивание.

Обработка дробью (ОД) осуществляется ударами дроби по деформируемому материалу. ОД используется для упрочнения деталей и инструментов сложной формы и деталей, имеющих малую жесткость: зубьев шестерен, листовых рессор, витых пружин, лопаток компрессоров и турбин, штамповой оснастки и др.

Эффект, достигаемый при ОД, обеспечивается за счет создания в поверхностном слое детали сжимающих остаточных напряжений, наклепа, однородной текстуры металла и специфической микрогеометрии самой поверхности, сплошь покрытой лунками.

Процесс ОД включает две группы методов:

*дробеударной обработки (ДО)*, объединяющую методы упрочнения сухой дробью: дробеструйный, дробеметный, гравитационный, пневмодинамический, беспыльная ДО; *гидродробеударной обработки (ГДО)*, включающей методы упрочнения дробью с применением СОЖ: пневмогидродробеструйный, гидродробеструйный, гидродробеметный, упрочнение микрошариками.

Принципиальные схемы основных способов ОД приведены на рис. 2.9.27.

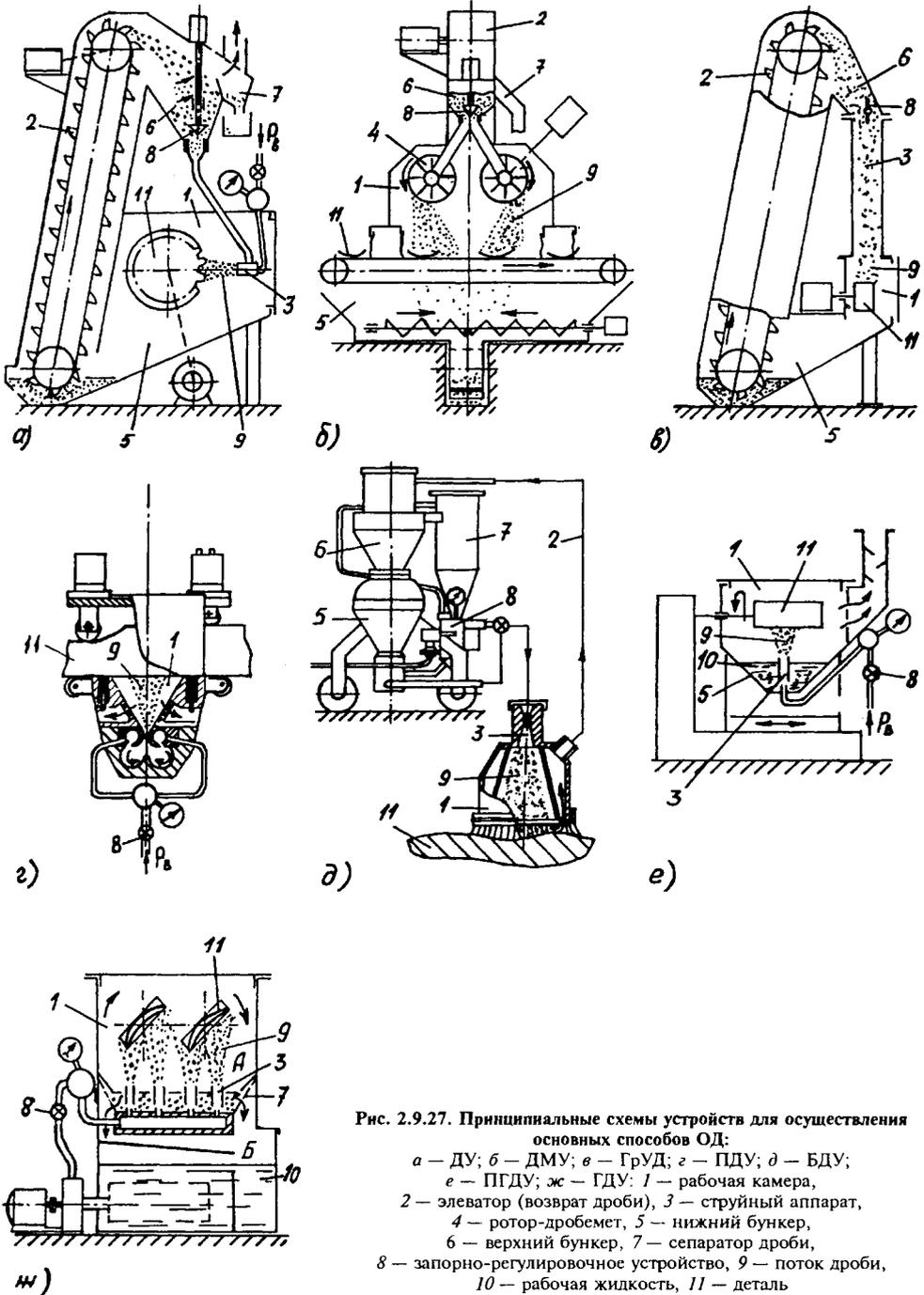


Рис. 2.9.27. Принципиальные схемы устройств для осуществления основных способов ОД:

*a* — ДУ; *б* — ДМУ; *в* — ГРУД; *г* — ПДУ; *д* — БДУ;

*е* — ПГДУ; *ж* — ГДУ: 1 — рабочая камера,

2 — элеватор (возврат дроби), 3 — струйный аппарат,

4 — ротор-дробемет, 5 — нижний бункер,

6 — верхний бункер, 7 — сепаратор дроби,

8 — запорно-регулирующее устройство, 9 — поток дроби,

10 — рабочая жидкость, 11 — деталь

**Дробеструйное упрочнение (ДУ)** осуществляется (рис. 2.9.27, а) на пневматических дробеструйных установках, где в качестве движителя дробин (ДД) используется сжатый воздух с давлением 0,4...0,5 МПа. Применяют стальную (реже чугунную) литую или рубленую из проволоки дробь.

Основные преимущества ДУ: простота конструкции дробеструйных установок, возможность использования централизованной подачи сжатого воздуха; возможность обработки труднодоступных участков деталей; сепарация дробин потоком воздуха; отсутствие необходимости промывания деталей после обработки.

Недостатки ДУ — высокие локальные мгновенные температуры (600...750 °С), приводящие к созданию значительного подслоного максимума сжимающих остаточных напряжений, увеличение шероховатости поверхности деталей, ускоренный износ сопел, дробин и деталей камеры, наличие металлической пыли, низкая производительность каждого сопла).

**Дробеметное упрочнение (ДМУ)** осуществляется (рис. 2.9.27, б) на установках, в которых в качестве ДД применяется ротор-дробемет, вращающийся со скоростью 40...100 м/с. В серийном и массовом производстве листовых рессор, витых пружин, шестерен коробок передач и других деталей автомобилей применяются установки проходного или карусельного типа. Дробь применяется такая же, как при ДУ. Дробеметные установки более производительны и экономичны, чем дробеструйные установки. Качество поверхностного слоя у деталей после ДМУ, такое же, как после ДУ.

**Гравитационное упрочнение дробью (ГрУД)** — это метод, в котором (рис. 2.9.27, в) осуществляется подъем дробин элеватором в верхний бункер и свободное падение этой дробин на деталь. Из-за низкой скорости дробин (не более 8 м/с) и производительности процесс ГрУД в шахтных установках применяется крайне редко. В то же время ГрУД получило широкое распространение в установках барабанного типа.

**Пневмодинамическое упрочнение (ПДУ)** — это метод, в котором в качестве дробин применяются стальные шарики диаметром 2...3 мм, размещенные в замкнутой камере, ограниченной боковыми стенками с отверстиями для отвода воздуха, сверху — обрабатываемой поверхностью детали, снизу — устройством для подачи сжатого воздуха, разгоняющего шарики до скорости 12...15 м/с (рис. 2.9.27, г). Камера перемещается с подачей 10...100 мм/мин вдоль детали. Давление воздуха изменяется в пределах 0,3...0,6 МПа.

ПДУ применяется для обработки плоских участков поверхности деталей, радиус-

ных сопряжений поверхностей, галтелей, а также поверхностей отверстий. Для этой цели используются различные по конструкции устройства.

**Беспыльное дробеструйное упрочнение (БДУ)** осуществляется на установках типа БДУ-Э2М путем подачи в дробеструйное сопло дробевоздушной смеси, подготовленной вне рабочей камеры (рис. 2.9.27, д). Камера перемещается вручную относительно поверхности детали, не отрываясь от нее. В камере предусмотрен отсос дробин, металлических частиц и отработанного воздуха.

БДУ применяется в различных типах производств для обработки локальных участков деталей, а также для формообразования (за счет остаточных напряжений) крупногабаритных деталей из листа, например, панелей самолетов.

**Пневмогидродробеструйное упрочнение (ПГДУ)** осуществляется потоком смеси дробин, воздуха и СОЖ, направляемого на деталь (рис. 2.9.27, е). Преимущества ПГДУ: значительное снижение коэффициента трения

$f_{\text{тр}}^*$  на площадке контакта дробин и детали, снижение износа струйных аппаратов, отсутствие элеватора и металлической пыли.

Для ПГДУ применяются высокоскоростные (более 50 м/с) пневмогидродробеструйные эжекторные установки (ПГДЭУ), струйные аппараты которых оснащены соплами-эжекторами (С-Э) в количестве от 1 до 80. ПГДУ применяется преимущественно для упрочнения мелкой дробью (диаметром менее 0,2...0,3 мм, в том числе стеклянной) резьбовых деталей, елочных замков лопаток турбин, режущего инструмента, вырубных штампов и т.п.

**Гидродробеструйное упрочнение (ГДУ)** (рис. 2.9.27, ж) осуществляется в гидродробеструйных эжекторах установках (ГДЭУ), где в качестве ДД применяется СОЖ, например, минеральное масло.

Деталь устанавливается на шпindel в камере, разделенной сеткой-сепаратором дробин на две полости А и Б. В сетке помещены шарики (дробь), в полости Б — СОЖ. В полости А установлен струйный аппарат, имеющий одно или несколько С-Э. В форсунку С-Э подается под давлением 0,2...1,5 МПа рабочая жидкость, которая эжектирует шарики, находящиеся в камере вокруг С-Э, и направляет их на обрабатываемую деталь. Отделенная от шариков сеткой жидкость сливается из камеры в бак и очищается.

ГДУ обеспечивает более высокие качественные показатели поверхностного слоя по сравнению с ДУ и ДМУ: формируются только сжимающие остаточные напряжения с незна-

чительным спадом к поверхности; шероховатость поверхности  $Ra=10...2,5$  мкм понижается до  $Ra = 2,5...1,25$  мкм; исключен процесс газонасыщения поверхности детали; на деталях из цветных металлов практически отсутствует вкрапление частиц железа.

ГДУ по сравнению с ПГДЭУ имеет ряд преимуществ: значительное (более чем в 5 раз) повышение производительности (минутный расход дробы через одно С-Э более 50 кг/мин); высокая стабильность режима обработки; высокая стойкость шариков и соплового аппарата (в тысячи раз выше, чем при ДУ); исключены воздуходсушительные и воздухоочистительные системы. При ГДУ в качестве рабочей жидкости применяются, наряду с минеральными маслами, различные водные растворы с антикоррозионными и снижающими коэффициент трения добавками.

Разработана гамма ГДУ, применяемая как в мелкосерийном, серийном, так и в массовом производстве.

*Гидродробетное упрочнение (ГДМУ)* — это процесс ГДУ с той лишь разницей, что в качестве ДД служит ротор — дробемет, как при ДМУ. Подача дробы к дробемету осуществляется посредством С-Э, т.е. без механического элеватора.

Процесс ГДМУ обеспечивает возможность значительного увеличения скорости потока дробы до 30 м/с и более.

ГДМУ применяется для упрочнения крупномодульного инструмента и может успешно заменить процесс ДМУ.

*Упрочнение микрошариками (УМШ)* представляет собой процесс ОД, при котором используются стальные или стеклянные шарики с размерами 50...100, 100...160, 160...200 мкм.

УМШ применяется в основном для обработки ажурных тонкостенных деталей, имеющих малые радиусы закругления, например, лопатки компрессоров с пером, имеющим радиус закругления кромок 0,1 мм, а также деталей с конструктивными концентраторами напряжений в виде галтелей и канавок с радиусом менее 0,2 мм.

Особенностью УМШ является обеспечение сжимающих остаточных напряжений, практически не имеющих подслоного максимума. УМШ осуществляется по схемам процессов ДУ, ПГДУ, ГДМУ или на специальных установках.

Оборудование для ОД состоит из следующих основных узлов:

дробеструйной камеры (ДК);

дробеметного или дробеструйного аппарата, принципиальные схемы которых приведены на рис. 2.9.28;

узла, обеспечивающего размещение обрабатываемых деталей относительно ДД; механизма, обеспечивающего возврат дробы в исходное положение;

сепаратора дробы, предназначенного для отделения от рабочей массы дробы изношенных дробиннок и частиц.

Инструментом при ОД служит дробь (табл. 2.9.12).

### 2.9.12. Характеристика инструмента для ОД

Дробь	Обозначение	Диаметр дробы $D$ , мм	Разброс $D$ во фракции дробы, мм (%)
Стальная литая	ДСЛ	0,2...3,6	0,4 (>40)
Чугунная литая	ДЧЛ	0,2...3,6	0,4 (>40)
Стальная рубленая из пружинной проволоки	ДСР	1...2,5	0,5 (>40)
Шарики (ШХ15)	ШД	1...10	0,04 (<5)
Стеклянная	СД	0,025...1,2	0,4 (>40)
Микрошарики (стальные)	МШ	0,05...0,2	0,03 (>30)

Смазочной и охлаждающей технологической средой при ОД служат: минеральные масла с низкой кинематической вязкостью (не выше  $30 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), имеющие температуру вспышки более 135 °С, станочная эмульсия, вода с антикоррозионными и снижающими коэффициент трения добавками. Для снижения трения дробь покрывается слоем антифрикционного металла или в состав дробы добавляют порошок графита или сернистого молибдена.

Технологическая оснастка включает в себя приспособления для установки детали и для контроля режима. Установку детали допускается выполнять с отклонениями  $\pm 5$  мм. Закрепление деталей проводится только в случаях обработки их на шпинделе, барабане и т.п., а также при упрочнении деталей в заготовленном состоянии (листовых рессор, витых пружин и т.п.). Станочные приспособления выполняются с предохранением резьбовых и других подвижных соединений от попадания в них дробы и металлической пыли в процессе ОД.

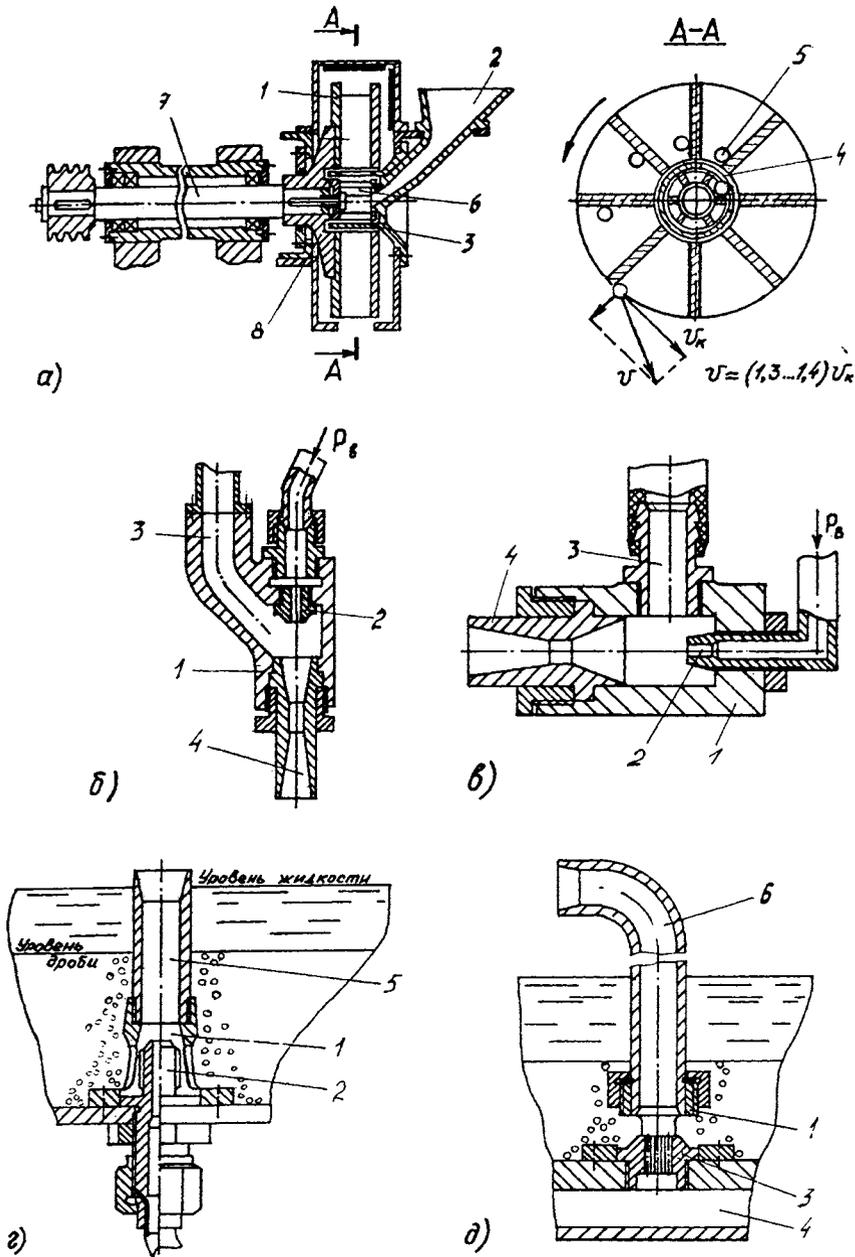


Рис. 2.9.28. Схемы движителей дробы (ДД), применяемых в оборудовании для ОД:  
 а — роторный дробемет (1 — дробемет; 2 — питатель; 3 — втулка для направления потока дробы; 4 — окно для подачи дробы; 5 — дробь; 6 — нагнетатель; 7 — вал привода; 8 — ступица);  
 б, в — дробеструйное сопло для создания вертикальной и горизонтальной струи (1 — корпус; 2 — форсунка; 3 — питатель; 4 — сопло); г, д — сопло-эжектор для создания вертикальной и горизонтальной струи (1 — корпус; 2 — форсунка; 3 — многоканальная форсунка; 4 — камера для подвода жидкости к форсункам; 5 — прямое сопло; 6 — кривое сопло)

К контрольным приспособлениям относятся индикаторный прибор для измерения стрелы прогиба после ОД контрольных пластин (КП) с базовой длиной 33, 60, 95 мм, приспособления для измерения пропускной способности сопел, а также устройства для определения расходной характеристики потока дробы по пятну обработки.

К основным технологическим параметрам процесса ОД относятся: диаметр дробы  $D$ , скорость их удара о поверхность  $v_y$ , коэффициент контактного трения  $f_{\text{тр}}^*$  при прямом ударе дробы и время обработки, определяемое через удельную экспозицию  $t$ . Значения  $D$  и  $f_{\text{тр}}^*$  принимаются, исходя из существующего в производстве оборудования для ОД деталей или назначаются в случае изготовления нового оборудования.

Скорость потока дробы  $v_y$  (м/с) определяется из условия обеспечения заданной глубины упрочнения  $h_s$ :

$$v_y = 5,2 \cdot 10^3 \cdot K (h_s / D)^2 \cdot \sqrt{H_d / \xi K_y \rho_{\text{ш}}},$$

где  $H_d$  — динамическая твердость упрочняемого материала, равная отношению энергии удара дробы к объему образованной при ударе сферической лунки, ГПа;  $\rho_{\text{ш}}$  — плотность материала шарика, кг/м<sup>3</sup>;  $K$  — коэффициент, учитывающий материал детали и значение коэффициента трения  $f_{\text{тр}}^*$ ;  $\xi$  — коэффициент пропорциональности;  $K_y$  — коэффициент удара. Значения  $K$ ,  $\xi$ ,  $H_d$  и  $K_y$  приведены в табл. 2.9.13.

Значение  $v_y$  можно определить приблизительно по рис. 2.9.29, задавшись величиной относительной деформации металла  $\epsilon$  при единичном прямом ударе сферой ( $\epsilon = d/D$ , где  $d$  — диаметр отпечатка) или значением  $h_s = 1,5\epsilon D$ .

Удельная экспозиция — это минимальное время  $t$ , необходимое и достаточное для нанесения наименьшего числа ударов  $j_{\text{min}}$  дробинками в каждое место на обрабатываемой поверхности с целью обеспечения заданной сплошности пластической деформации поверхностного слоя. Время  $t$  устанавливается как правило экспериментально, исходя из условия достижения стрелы прогиба КП в пределах 85% от ее величины при  $t \geq 10$  мин.

Значения  $j_{\text{min}}$  приведены в табл. 2.9.14. Там же даны значения числа ударов для достижения стабилизации  $j_{\text{стаб}}$  и максимально допустимого количества ударов в одну точку  $j_{\text{max}}$ , после которого возможно отслаивание частиц металла, т.е. «шелушение».

Время ОД конкретной детали, уменьшающейся по своей ширине в потоке дробы,

$$t = K_1 \cdot K_p \cdot K_b (L/d_n)_r t,$$

где  $L$  — длина детали;  $d_n$  — диаметр струи дробы для сопла или длина активного пятна потока дробы для дробемета (при  $L < d_n$  принимаем  $L/d_n = 1$ );  $K_1$ ,  $K_p$ ,  $K_b$  — поправочные коэффициенты.

### 2.9.13. Средние значения безразмерных коэффициентов для определения параметров режима ОД ( $v_y$ , $t$ ) с учетом $f_{\text{тр}}^*$

Обозначение	Материал детали		
	Алюминиевый сплав Д16Т	Сталь 45	Титановый сплав
$K$	$\exp(0,83 - 0,7f_{\text{тр}}^*)$	$\exp(0,77 - 0,75f_{\text{тр}}^*)$	$\exp(1,31 - 0,85f_{\text{тр}}^*)$
$\xi$	1,92	1,57	0,35
$K_y$	0,71	0,70	0,56
$H_d$ , МПа	2230	37300	612

### 2.9.14. Допустимое число ударов в одну точку при ОД

Материал детали	Вид ОД	$j_{\text{min}}$	$j_{\text{стаб}}$	$j_{\text{max}}$
Алюминиевый сплав	ДО*	8	32	8800
	ГДО**	7	23	8800
Сталь	ДО	5	25	37300
	ГДО	4	20	37300
Титановый сплав	ДО	4	23	612
	ГДО	3	21	612

ДО\* — дробеструйная обработка; ГДО\*\* — гидродробеструйная обработка.

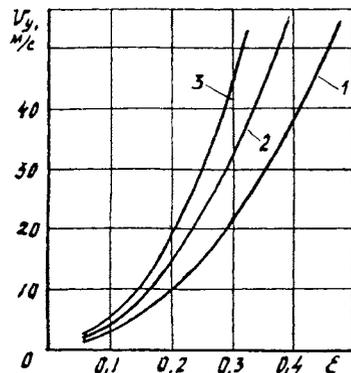


Рис. 2.9.29. Зависимость относительной деформации  $\epsilon$  от скорости потока дробы  $v_y$ :  
1 — алюминиевый сплав Д16Т; 2 — сталь 45;  
3 — титановый сплав ВТ8

Контроль процесса ОД проводится в основном косвенным путем: по величине стрелы прогиба КП по методу Алмена при их одностороннем упрочнении ОД; по размеру диаметров отпечатков на поверхности детали от ударов отдельными дробинками; по распределению числа дробинок в зоне обработки; по расходу дроби и др.

Качество упрочнения деталей зависит от

способа ОД и режима ОД, которые выбираются, исходя из условия обеспечения толщины упрочненного слоя, остаточных напряжений, шероховатости поверхности, долговечности детали. Порядок выбора режима ОД изложен в рекомендуемой литературе.

Результаты влияния различных процессов ОД на предел выносливости или долговечность, приведены в табл. 2.9.15.

**2.9.15. Повышение предела выносливости  $\sigma_{-1}$  деталей (образцов) (в МПа) или их долговечности  $N$  (в циклах или в часах) после ОД**

Наименование деталей, образцов	Материал (термообработка)	$\sigma_{-1}, N$	Без упрочнения	После ОД	
				ДО	ГДО
Образцы сварные плоские	Сталь 10, ОТ4 (шов, стыковой)	$\sigma_{-1}$	100	185	—
		$\sigma_{-1}$	132 (О)	—	—
		$\sigma_{-1}$	200	—	380
Листовые рессоры	55С2	$\sigma_{-1}$	520	720 1160 (Н.С.)	920 —
Пружины витые	Сталь 60С2Г (42...44HRC)	$N \cdot 10^{-6}$ , циклы	0,1	0,35	1,5
Шестерни	Сталь 35Х(Цн) 30ХГТ(Цн) 12Х2Н4А(Ц)	$N$ , ч	9,6	52,4	—
		$N$ , ч	87	103	—
		$\sigma_{-1}$	600	720	850
Лопатки компрессора ГТД паровых турбин	ВД17 ВТЗ-1 12Х12Н2ВМФ	$N \cdot 10^{-6}$ , циклы	0,3—3,5	—	4...20
		$\sigma_{-1}$	400	410	480
		$\sigma_{-1}$	300	—	400
Елочный замок диска турбины ГТД	ХН73МБТЮ (при $T=700$ °С)	$\sigma_{-1}$	100 %	—	(115...145) % УМШ
Панели	Д16Т	$N \cdot 10^{-6}$ , циклы	0,18	0,27	1,4
Трубопроводы	Х18Н12Т	$\sigma_{-1}$	170	—	240
Шатуны	18Х2Н4ВА (38...40HRC)	$\sigma_{-1}$	500	520	575

Обозначение вида термообработки: О — отпуск; Ц — цементация; Цн — цианирование; Н.С. — ОД в напряженном состоянии; УМШ — упрочнение микрошариками.

Виброударная обработка (ВиУО) — метод ППД (рис. 2.9.30), осуществляемый соударением колеблющихся частиц обрабатываемой среды (ЧОС) (в виде стальных закаленных шаров, роликов и др.) с поверхностью обрабатываемых деталей, помещенных в рабочую камеру (РК), установленную на упругих элементах.

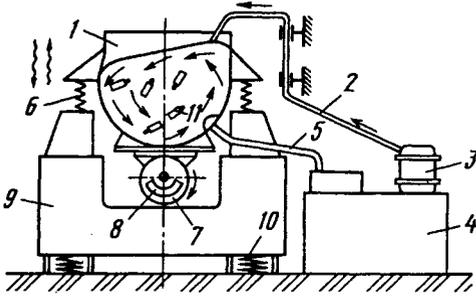


Рис. 2.9.30. Схема процесса виброударной обработки: 1 — рабочая камера; 2 — подача СОЖ; 3 — насос; 4 — бак-отстойник; 5 — слив; 6 — пружина; 7 — вибратор; 8 — дебаланс; 9 — основание; 10 — амортизаторы; 11 — обрабатываемые детали

В РК загружают ЧОС и обрабатываемые детали. В процессе обработки ЧОС колеблются. Под действием вибраций обработка происходит относительно равномерно во всех зонах рабочей камеры. Она сопровождается непрерывной циркуляцией или периодической подачей технологической жидкости (ТЖ).

Технологические параметры ВиУО: амплитуда и частота колебаний, соответственно  $A = 0,5...9$  мм и  $f = 15...50$  Гц; скорость соударения ЧОС и обрабатываемых деталей  $0,3...1$  м/с; ускорение  $20...150$  м/с<sup>2</sup>; давление при соударении  $300...700$  МПа; температура в рабочей камере не превышает обычно  $30...40$  °С.

В процессе ВиУО происходит уменьшение шероховатости поверхности до  $Ra = 0,2$  мкм, повышение микротвердости на  $20...60$  % на глубине  $0,1...0,5$  мм и более; образование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений; округление острых кромок, удаление заусенцев, уменьшение или ликвидация концентраторов напряжений. Всестороннее нанесение множества микроразрывов способствует выравниванию остаточных напряжений по сечению детали, что позволяет использовать ВиУО не только в качестве зачистной и упрочняющей, но и стабилизирующей обработки (стабилизации формы и размеров деталей).

На качество и производительность ВиУО влияют режимы и продолжительность обработки, характеристика и размеры ЧОС, состав и количество ТЖ, масса обрабатываемых деталей, их количество в рабочей камере. Некоторые зависимости представлены на рис. 2.9.31 и 2.9.32.

Достоинством станков резонансного типа является возможность создания станков большой массы, меньшей энергоемкости и привода.

Современные станки для вибрационной обработки деталей работают в основном в зарезонансном режиме, который характеризуется минимальными усилиями, действующими на подшипники вибратора и упругие связи, и достаточно высокой устойчивостью.

Наибольшее распространение получили инерционные (дебалансные) (см. рис. 2.9.30) и электромагнитные вибраторы. Расположение оси привода может быть горизонтальным, вертикальным, наклонным и поворотным, что определяет направление действия возмущающей силы.

Форма рабочей камеры оказывает влияние на характер и интенсивность перемещения рабочей среды и обрабатываемых деталей. Объем рабочей камеры составляет от  $0,5...1$  до  $1000...28000$  дм<sup>3</sup>.

В вибрационных станках применяют упругие элементы, связывающие колеблющиеся и неподвижные массы, в виде стальных спиральных пружин, пластинчатых рессор, резинкордных баллонов и упругих элементов из резино-металлических элементов.

Станки периодического действия предназначены для обработки деталей партиями, непрерывного — для обработки непрерывно движущегося потока деталей.

Универсальные станки предназначены для обработки деталей самой разнообразной номенклатуры; специализированные — для обработки деталей сходных по конфигурации и размерам; специальные предназначены для обработки деталей определенного типоразмера.

Немеханизированные вибрационные станки предназначены для обработки деталей без применения средств механизации на вспомогательных операциях (загрузка и т.п.). Для обработки непрерывно движущегося потока деталей более приемлемыми являются автоматические вибрационные станки непрерывного действия (с рабочей камерой проходного типа) полностью механизированные. Известны два вида вибрационных станков непрерывного действия: с прямоугольной формой РК и в виде спирали или торового кольца с разделительным устройством.

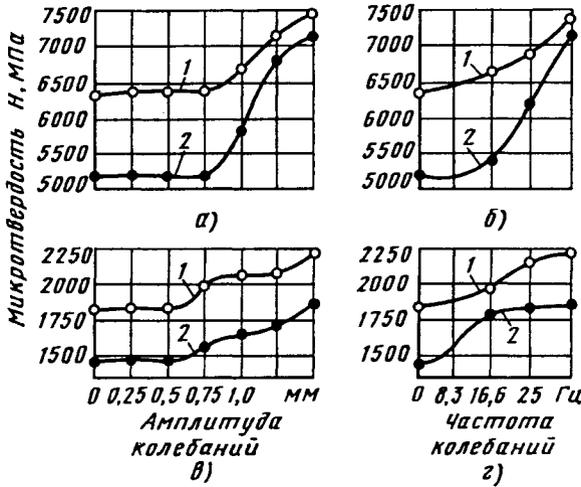


Рис. 2.9.31. Влияние амплитуды (а, в) и частоты колебаний (б, г) на микротвердость поверхностного слоя закаленной (а, б) и отожженной (в, г) сталей: 1 — сталь 3Х15; 2 — сталь 40X

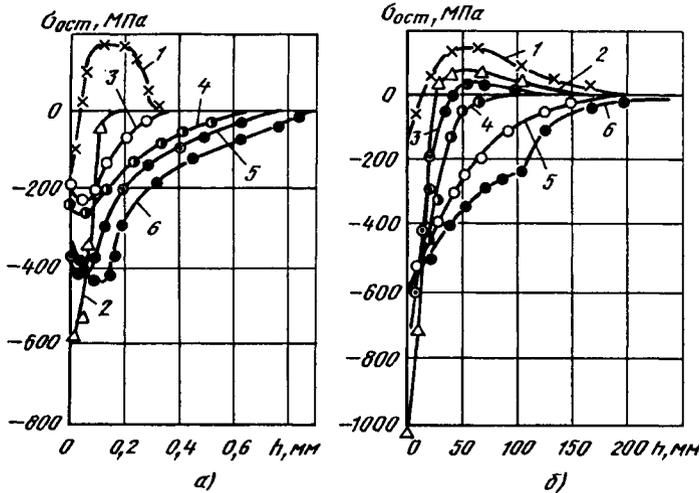


Рис. 2.9.32. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое отожженных (а) и закаленных (б) деталей из стали 3Х15: 1 — исходный; 2 — абразивные гранулы; 3 — стальные шары  $\varnothing$  9 мм; 4 — шары стальные  $\varnothing$  16 мм; 5 — ролики стальные 15×15; 6 — ролики стальные 20×20

2.9.16. Классификационные признаки вибрационных станков

Режим работы	Тип привода	Форма рабочей камеры	Принцип действия	Степень универсальности	Степень механизации
Дорезонансный	Инерционный Эксцентрикковый	Прямоугольная	Периодический	Универсальные	Немеханизированные
Резонансный	Электромагнитный	Кольцевая (спиральная)	Непрерывный	Специализированные	Механизированные
Зарезонансный	Гидравлический Пневматический	Специальная	—	Специальные	Автоматические

Дополнительное оснащение вибрационных станков включает сепараторы для разделения деталей и рабочей среды, устройства для загрузки вибрационных станков, транспортирования и сушки деталей и т.п.

Сушка деталей после ВиУО осуществляется тремя способами: испарением, центрифугированием, вращением барабана с опилками.

Выбор рабочей среды (РС) определяется назначением операции, материалом заготовки (детали), особенностями ее конфигурации и размерами, условиями эффективности процесса.

В зависимости от целей ВиУО применяются абразивные, металлические, полимерные, древесные, войлочные, стеклянные и др. РС.

Для ППД применяются среды в виде полированных стальных шаров диаметром 1...16 мм из закаленной стали ШХ15, роликов цилиндрических и игольчатых, рубленой проволоки или прессованных тел, соответствующих форм и размеров из стальных твердых сплавов.

Для весьма тонкой отделки применяют стеклянные шарики из высококачественного стекла.

Существенное влияние на протекание процесса ВиУО оказывают технологические жидкости (ТЖ), обеспечивающие удаление продуктов износа с поверхности обрабатываемых заготовок и частиц среды, предохранение от коррозии и пылеобразования; препятствующие слипанию заготовок и способствующих их равномерному распределению в рабочей среде.

Основной ТЖ в большинстве случаев являются водные растворы щелочей, кислот и нейтральных солей, которые в зависимости от характера выполняемой операции дополняются различного рода химическими добавками.

Вводимые в ТЖ химические добавки интенсифицируют процесс, повышают антикоррозионные и смазочные свойства растворов; могут образовывать сильную пенную подушку, способствуют лучшему сглаживанию обрабатываемой поверхности и обрабатываемости мягких и вязких материалов; обладают свойствами блескообразования; препятствуют загрязнению и затемнению полируемых поверхностей; предотвращают слипание плоских поверхностей и обеспечивают их равномерную обработку.

Для интенсификации обработки в состав ТЖ вводят низкомолекулярные ПАВ и полимеросодержащие ТЖ.

Расчет основных параметров виброударной упрочняющей обработки с рабочей средой из закаленных стальных шаров включает расчет шероховатости поверхности, мини-

мального времени для достижения стабильной шероховатости, толщины упрочненного слоя нормы шугучного времени, потребного количество оборудования, объема рабочей среды.

Виброударная обработка ППД приводит к повышению износостойкости, сопротивлению усталости на 15...70%, долговечности в 3—10 раз в зависимости от условий работы деталей, режимов и технологии упрочнения, материала, исходного состояния поверхности, предыдущей термообработки, контактной жесткости, отражательной способности, коррозионной стойкости и некоторых других свойств.

Совмещенный процесс ППД вибрационным способом и нанесения дисульфида молибдена или графита на поверхность гильзы гидроцилиндров, шестерни, рейки, вкладыши сферических подшипников и т.п. позволяет уменьшить коэффициент трения и повысить износостойкость деталей.

Примеры ВиУО типовых деталей приведены в табл. 2.9.17.

**Ударно-барабанная обработка** осуществляется во вращающихся барабанах различных конструкций. В качестве обрабатывающей среды применяют преимущественно стальные полированные шары различного диаметра, дробь, рубленую проволоку из различных материалов. В процессе вращения барабана частицы обрабатывающей среды, поднявшиеся до определенного уровня, срываются под действием силы тяжести и соударяются с поверхностью обрабатываемой детали, которая помещена в барабане в свободном или закрепленном состоянии.

К важнейшим параметрам процесса относятся скорость вращения барабана, его размеры, плотность и общая масса ЧОС, состав ТЖ, соотношения объема деталей и рабочей среды. Время обработки 0,5—30ч.

Существуют следующие разновидности ударно-барабанной обработки: центробежная (или планетарная) галтовка, турбуляционная, шпиндельная галтовка в вибрирующих и вращающихся барабанах, галтовка в винтовых барабанах — роторах.

Наиболее эффективно применение ударно-барабанной обработки больших партий деталей, сравнительно небольших размеров (до 100...150 мм). Обработке могут подвергаться детали из различных материалов и сплавов.

Ударно-барабанная обработка ППД уменьшает шероховатость поверхности, упрочняет поверхностный слой на глубину 0,05—0,3 мм и более.

**Чеканка** — это ППД, осуществляемое при возвратно-поступательном движении инструмента перпендикулярно обрабатываемой поверхности.

## 2.9.17. Примеры ВиУО типовых деталей

Обрабатываемая деталь	Режимы, $A; f$	Рабочая среда	Вид ТЖ	Время обработки, мин	Достижимые результаты
Поршневой палец ДВС	2,5 мм; 25 Гц	Шары стальные, ШХ15, $\varnothing$ 8 мм	3%-ный р-р кальцинированной соды	60	Повышение износостойкости на 37%
Вал (винт) грязевого насоса	3 мм; 25 Гц	Шары стальные, ШХ15, $\varnothing$ 8 мм	То же	90	Повышение износостойкости в условиях гидроабразивного износа в 1,5—2,3 раза
Холодновысадочный, прессовый, штамповый инструмент	2,5 мм; 35 Гц	Шары стальные, ШХ15, $\varnothing$ 6 мм	2%-ный р-р кальцинированной соды	120	Повышение стойкости на 25—30%
Режущий и накатной инструмент из сталей Р6М5, Р18, Х12М	2,5—3 мм; 24—35 Гц	Шары стальные, $\varnothing$ 2—5 мм; иглоролики 3×12; ролики 10×10	То же	200—240	Повышение стойкости в 1,3—1,5 раза
Зубья шестерен азотированные	25 мм; 35 Гц	Шары стальные $\varnothing$ 3	То же	90	Повышение долговечности в 1,5—3 раза; снижение вероятности аварийной поломки
Гильза гидроцилиндра из титанового сплава	2 мм; 35 Гц	Шары $\varnothing$ 5 мм, порошок дисульфида молибдена	Всухую	60	Совмещение отделки поверхности и образование пленки, снижающий коэффициент трения; повышение износостойкости

Чеканка применяется для упрочнения тех участков крупных деталей машин, которые являются эффективными концентраторами напряжений: галтели (рис. 2.9.33), основания зубьев крупных шестерен, канавки, углы шпоночных пазов и дна шлиц, сварные швы и т.п.

Для чеканки используют устройства с механическим или пневматическим приводом, устанавливаемые на универсальные токарные, фрезерные или специальные станки.

Наибольшее распространение получили пневмомолотки с числом ударов в минуту 1500...3500 и мощностью 6...20 Дж. Форма деформирующего инструмента должна соответствовать профилю упрочняемой поверхности. Для упрочнения сварных швов, наряду с однобойковым инструментом, применяются многобойковые в виде пучка, состоящего из 25...30 проволочек диаметром 2...3 мм и длиной 150...180 мм.

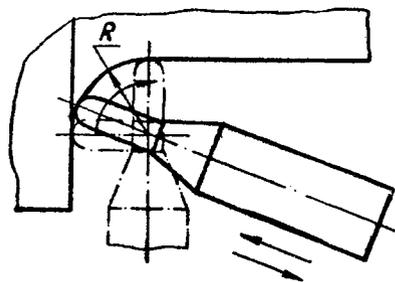


Рис. 2.9.33. Схема упрочнения чеканкой галтели большого радиуса

Распространение получили чеканочные устройства, созданные на основе пневмомолотков 57КМП-4 и КЕ19, и многобойковые пневмоинструменты типа П-2а.

В зависимости от требуемой толщины  $a$  и степени деформации  $\epsilon$  рассчитываются тре-

буемые диаметр пластического отпечатка  $d$ , энергия удара  $\mathcal{E}_y$  и размер (диаметр) бойка  $D$ . Приблизленно  $a = 1,5d$ ;  $\epsilon = d/D$ .

При упрочняющей чеканке конструкционных сталей степень деформации находится в пределах  $0,7 \geq \epsilon \geq 0,3$ .

Шероховатость обработанной поверхности возрастает с увеличением  $\epsilon$ , поэтому степень деформации  $\epsilon > 0,4$  назначается только при допустимой повышенной шероховатости.

Энергия удара

$$\mathcal{E}_y = \pi / 32 (H_d d^4 / D),$$

где  $H_d$  — динамическая твердость.

Для равномерного упрочнения величина подачи (шаг чеканки) не должна превышать (0,10...0,12)  $d$ .

Толщина упрочненного слоя после чеканки может достигать 15...30 мм с повышением поверхностной твердости заготовки на 30% и более. В поверхностном слое формируются остаточные сжимающие напряжения до 1000 МПа и выше. Шероховатость поверхности  $R_z$  после чеканки составляет 40...160 мкм. При большой толщине упрочненного слоя для снижения шероховатости допускается сошлифовка (при мягких режимах) верхнего слоя толщиной до 0,5 мм, что практически сохраняет эффект упрочнения.

Упрочнение чеканкой особенно эффективно для галтелей с малым радиусом ( $R_r/d_b = 0,2$ ; где  $R_r$  — радиус галтели;  $d_b$  — диаметр вала). В этом случае чеканка выполняется без подачи. Примеры эффективного применения чеканки приведены в табл. 2.9.18.

Центробежно-ударное упрочнение — это обработка шариками (роликми), свободно перемещающимися в отверстиях быстро вращающегося диска (рис. 2.9.34).

При встрече с заготовкой шарики вызывают пластическую деформацию поверхностного слоя и сглаживают микронеровности. Для предотвращения выпадения шариков на диск насаживается сепаратор так, чтобы шары выступали на одинаковую высоту (допустимое отклонение 0,03...0,04 мм).

Для обработки отверстий применяются раскатные головки, в которых используют шарики или ролики подшипников.

Обработка тел вращения производится на токарных или шлифовальных станках; плоских поверхностей — на фрезерных, плоскошлифовальных и др.

Предварительная операция — шлифование, чистовое точение (расточивание).

### 2.9.18. Детали, упрочняемые чеканкой

Объект упрочнения	Результат упрочнения
Галтель стальных коленчатых валов	Увеличение предела выносливости на 77%
Галтель чугунных коленчатых валов	Увеличение предела выносливости на 67%
Галтель цилиндра тяжелого гидравлического пресса	Увеличение ресурса около 4 раз
Сварные соединения	Увеличение предела выносливости в 1,3-3,5 раза

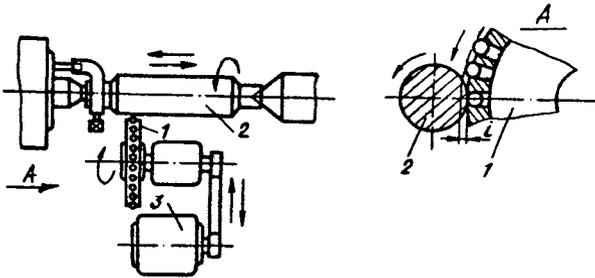


Рис. 2.9.34. Схема обработки наружной цилиндрической поверхности инструментом центробежно-ударного действия:

1 — упрочнитель; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — двигатель;  $i$  — натяг

Диаметр заготовки при центробежно-ударной обработке изменяется не более чем на 0,001...0,002 мм.

Охлаждение маслом снижает износ сепаратора и деформирующих элементов.

В табл. 2.9.19. приводятся технологические параметры центробежно-шарикового упрочнения.

В зависимости от исходного состояния поверхности и свойств материала заготовки шероховатость после обработки достигается  $Ra=0,8...0,16$  мкм, толщина упрочнения для мягких материалов составляет 0,8...3,0 мм, а для материалов средней твердости — 0,3...0,8 мм. Остаточные сжимающиеся напряжения у поверхности 400...800 МПа.

Предел выносливости гладких образцов из стали 18ХНВА в результате упрочнения увеличивается на 18-20%, а у образцов с концентраторами напряжений в виде надреза — более чем на 50% (с 24 до 37 МПа). Повышенные пределы выносливости образцов из сталей 40, 45 и 40Х составило от 20 до 50%.

Износостойкость упрочненных поверхностей повышается, например, для чугуна в 3—4 раза.

Обработка центробежно-ударным инструментом может успешно применяться для упрочнения коленчатых валов, шестерен, гильз цилиндров, вкладышей подшипников, направляющих станин станков, рабочих поверхностей колец подшипников качения, осей, валов и т.д. Например, упрочнение торсионного вала (сталь 30ХГСА) мотоцикла взамен полирования в 7 раз повысило производительность и в 2,0—2,5 раза сопротивление усталости.

Упрочнение вращающимися щетками происходит в результате удара и последующего скольжения проволочек щетки о поверхность детали. Применяются главным

образом дисковые щетки сплошные, секционные и с ударными элементами (рис. 2.9.35). Для щеток используется проволока из сталей 65, 65Г, У8А и др.

Применяют как универсальные (токарные, шлифовальные и др.), так и специальные станки и переносные установки.

Упрочнение щетками без продольной подачи применяют для коротких и фасонных поверхностей.

2.9.19. Технологические параметры центробежно-шарикового упрочнения

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Диаметр упрочнителя (для обработки заготовок средних размеров), мм	200	300
Диаметр шариков, мм	5	16
Число шариков в упрочнителе, шт	20	60
Окружная скорость упрочнителя, м/с	8	40
Окружная скорость заготовки, м/с	0,5	1,5
Натяг, мм	0,04	0,4
Продольная подача упрочнителя, мм/об	0,02	0,25
Количество рабочих ходов	1	3

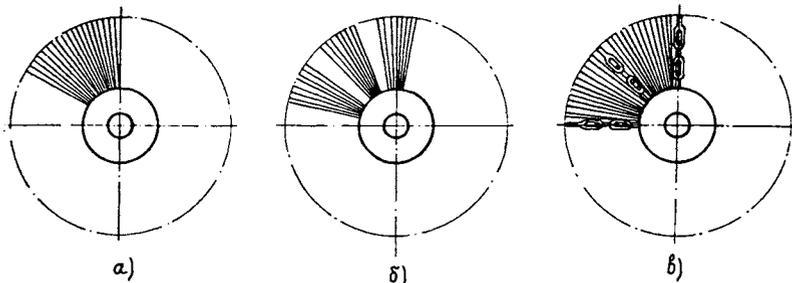


Рис. 2.9.35. Схемы дисковых щеток:

а — со сплошной набивкой; б — секционные; в — с ударными элементами

При упрочнении сварных швов щетка должна охватывать как материал шва, так и околошовной зоны.

Обработка щетками весьма эффективна при очистке заготовок от окалины, шлака, снятия заусенцев, округления острых кромок, зачистке сварных швов и т.п. Однако эти виды обработки не связаны с упрочнением и поэтому не рассматриваются.

Основными технологическими факторами, влияющими на упрочнение, являются диаметр  $d$  и длина  $l$  проволочек, скорость вращения щетки  $v_{щ}$ , натяг  $i$  (рис. 2.9.36). Эти и другие технологические параметры при обработке щетками выбирают в следующих пределах:

Скорость вращения щетки $v_{щ}$ , м/с	10 — 15
Наружный диаметр щетки	$D_{щ}$ , мм 200—400
Диаметр проволочек $d$ , мм	0,2—0,6
Длина проволочек (до заделки), $l$ , мм	40—120
Время обработки (при упрочнении без продольной подачи) $t$ , с	15—40
Время контакта щетки с каждым участком обрабатываемой поверхности $\tau_k$ (при упрочнении с продольной подачей), с	10—60
Скорость вращения заготовки (при обработке тел вращения), м/с	0,3—1,5

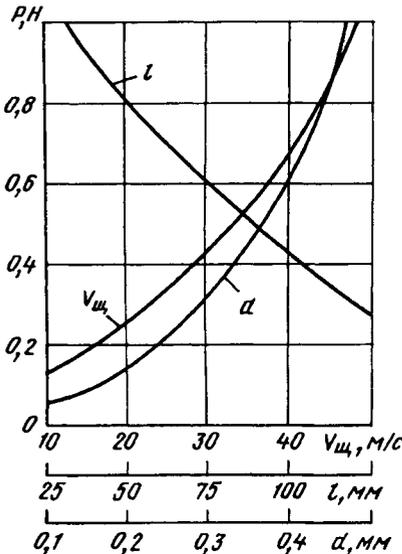


Рис. 2.9.36. Зависимость контактной силы  $P$  от технологических параметров

Эти параметры уточняются в зависимости от свойств материала заготовки, конструктивных особенностей щетки и назначения обработки.

Обработка щетками низкоуглеродистых сталей повышает поверхностную твердость в 2—3 раза, сталей средней твердости — до 2 раз, алюминия — в 4—6 раз.

При обработке легированных закаленных сталей (56...64HRC) поверхностная микротвердость возрастает на 10...20%, а глубина упрочнения составляет 0,02...0,08 мм. Большую глубину упрочнения обеспечивают секционные щетки и щетки с ударными элементами.

Остаточные сжимающие напряжения, возникающие в поверхностном слое, имеют максимум на поверхности (от 400 до 1200 МПа в зависимости от твердости детали).

Скорость щетки рекомендуют выбирать в диапазоне 20—30 м/с; обработку осуществлять с применением СОЖ (масло индустриальное, эмульсия).

Исходная шероховатость должна быть не выше  $Ra=2,5$  мкм для незакаленных и  $Ra=1,25$  мкм для закаленных деталей. После обработки поверхности она снижается, соответственно, в 2—3 и 1,2—1,5 раз.

Обработка щетками не требует специального припуска, так как изменение размера составляет не более 0,002...0,006 мм.

Обработка секционной щеткой на желобошлифовальных станках со скоростью 35...40 м/с в течение 30...35 с и натяге 3...4 мм внутренних колец шпиндельных подшипников качения повысило ресурс их работы в 1,8—2,2 раза, а ресурс шлифовальных шпинделей с упрочненными подшипниками — в 1,6—1,8 раза.

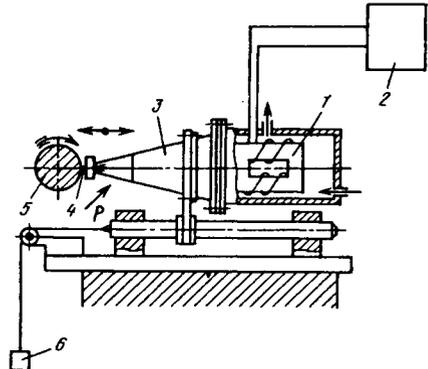


Рис. 2.9.37. Схема УЗУ вала:

- 1 — магнитострикционный преобразователь;  
2 — ультразвуковой генератор; 3 — концентратор;  
4 — инструмент; 5 — вал; 6 — груз

Упрочнение блоком щеток трех беговых дорожек лапы бурового долота, играющих роль внутренних колец подшипников, со скоростью 30...34 м/с, натяге 2...4 мм в течение 25 с более чем в 2 раза повысило их контактную выносливость и износостойкость (опора долота работает в условиях трения качения и одновременно подвергается абразивному и другим видам износа). Материал лапы долота — сталь 14ХНЗМА (56-60HRC).

Особенно значительным оказывается повышение сопротивления усталости сварных соединений (табл. 2.9.20).

Обработка щетками является высокопроизводительным процессом, легко поддающимся автоматизации. Особенно целесообразно применение щеток при обработке: сложных профилей; прерывистых поверхностей; поверхностей, прилегающих к выточкам, буртам и т.п. Ввиду незначительных усилий, действующих со стороны инструмента на заготовку, щетки незаменимы при обработке деталей пониженной жесткости.

Ультразвуковое упрочнение (УЗУ) — это метод ППД (рис. 2.9.37), при котором к инструменту (шарику, ролику, алмазному выглаживателю), установленному в концентраторе, наряду со статической силой прижима к поверхности сообщают ультразвуковые колебания, создаваемые специальным генератором (табл. 2.9.21).

Применение УЗУ эффективно для термообработанных деталей, инструментов из твердых сплавов, деталей малой жесткости.

УЗУ проводят на универсальных или специальных станках.

Рекомендуемые режимы приведены в табл. 2.9.22.

### 2.9.20. Эффективность упрочнения щетками сварных соединений из сплава ПТЗВ

Объект испытания	Предел выносливости при изгибе на базе $5 \cdot 10^6$ циклов	
	МПа	%
Основной металл	255	121
Сварное соединение (исходное состояние)	210	100
Сварное соединение (после упрочнения щеткой)	315	150

### 2.9.21. Основные технологические параметры УЗУ

Параметр	Значение
Статическая сила $P$ , Н	30...300
Амплитуда колебания инструмента $A$ , мкм	5...30
Частота колебаний $f$ , кГц	18...24

### 2.9.22. Рекомендуемые режимы УЗУ

Обрабатываемый материал	Режимы			Микротвердость, МПа		Шероховатость $R_a$ , мкм	
	$P_{ст}$ , Н	$2A$ , мкм	$v$ , м/мин	Исходная	УЗУ	Исходная	УЗУ
Железо Армо	100	27	7	1100	2800	4,30	0,13
Сталь 45	140	27	15	2180	5000	2,60	0,20
СЧ 20	200	20	17	2100	4100	1,90	0,52
Сталь У10А закаленная	240	25	6	8600	11800	0,30	0,18
Сталь ШХ15 закаленная	250	30	7	8400	10300	0,35	0,14

### 2.9.6. УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ И ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

Обработка КПЭ приводит к нагреву поверхности и прилегающего слоя тела и последующего охлаждения до исходной температуры. Термический цикл обеспечивает модификацию поверхностного слоя и повышение его эксплуатационных свойств. Скорости нагрева и охлаждения, а также температурные градиенты в разных точках тела, другие параметры процесса обработки изделий определяются:

теплофизическими свойствами обрабатываемого материала;

эффективной тепловой мощностью, т. е. количеством энергии, вводимой в тело в единицу времени;

КПД процесса, определяемое отношением эффективной тепловой мощности к полной мощности источника энергии;

распределением выделяемой мощности по поверхности или объему тела и изменением ее во времени;

временным режимом воздействия на материалы — импульсным непрерывного действия и импульсно-периодическими;

длительностью импульса  $\tau_i$  и формой временного изменения мощности;

распределением мощности по пятну нагрева.

Для модифицирования поверхностного слоя используют поверхностные источники, у которых глубина проникновения мала по сравнению с радиусом пятна нагрева  $r_0$ .

Наиболее важное практическое значение имеет Гауссово (нормально-круговое) распределение мощности КПЭ по пятну нагрева, которое описывается соотношением

$$q(r) = q_m \exp(-kr^2),$$

где  $q(r)$  — распределение мощности по  $r$ ;  $q_m$  — максимальная мощность в центре пятна нагрева;  $k$  — коэффициент сосредоточенности, определяющий степень остроты кривой нормального распределения, величина которого обратно пропорциональна квадрату радиуса условного пятна нагрева  $r_0$ , в пределах которого сосредоточена основная мощность КПЭ ( $k \approx 3/r_0^2$ ).

Задачи опытного нахождения температуры при импульсном воздействии КПЭ на материалы являются весьма сложными, поэтому в практике широкое применение получили расчеты тепловых процессов для определения ожидаемых глубин зон закалки и других величин.

Тепловые процессы при упрочнении поверхностного слоя концентрированными потоками энергии. Из теории теплопроводности твердого тела следует, что если радиус пятна контакта  $r_0 \gg (at)^{1/2}$ , (где  $a$  — температуропроводность), то распределение температуры по глубине тела мало отличается от одномерного.

Тогда температурное поле в теле при действии поверхностного источника тепла (без учета теплоотдачи с поверхности тела) описывается соотношением

$$T(z, t) - T_0 = 2q_2 \sqrt{at} \lambda^{-1} \operatorname{ierfc}(z/2\sqrt{at}),$$

где  $T(z, t)$  — температура в точке  $z$  тела в момент времени  $t$ ;  $T_0$  — начальная температура;  $q_2$  — плотность потока энергии;  $\lambda$  — теплопроводность.

Функция интеграла вероятности

$$\operatorname{ierfc}(z/2\sqrt{at}) = \int_{z/(2\sqrt{at})}^{\infty} (1 - \operatorname{erfc}y) dy.$$

Время  $t_m$  после начала действия источника тепла, когда на поверхности тела достигается температура плавления  $T_m$ :

$$t_m = \frac{\pi}{4} \frac{(T_m - T_0)^2 \lambda^2}{q_2^2 a}.$$

Увеличение плотности потока  $q_2$ , например на порядок, приводит к уменьшению времени  $t_m$  в 100 раз.

Температура поверхности тела  $T(0, t)$  изменяется с течением времени  $t$  по закону:

$$T(0, t) - T_0 = \frac{2q_2}{\lambda\sqrt{\pi}} \sqrt{at},$$

справедливым, пока глубина тепловой диффузии не станет соизмеримой с радиусом пятна нагрева, т. е. задача не перестанет быть одномерной.

Важными практическими параметрами процессов обработки материалов КПЭ являются скорости нагрева  $v_h$  и охлаждения  $v_c$  в различных точках тела.

Значение этих скоростей определяются из приведенных выше уравнений.

Количественные оценки показывают, что скорость нагрева  $v_h$  может достигать при нагреве твердого тела  $10^8$  К/с и выше. Например, для тела из стали [ $\lambda = 0,4$  Вт/(см · К)],

$a=0,1 \text{ см}^2/\text{с}$ ] в момент времени  $t=10^5 \text{ с}$  при  $q_2=10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$  имеем  $v_h=3 \cdot 10^9 \text{ К}/\text{с}$ .

Скорость охлаждения  $v_c$  всегда меньше по абсолютной величине скорости нагрева, однако ее величина также достаточно велика. Например, для тела из стали через 2 мкс после окончания импульса длительностью  $\tau_i=10 \text{ мкс}$  получим  $v_c \approx 3,6 \cdot 10^5 \text{ К}/\text{с}$  ( $q_2 = 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ). Температура поверхности тела в этот момент времени ( $t = 12 \text{ мкс}$ ) составляет  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Важное практическое значение имеют движущиеся источники тепла. Если источник тепла перемещается по поверхности тела с постоянной скоростью  $v$ , то его действие будет приводить к повышению температуры. Уравнение для расчета температуры при нагреве полубесконечного тела от действия нормально-кругового источника тепла с радиусом  $r_0$  с мощностью  $q$ , перемещающегося с постоянной скоростью  $v$  в направлении оси  $Ox$  в подвижной системе координат, имеет вид:

$$T(x, y, z, t) = \left[ 2q \exp(-v \cdot x / a) \operatorname{erfc}(4\pi a)^{3/2} \right] \times \\ \times \int_0^t \left\{ d\xi / [\sqrt{\xi} (t_0 + \xi)] \right\} \exp \left\{ -z^2 / (4a\xi) - r^2 / [4a \times \right. \\ \left. \times (t_0 + \xi)] - v^2 (t_0 + \xi) / (4a) \right\},$$

где  $t_0 = 1/4 ak$ .

Решение уравнения проводится численным методом.

Для более точного расчета термического цикла обработки тел КПЭ необходим учет следующих факторов:

пространственного распределения мощности КПЭ и временной структуры потока энергии;

геометрических характеристик тела (пластина, цилиндр и т.д.);

теплоотдачи с нагреваемой и обратной стороной тела;

движения фронтов фазовых переходов (плавление, твердофазные переходы, в ряде случаев — испарения) и учета их теплоты в энергетическом балансе;

нелинейностей процесса обработки, т.е. зависимостей теплофизических коэффициентов от температуры, а для действия лазерного излучения учета и температурной зависимости поглощательной способности;

движения КПЭ относительно обрабатываемого изделия в общем случае с переменной скоростью;

при образовании жидкой фазы — учета конвекции и возможной деформации поверхности расплава под действием сил, действующих на него.

Процессы модификации поверхностей тел и приповерхностных слоев могут протекать под действием КПЭ при достижении: 1) температур, не превышающих  $T_m$ , но достаточных для развития структурных и фазовых превращений в твердых телах; 2) температур, превышающих точку плавления  $T_m$ , но еще не достаточных для развития интенсивного испарения (ниже точки кипения при атмосферном давлении); 3) температур, превышающих точку кипения поверхностных слоев  $T_b$ , когда вклад процессов испарения в энергетический баланс соизмерим с количеством тепла, отводимом в объем тела теплопроводностью.

Плотность потока, ее распределение по поверхности, изменение с течением времени воздействия, формы импульсов КПЭ и другие характеристики заметно отличаются для различных КПЭ. Поэтому следует, отмечая общие характеристики воздействия, различать и особенности, вносимые в процесс обработки конкретным источником КПЭ.

Лазерное упрочнение осуществляется на технологическом оборудовании, в состав которого входят блок излучателя 1 (рис. 2.9.38), блок питания 9, блок охлаждения 8, технологический модуль 4, система приготовления и подачи газовой смеси 10 (для установок на базе газовых лазеров), блок управления 7. Технологический модуль включает оптический блок 3 (фокусирование, транспортирование излучения), диагностическую систему 2, вспомогательную оснастку 5, устройства для закрепления и перемещения заготовки 6.

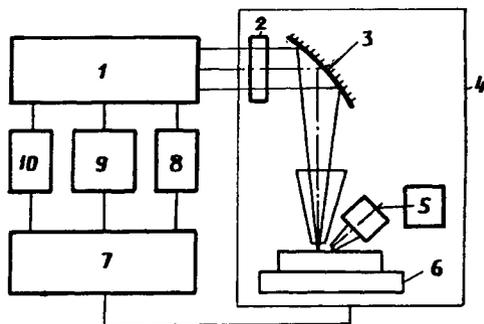


Рис. 2.9.38. Схема технологического оборудования для лазерного упрочнения

Виды лазерного упрочнения (модификации) материала (табл. 2.9.23) отличаются уровнем плотности мощности излучения.

При упрочнении без проплавления сохраняется исходная шероховатость обрабатываемой поверхности.

### 2.9.23. Виды лазерного упрочнения

Вид упрочнения	Плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>	Скорость охлаждения, °С/с	Глубина уплотнения, мм
Без проплавления	10 <sup>3</sup> —10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> —10 <sup>5</sup>	0,02—0,5
С проплавлением	10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>	0,2—3,0
Локальное легирование	10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>	0,2—3,0
Аморфизация	10 <sup>6</sup> —10 <sup>8</sup>	10 <sup>6</sup> —10 <sup>10</sup>	0,01—0,05
Шоковое упрочнение	10 <sup>9</sup> —10 <sup>12</sup>	10 <sup>4</sup> —10 <sup>6</sup>	0,02—0,2

Первые два вида упрочнения обычно проводятся на воздухе. При локальном легировании для насыщения поверхностного слоя легирующими элементами используется специальная среда (газообразная, жидкостная, твердая). Образующийся поверхностный слой по составу и структуре отличается от матричного материала.

Аморфизация материала происходит в условиях высокоскоростного облучения очень коротким импульсом или сканирующим излучением. Сверхвысокие скорости теплоотвода обеспечивают своеобразное "замораживание" расплава, образование металлических стекол (метгласса) или аморфного состояния поверхностного слоя. В результате достигаются высокая твердость, коррозионная стойкость, улучшенные магнитные характеристики и другие специфические свойства материала.

Шоковое упрочнение возникает при воздействии на материал мощного импульса малой длительности. Сверхкороткий импульс приводит к возникновению импульса отдачи и образованию ударной волны в материале. В результате происходит пластическое деформирование материала, а при нагреве поверхностного слоя — и соответствующие изменения в структуре.

Наибольшее распространение получили первые три вида упрочнения, осуществляемые

с помощью импульсного или непрерывного излучения. Импульсное излучение более пригодно для прецизионной обработки поверхностей сравнительно небольших размеров. При этом производительность процесса ограничивается достижимой частотой следования лазерных импульсов.

Непрерывное излучение позволяет осуществлять упрочнение с высокой производительностью.

При обработке импульсным излучением поверхность (при фокусировании излучения сферической оптикой) отличается дискретными зонами, имеющими в плане вид круга диаметром  $d$ , расположенными на поверхности с определенной степенью перекрытия  $K_n$  и коэффициентом использования импульсов  $K_n$  (рис. 2.9.39):

$K_n = S/d$ , где  $S$  — шаг обработки;  $d$  — диаметр зоны облучения;  $K_n = 4F' / (\pi n d^2)$ , где  $F'$  — площадь облученной поверхности;  $n$  — число импульсов.

Производительность двухкоординатной обработки  $\Pi = \pi d^2 K_n f / 4$ , где  $f$  — частота следования импульсов.

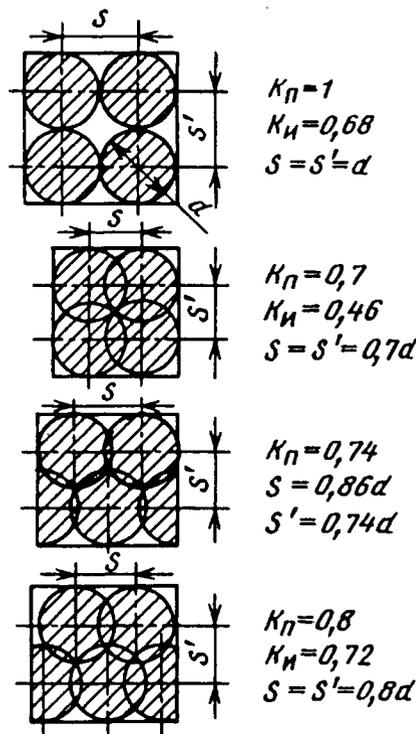


Рис. 2.9.39. Основные схемы импульсного лазерного упрочнения

Обработка непрерывным излучением осуществляется лучом, перемещающимся по заданной траектории.

Производительность обработки зависит от скорости перемещения луча по поверхности, ширины дорожки, числа дорожек и коэффициента перекрытия.

К технологическим характеристикам упрочнения лазерным излучением относятся диаметр единичного пятна упрочнения, ширина "дорожки" упрочнения, глубина упрочненной зоны, степень упрочнения (повышение микротвердости), шероховатость обработанной поверхности и др. На эти характеристики влияют вид обрабатываемого материала, схема обработки, энергетические параметры облучения, эффективность поглощения излучения, среда и т.п.

Для повышения эффективности упрочнения инфракрасным ( $\lambda = 10,6$  мкм) непрерывным излучением  $\text{CO}_2$  лазера применяются разнообразные поглощающие покрытия (табл. 2.9.24), изменяющие критерий эффективности поглощения излучения  $\eta_{\text{п}} = h_{\text{п}}/h_{\text{бп}}$ , где  $h_{\text{п}}$ ,  $h_{\text{бп}}$  — глубина зоны упрочнения соответственно с покрытием и без него.

Оптимальная толщина покрытия 20—50 мкм.

Глубина упрочнения возрастает с увеличением плотности мощности до критического уровня, после которого начинается эрозия материала. При постоянной мощности излу-

чения с ростом скорости обработки снижается как глубина, так и ширина упрочненной зоны.

Шероховатость обработанной поверхности при упрочнении в режиме проплавления зависит от схем обработки, коэффициента перекрытия, уровня плотности мощности излучения. Низкая шероховатость имеет место при  $0,6 > K_{\text{п}} > 0,8$  и достигается при невысоких плотностях мощности излучения (для стали, например,  $q = 50 \dots 100$  кВт/см<sup>2</sup>). Однако при малой плотности мощности (плотности энергии) обеспечиваются и небольшие размеры зоны упрочнения.

При лазерном упрочнении обработка ведется с перекрытием зон лазерного воздействия. В перекрытых участках происходит отпуск ранее упрочненного материала. Основная часть каждого пятна (см. рис. 2.9.39) с мартенситной структурой имеет твердость до 13000 МПа, узловые точки в месте пересечения пятен — 5000...5500 МПа, т.е. твердость отпущенного троостита.

Аналогично имеет место снижение твердости в зонах перекрытия при обработке непрерывным излучением.

При выборе режимов обработки используют теоретические зависимости, полученные на основе решения уравнения теплопроводности, экспериментальные зависимости, табличные значения (табл. 2.9.25) или номограммы.

#### 2.9.24. Критерий эффективности поглощения покрытий

Покрытие	Cr	Cd	C	ZnO	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
$\eta_{\text{п}}$	0,6	2,0	3,0	4,5	5	6,5	6,7

#### 2.9.25. Рекомендуемые режимы упрочнения (при сохранении исходной шероховатости)

Материал	$W_{\text{E}}$ , Дж/мм <sup>2</sup>	$d$ , мм	$v$ , мм/мин	$h$ , мкм	$H$ , МПа
У7	2,2	4,2	90	90	11000
У10	2,3	4,0	84	95	12000
ШХ15	2,3	4,0	84	85	11000
ХВГ	2,5	3,0	84	85	11000
Р6М5	1,5	5,0	105	60	11000
Х12М	2,25	4,1	87	65	11000
12ХНЗА	3,0	3,5	74	80	6000

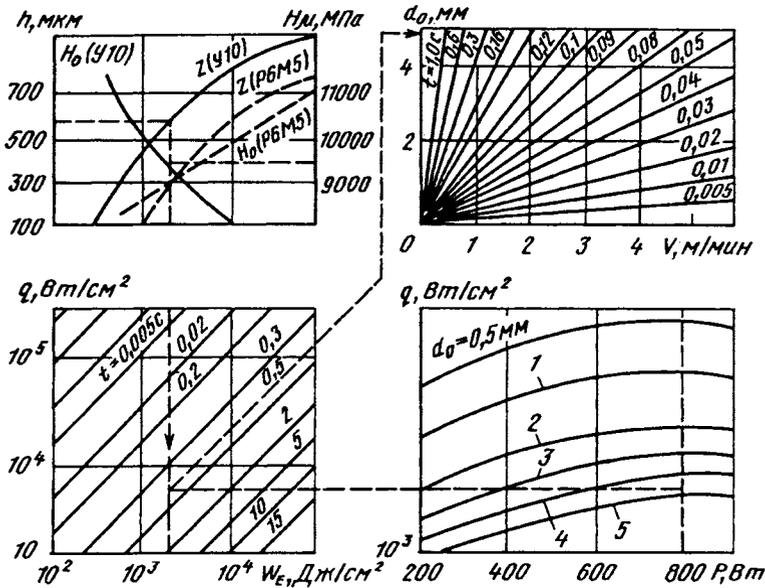


Рис. 2.9.40. Номограмма для выбора режимов упрочнения инструментальных сталей непрерывным излучением  $CO_2$  лазера.

На рис. 2.9.40 показана номограмма, позволяющая для инструментальных сталей Y10, P6M5 определить параметры процесса. Исходными данными являются требуемые микротвердость и глубина упрочненного слоя. В качестве энергетического параметра используется плотность энергии излучения  $W_E = qt = qd/v$ , где  $t$  — время воздействия лазерного излучения. По зависимостям  $h = f(W_E)$  и  $H = f(W_E)$  устанавливают плотность излучения, соответствующую заданным  $h$  и  $H$ . В зависимости от возможностей технологического оборудования и с учетом обеспечения максимальной производительности выбирают  $P$ ,  $d$  и  $q$ . По установленным  $W_E$  и  $q$  определяют длительность воздействия излучения  $t$ . По известным  $d$  и  $t$  определяют скорость  $v$  относительного перемещения луча и заготовки. Возможно и решение обратной задачи — по заданным энергетическим параметрам излучения и скорости обработки определить глубину и твердость упрочненного слоя.

Локальное лазерное легирование обеспечивает упрочнение не только за счет структурных и фазовых превращений в зоне лазерного воздействия, но и путем создания в поверхностном слое нового сплава с отличным от матричного материала химическим составом.

Технологические закономерности процесса, помимо выше рассмотренных, зависят

также от способа подачи в зону обработки легирующего состава, вида легирующего элемента (элементов), свойств матричного материала.

Размеры легированной зоны определяются, в основном, энергетическими параметрами излучения и толщиной покрытия из легирующего материала. При импульсной обработке глубина зоны как правило достигает 0,3—0,7 мм; при использовании непрерывного излучения мощных  $CO_2$  лазеров можно увеличить глубину зоны до 3 мм.

На глубину и степень упрочнения влияет как легирующий состав, так и вид матричного материала. При лазерном легировании низкоуглеродистой стали карбидом вольфрама глубина слоя в 2—2,5 раза больше, чем слоев, легированных TiC, VC, CrV<sub>2</sub>. В то же время карбид титана в наибольшей мере (до 6-8 раз) повышает твердость легированной зоны.

Шероховатость легированной поверхности обычно велика, поэтому после этой операции требуется финишная (абразивная) обработка. Припуск на такую обработку обычно составляет до 0,4 мм.

Эксплуатационные показатели материала после лазерного упрочнения характеризуются уменьшением до 2 раз коэффициента трения и увеличением износостойкости в 3-5 раз. Предел прочности, ударная вязкость несколько снижаются.

Теплостойкость (термостойкость) материала, например, стали Р6М5, повышается на 70–80 °С. Насыщение поверхности алюминиевого сплава АЛ25 железом, никелем, марганцем, медью приводит к увеличению его жаропрочности в 1,5–4 раза. Изменяя условия лазерного облучения, можно получать остаточные напряжения разной величины и знака.

Областями наибольшего применения лазерного упрочнения являются инструментальное производство: например, износостойкость дисковых отрезных фрез из сталей Р6М5, Р9, Р18, упрочненных импульсным лазерным излучением при обработке сталей 20Х13, 12Х18Н10Т, повышается в 1,5–3 раза. Стойкость штамповой оснастки после лазерного упрочнения повышается в 2–3,5 раза. Износостойкость резцов горных комбайнов возрастает в 2–3 раза. Лазерное упрочнение применяется для повышения износостойкости деталей автомобиля, нефтепромыслового оборудования и станков.

Оборудование для лазерного упрочнения различается по типу излучателя: на базе твердотельных или газовых лазеров. Первые более компактны, хотя и генерируют излучение не высокой мощности, (0,125...1,6 кВт). Оборудование на базе газовых лазеров (обычно СО<sub>2</sub> лазеров) имеет значительные габариты; при этом используется более мощное излучение (2...5 кВт).

Электронно-лучевое упрочнение основано на воздействии на материал электронного луча. Эффект упрочнения вызывается сверхвысокими скоростями нагрева и последующего охлаждения облучаемого материала, приводящими к образованию специфических ультрадисперсных структур. Упрочнение может выполняться импульсным и непрерывным лучом.

Схема электронно-лучевой установки показана на рис. 2.9.41. В электронной пушке происходит генерирование, формирование в пучок и ускорение электронов до высоких скоростей. Основные ее элементы - катодный узел и узел фокусирования луча. Катодный узел состоит из катода 1, фокусирующего электрода 14 и ускоряющего анода 2. Пучок электронов 3, эмитируемых поверхностью нагретого катода, ускоряется разностью потенциалов между анодом и катодом. Для сужения пучка используются электростатические и электромагнитные линзы 4. Диафрагма 5 отсекает краевые электроны, пропускающая монокинетическую часть луча. Обрабатываемая деталь 11 укрепляется на рабочем столе 10 в камере 12. Для наблюдения за процессом в установке предусмотрена специальная оптическая система с объективом 8, окуляром 13, подсветкой 6 и полупрозрачным зеркалом 7.

Для управления перемещениями луча (сканирования) используется отклоняющая система 9 электромагнитного типа.

Вследствие сравнительно высокой проникающей способности электронного луча (более 10 мкм в стали при энергии, луча 60 кэВ) и высокой эффективности поглощения энергии наиболее приемлемым режимом упрочнения является обработка сканирующим электронным лучом.

При этом могут быть реализованы следующие виды упрочнения: без проплавления; с проплавлением материала; локальное легирование поверхности.

Глубина упрочнения без проплавления при постоянной скорости сканирования прямо пропорционально зависит от плотности мощности излучения и вида материала (марки стали). Например, глубина упрочнения для стали 45 при  $v=5$  см/с при  $q = 0,2 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> равна 0,1 мм, а при  $q = 0,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> — глубина упрочнения 0,5 мм.

Шероховатость поверхности при упрочнении без проплавления сохраняется на уровне исходной. При упрочнении с проплавлением — не превышает 100 мкм.

После упрочнения возрастают в 2–5 раз поверхностная твердость сталей и сплавов и в 1,5–3 раза износостойкость.

Производительность процесса, вследствие безынерционности луча, достигает очень больших значений. При мощности луча  $P = 2$  кВт, плотности мощности 0,5...1,0 кВт/см<sup>2</sup> и глубине упрочненной зоны 0,3 мм она может составлять до  $6 \cdot 10^4$  мм<sup>2</sup>/мин.

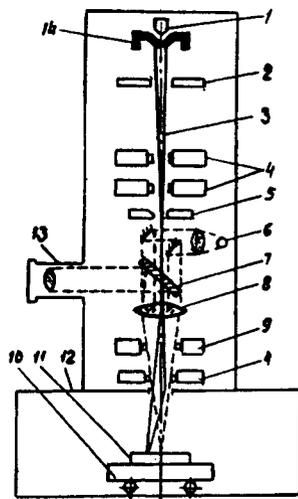


Рис. 2.9.41. Схема электронно-лучевой технологической установки

Электронно-лучевое упрочнение не требует дополнительной подготовки поверхности для улучшения поглощательной способности. Независимо от оптических свойств поверхности энергия луча превращается в тепло с КПД до 75%.

Существенным недостатком упрочнения электронным лучом является необходимость проведения обработки в вакууме.

Упрочнение электронным лучом может выполняться как на специализированных станках, так и на оборудовании, предназначенном для электронно-лучевой сварки и размерной обработки с частичной модернизацией.

**Ионная имплантация (ИИ)** поверхностей основана на том, что ионы, ускоряемые в электрическом поле, передают свою энергию электронам и атомам обрабатываемого тела за счет кулоновского взаимодействия.

Высокоинтенсивные ионные источники дают возможность получать на поверхности тел удельную энергию в несколько единиц Дж/см<sup>2</sup> в течение одного импульса продолжительностью 10<sup>-7</sup>с. При ИИ атомы тела при столкновении с ионом смещаются из узлов кристаллической решетки, что приводит к образованию точечных дефектов, которые при высоких температурах могут перемещаться. Перемещение дефектов делает возможной диффузию атомов, поэтому имплантация приводит к образованию таких сплавов в поверхностных слоях, которые получить в обычных условиях практически невозможно из-за ограниченной растворимости или малой диффузии компонентов. Равновесные пределы растворимости в ряде случаев ИИ превышены в сплавах на несколько порядков.

**Преимущества ИИ:** независимость от пределов растворимости компонентов в твердой фазе; легирование не определяется диффузией; не приводит к изменению размеров детали; протекает при низкой температуре; хорошо контролируется и воспроизводится.

**Недостатки ИИ:** поверхности изделий могут обрабатываться только в зоне прямого действия пучка ионов; глубина проникновения ионов в металл мала (порядка 1 мкм); стоимость оборудования и обработки относительно велика. ИИ существенно влияет на трибологические и механические характеристики поверхности деталей. При дозе облучения 10<sup>16</sup> — 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup> при имплантировании свинца сила трения возрастает, олова — снижается до 50% от первоначальной, а имплантация ионами криптона не оказывает влияния на силу трения.

Имплантация ионов инертных газов (аргон, неон), которая создает сжимающие

напряжения в поверхностном слое, не приводит к снижению интенсивности изнашивания. В то же время имплантация атомов внедрения (бор, углерод и азот) при дозах облучения 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup> значительно снижает интенсивность изнашивания.

ИИ могут упрочняться вырубные и пробивные штампы, сверла-метчики, резакы бумаги и резины, фильтры, пресс-формы и т.д. Для этих изделий получено увеличение долговечности от 2 до 5 раз, повышена производительность в 5 раз и наблюдается снижение интенсивности износа в 3—4 раза. Усталостная долговечность образцов из низкоуглеродистых и коррозионно-стойких сталей, титана и др. повышается в 8—10 раз (энергия ~ 150 кэВ, дозы ионов азота 2 · 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>).

Имплантация ионов хрома и молибдена повышает коррозионную стойкость сталей и алюминиевых сплавов.

**Плазменное модифицирование поверхностей.** Это процесс взаимодействия плазмы с твердым телом, при котором происходит местный нагрев, плавление основного и присадочного металла и др. Плотность потока энергии достигает 10<sup>5</sup>...10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup> при обработке плазменной дугой и 10<sup>3</sup>...10<sup>4</sup> Вт/см<sup>2</sup> — плазменной струей.

В процессах модификации поверхности эффективная мощность изменяется в широких пределах от единиц до десятков кВт. Для аргоновой и других сред, используемых для генерации плазменной дуги, термический КПД в среднем составляет 0,6...0,8.

Зона нагрева отличается высокими температурами и ее градиентами; имеются участки, где материал расплавлен. Химический состав материала может изменяться из-за растворения в нем компонентов плазмообразующего газа.

При нагреве и последующем охлаждении происходит изменение структурно-фазового состояния поверхностного слоя изделия. Стали перлитно-мартенситных классов могут после охлаждения закаливаться с образованием мартенсита или переходных структур на глубину 0,5...0,7 мм от зоны плавления, к которой примыкает зона столбчатых дендритов толщиной 0,06... 0,12 мм.

Для модифицирования поверхностного слоя используется также тлеющий разряд и его модификации (см. п. 2.9.4). Обработка изделия из металла в тлеющем разряде проводится в атмосфере газовой смеси задаваемого состава при давлениях в интервале 13,33 — 13330 Па. Постоянное напряжение от сотен до 1500 В подводится к изделию, являющемуся катодом, и к стенкам камеры, являющимся анодом.

Плазменные процессы, происходящие в азотосодержащей атмосфере, используются с целью повышения надежности и срока службы инструментов из быстрорежущих сталей, шариков для авторучек, контактных поверхностей двигателей и т.д.

Плазменные процессы используются для цементации поверхностных слоев таких тугоплавких металлов, как Mo, W, Nb, Ta и др. При использовании в качестве плазмообразующего газа метана при парциальных давлениях, не превышающих 66,5 Па, на поверхностях изделий образуются слои карбидов ( $Me_2C$  и  $MeC$ ).

Силицирование в плазме смеси  $SiCl_4$  и водорода (соотношение 3:1) поверхностей тугоплавких металлов Mo, W, Nb, Ta приводит к образованию дисилицидов крупнозернистой столбчатой структуры, под которыми формируются слои силицидов, содержание кремния в которых меньше. Тлеющий разряд существенно сокращает (в 10 раз) время получения одинаковой толщины модифицированного слоя по сравнению со временем силицирования без разряда.

Использование плазмы  $AlCl_3$  приводит к развитию процесса алитирования, плазмы  $VCl_3$  и  $H_2$  — борирования, плазмы  $TiCl_4 + H_2$  — титанирования поверхностей изделий из металлов.

Плазма тлеющего разряда, в которой в качестве плазмообразующего газа используются инертные газы (например, аргон, криптон), приводит к модифицированию поверхностного слоя без химико-термической обработки. Так, при воздействии плазмы тлеющего разряда из криптона на пластинку из меди в ней образуется большое число радиационных дефектов, которые могут вносить вклад в увеличение подвижности атомов.

**Модифицирование поверхностей нейтронами потоками.** Модифицирование вызывает значительные радиационные повреждения. Возникающие при этом дефекты влияют на предел текучести, твердость, относительное удлинение и т. д. Нейтронное облучение Армко-железа (99,5%), стали 45 в отожженном и в закаленном состояниях, ковкого чугуна, технической меди, латуни, свинцовой бронзы ухудшает фрикционные свойства этих материалов, если интегральная доза потока облучения (флюенс) не превышает  $10^{18}$  нейтрон/см<sup>2</sup> и улучшение этих свойств, когда флюенс имеет величину  $10^{19}$  нейтрон/см<sup>2</sup> и выше. При этом радиационное упрочнение Армко-железа, меди и алюминия оказывается более значительным по сравнению с упроч-

нением сплавов на их основе. Отсюда следует вывод о стабилизирующей роли атомов примеси при облучении материалов.

У облученных нейтронами железоуглеродистых сталей коэффициент трения изменяется незначительно, сильнее — у меди.

Это связано с тем, что возникающие под действием нейтронов дефекты в кристаллической решетке, а также ионизация среды вокруг образца при испытаниях способствуют проникновению атомов кислорода и образованию плотной пленки окислов.

Быстрые нейтроны, действующие на материалы (отожженная сталь 45 и др.), вызывают равномерное повышение износостойкости и прочности материалов в отличие от облучения смесью тепловых и быстрых нейтронов. Механизм повышения механических характеристик связан с тем, что смешение в облучаемом веществе в основном вызывается действием быстрых нейтронов. Возникающие дефекты блокируют движение дислокаций при деформации металла.

Нейтронное облучение материалов порошковой металлургии (баббит, пористое железо, пропитанное серой) увеличивает на 20-30% твердость и износостойкость материалов.

**Электроэрозионное упрочнение (ЭЭУ)** — метод локального воздействия на поверхностный слой электрических разрядов с целью поверхностного легирования и нанесения покрытий.

При электрических импульсных разрядах между легирующим электродом (ЛЭ) (анодом) и деталью (катодом) происходит (рис. 2.9.42) плавление и испарение материалов электродов. Под действием электрического поля, давлений образующихся паров и электродинамических сил, эти материалы в виде перегретых жидкостей и паров выбрасываются в межэлектродный промежуток, перемешиваются, химически соединяются друг с другом и составляющими межэлектродной среды и, взаимодействуя с поверхностью детали, образуют легируемый слой.

Упрочненный слой состоит из трех зон. Первая — зона термического влияния.

Вторая зона состоит из материала, закаленного из жидкой фазы. Она и является легированным слоем с мелкодисперсной структурой, обладающей высокой твердостью и износостойкостью.

Третья зона является следствием осаждения продуктов электрической эрозии в паровой и жидкой фазах на поверхность упрочняемого изделия.

Использование ЭЭУ открывает широкие возможности по управлению составом и свойствами легированного слоя.

Наряду с восстановлением изношенных поверхностей, ЭЭУ повышает в 2-10 раз износостойкость, фреттингостойкость, теплоустойчивость, антифрикционные свойства деталей и инструмента. Достоинства ЭЭУ: локальность упрочнения, малый расход энергии, отсутствие объемного нагрева материала, простота автоматизации.

Способы ЭЭУ отличаются методом иницирования электрических импульсных разрядов, кинематикой устройств, технологическими возможностями.

Упрочнение выполняется по трем основным принципиальным схемам (рис. 2.9.43). В первой схеме электрические разряды образуются при периодическом касании ЛЭ упрочняемой поверхности при его вибрации. Во второй — специальная следящая система поддерживает зазор, необходимый для протекания электроразрядного процесса. В третьей — электрические разряды формируются при касании упрочняемой поверхности легирующими электродами, расположенными на вращающемся диске.

Вторая схема является наиболее универсальной (рис. 2.9.43, б) Она легко поддается механизации и автоматизации и позволяет реализовать различные технологические схемы ЭЭУ.

Сплотность упрочнения ЭЭУ оценивается коэффициентом кратности

$$j = NS_o / S_y,$$

где  $N$  — число электрических разрядов, воздействовавших на поверхность площадью  $S_y$ ;  $S_o$  — площади поверхности, упрочняемые единственным разрядом;  $t$  — время упрочнения.

Качественное упрочнение достигается при  $j = 6 \dots 8$ .

Толщина упрочненного слоя составляет 3...250 мкм и зависит от энергии электрических разрядов  $E$  и величины переноса материала легирующего электрода на упрочняемую поверхность. Перенос, в свою очередь, определяется материалами сопряженных электродов, длительностью обработки единицы поверхности, технологическими режимами, воздействием внешних факторов (нагрев или охлаждение электродов, подготовка поверхностей под ЭЭУ и т.д.).

Производительность ЭЭУ составляет 1...10 см<sup>2</sup>/мин. Используются устройства и установки для ручного, механизированного и автоматизированного ЭЭУ (в том числе с ЧПУ).

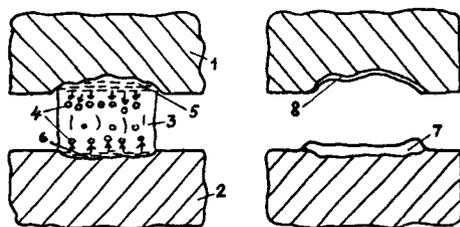


Рис. 2.9.42. Схема процесса ЭЭУ:

1 — легирующий электрод (анод); 2 — упрочняемое изделие (катод); 3 — плазменный канал электрического разряда; 4 — капли расплавленного материала; 5, 6 — расплавленный материал анода и катода, соответственно; поверхности катода (7) и анода (8) после электрического разряда

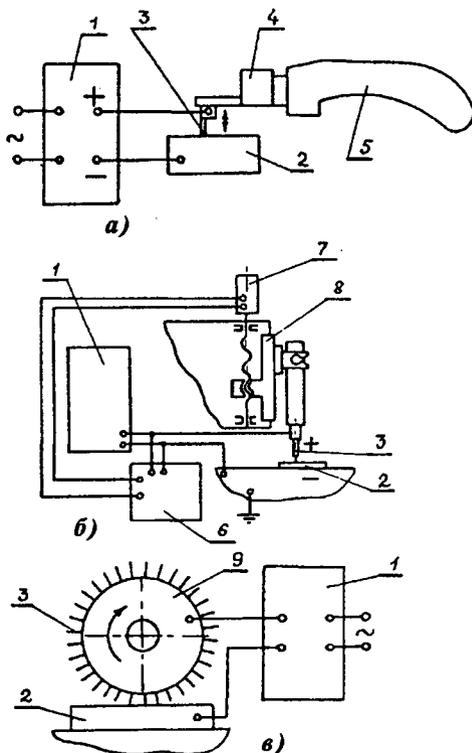


Рис. 2.9.43. Принципиальные схемы ЭЭУ компактным электродом:

а — первая; б — вторая; в — третья схемы; 1 — генератор импульсов; 2 — упрочняемое изделие; 3 — легирующий электрод; 4 — вибратор; 5 — ручка; 6 — блок следящей системы; 7 — привод следящей системы; 8 — каретка; 9 — диск

Состав и свойства упрочненного ЭЭУ слоя зависят от материала легирующего электрода (табл. 2.9.26).

ЭЭУ обычно проводится без специальной подготовки поверхностей на воздухе без использования каких-либо технологических сред. Однако для специальных целей, когда требуется избежать насыщения поверхностного слоя компонентами воздуха, ЭЭУ осуществляют в инертных газах, например, аргоне.

Показатели качества упрочнения определяются типом генератора импульсов, током короткого замыкания  $I_k$  скважностью  $q$ , длительностью  $t_n$  импульса напряжения, емкостью разрядного конденсатора  $C$ , скоростью движения легирующего электрода относительно упрочняемой поверхности  $v_3$ , временем легирования единицы поверхности  $t_3$ .

Шероховатость обработанных ЭЭУ поверхностей зависит: от продолжительности упрочнения; технологических режимов (энергия разрядов и их длительность); шероховатости исходной поверхности; материалов легирующего электрода и подложки; особенностей массопереноса материала ЛЭ.

При использовании "грубых" электрических режимов ЭЭУ ( $I_k > 20$  А,  $E > 0,2$  Дж) шероховатость и толщина легированного слоя увеличиваются; при "чистовых" ( $I_k < 20$  А,  $E < 0,2$  Дж) — уменьшаются.

На установках семейства Елфа при ЭЭУ сталей ЛЭ из ВК6-М, изменение технологических режимов сопровождается изменением шероховатости в диапазоне  $Ra = 0,2...2,0$  мкм.

При ЭЭУ формируются растягивающее остаточные напряжения, снижающие сопротивление усталости детали, и образуется сравнительно высокая шероховатость, обладающая повышенной изнашивающей способностью сопряженной поверхности.

Поэтому ЭЭУ целесообразно использовать в комбинации с ППД обрабатыванием или алмазным выглаживанием.

Наиболее высокий уровень антифрикционных свойств поверхностей достигается при нанесении на них бронзы, меди, серебра, олова.

Малая толщина слоя упрочнения ЭЭУ затрудняет использование в качестве финишных операций шлифования, доводки и других методов, связанных со снятием материала. Эффективным является сочетание ЭЭУ с термической и химико-термической обработками.

Широкие технологические возможности обеспечивают многообразие технологических применений ЭЭУ: формирование легированного слоя требуемого элементного состава, восстановление (наращивание) изношенных поверхностей, локальная химико-термическая обработка, повышение прочности сцепления покрытий с подложкой, подготовка поверхностей под нанесение жаростойких эмалей, лакокрасочных и твердосмазочных покрытий, под пайку и диффузионную сварку и др. (табл. 2.9.27).

### 2.9.26. Материалы, используемые в качестве ЛЭ

Материал легирующего электрода	Область применения
Твердые сплавы ВК6-М, ВК20, Т15К6, ТТ20К9 и др.	Упрочнение деталей из закаленных сталей, режущего инструмента из инструментальных и быстрорежущих сталей
Карбиды, нитриды, бориды, силициды переходных металлов (WC, NbC, TiN, TiB, MoSi и др.)	Упрочнение режущего инструмента из инструментальных и быстрорежущих сталей. Нанесение нижнего износостойкого слоя при получении многослойных антифрикционных покрытий
Сложные композиции типа TiC-Ni, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ni, Ni, TiB-Ti, N-Ni и др.	Упрочнение штамповой оснастки и режущего инструмента, работающих в условиях ударных нагрузок
Металлы и сплавы на их основе	Нанесение многослойных и многокомпонентных жаростойких, коррозионно-стойких и антифрикционных покрытий, подготовка поверхностей под пайку и диффузионную сварку
Графит	Упрочнение деталей из сталей и режущего инструмента

## 2.9.27. Примеры использования ЭЭУ

Упрочняемые детали	Полученный эффект	Примечание
Пяточные узлы большегрузных вагонов	Увеличение ресурса в 2,5 раза	—
Литейная оснастка	Четырех-, пятикратное снижение износа	—
Режущий инструмент и штамповая оснастка	Увеличение стойкости в 2-5 раз	ЭЭУ твердыми сплавами ВК6, Т15К6 и др.
Прецизионные пары трения топливных и гидравлических агрегатов	Восстановление, повышение антифрикционных свойств и износостойкости	ЭЭУ с последующим алмазным выглаживанием
Детали пар трения, работающие в вакууме	Повышение износостойкости и прочности сцепления твердосмазочного покрытия с подложкой. Увеличение ресурса в 2—3,5 раза	Нанесение подслоя серебра перед нанесением твердосмазочного покрытия $MoS_2$
Детали авиационного двигателя, работающие в условиях фреттинг-коррозии при повышенных и высоких температурах	Увеличение ресурса в 3-5 раз. Повышение жаростойкости в 1,5-4 раза	Нанесение многослойных и многокомпонентных покрытий Ta-Ti-Al, Cr-Al и др.
Детали пар трения из титановых сплавов	Обеспечение работоспособности и триботехнической совместимости. Повышение износостойкости в десятки раз	Упрочнение и нанесение антифрикционных покрытий с последующим алмазным выглаживанием

**Газотермическое напыление покрытий** объединяет методы: электродуговой металлизации, газопламенного, детонационного, высокочастотного индукционного и плазменного напыления.

Метод электродуговой металлизации заключается в том, что через направляющие 2 электродугового металлизатора (рис. 2.9.44) непрерывно подаются две напыляемые проволоки, находящиеся под напряжением, между концами которых возбуждается электрическая дуга. В центральной части электрометаллизатора имеется сопло, через которое подается сжатый воздух. Струя сжатого воздуха отрывает с электродов части-

цы расплавленного металла и уносит их к напыляемой поверхности.

Для напыления используют источники постоянного электрического тока. При постоянном токе характер работы является устойчивым, напыленный материал имеет мелкозернистую структуру, производительность напыления высокая. Стабилизация горения дуги обеспечивается подведением высокочастотного напряжения. Для напыления используют проволоку диаметром 0,8; 1,0; 1,6 и 2,0 мм.

Преимуществом способа электродуговой металлизации является высокая производительность процесса и возможность значитель-

ного сокращения затрат времени на напыление. Например, при силе тока 750 А можно напылять стальное покрытие с производительностью 36 кг/ч, что превышает в несколько раз производительность газопламенного напыления. По сравнению с газопламенным напылением металлизация позволяет получить более прочные покрытия, которые лучше соединяются с основой. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных металлов можно получить покрытие из их сплава. Эксплуатационные затраты электрометаллизатора довольно небольшие. При напылении покрытия распылением двух электродов из разнородных материалов желательнее использовать такие электрометаллизаторы, которые бы позволяли проводить отдельную регулировку скорости подачи каждого электрода.

Недостатком рассматриваемого метода является перегрев и окисление напыляемого материала при малых скоростях подачи рас-

пыляемой проволоки. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав (например, содержание углерода в материале покрытия снижается на 40...60 %, а кремния и марганца — на 10...15 %). Это необходимо иметь в виду и применять для напыления проволоку, содержащую повышенное количество легирующих элементов. Однако стоимость такой проволоки повышается приблизительно в 3 раза.

Установка для газопламенного напыления приведена на рис. 2.9.45. Напыляемый порошок поступает в горелку сверху из бункера, разгоняется потоком транспортирующего газа (смесь кислород — горючий газ) и на выходе из сопла попадает в пламя, где происходит его расплавление. Увлекаемые струей горячего газа частицы порошка попадают на напыляемую поверхность.

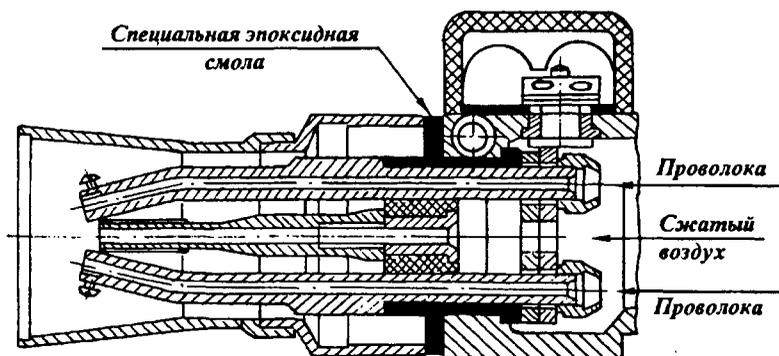


Рис. 2.9.44. Электрометаллизатор для напыления покрытий из проволоки: 1 — токопровод; 2 — направляющие для проволоки; 3 — сопло

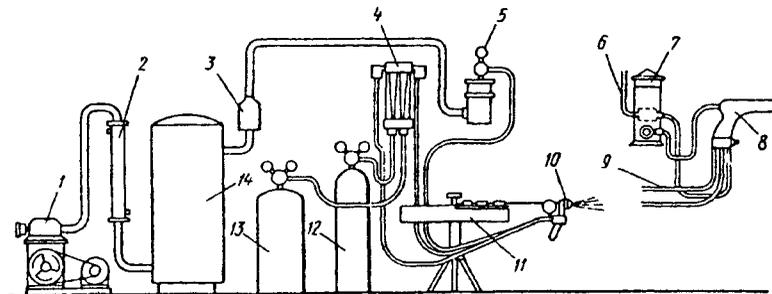


Рис. 2.9.45. Установка газопламенного напыления проволоочного и порошкового материалов:

- 1 — компрессор; 2 — теплообменник; 3 — осушитель; 4 — расходомер;  
 5 — редуктор для регулирования подачи сжатого воздуха; 6 — подвод к регулятору подачи сжатого воздуха;  
 7 — бункер для порошка; 8 — горелка для напыления порошка; 9 — шланг к расходомеру;  
 10 — горелка для напыления проволоки; 11 — бухта проволоки; 12 — кислородный баллон;  
 13 — ацетиленовый баллон; 14 — ресивер

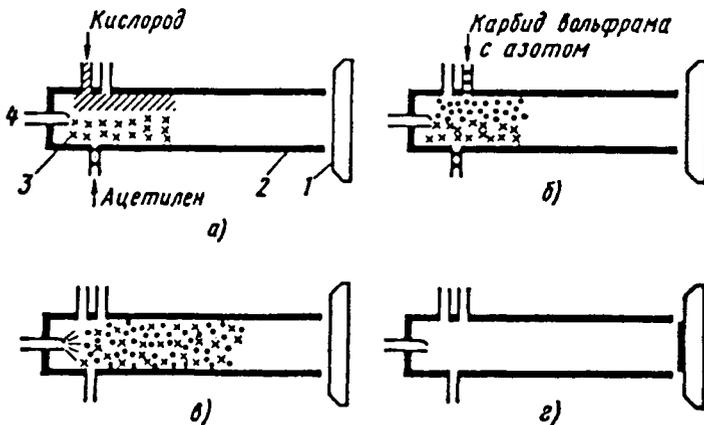


Рис. 2.9.46. Стадии детонационного напыления:

*а* — заполнение камеры рабочей смесью; *б* — подача порошка; *в* — взрыв рабочей смеси и разгон частиц порошка; *г* — образование покрытия; *1* — деталь, на которую наносят покрытие; *2* — водоохлаждаемый ствол; *3* — камера; *4* — электрический запал

Для материала покрытия используют металлы, оксиды, полимеры и другие материалы, температура плавления которых ниже 3500 К (температура газового пламени). Напыляемый материал может быть в виде порошка, прутка, проволоки или порошка, спрессованного в гибкий шнур.

Стадии детонационного напыления показаны на рис. 2.9.46. В камеру 3 водоохлаждаемого ствола 2 диаметром 25 мм подается кислород и ацетилен в строго определенных количествах. Затем в камеру подается порошок напыляемого материала. Газовую смесь, в которой во взвешенном состоянии находится напыляемый порошок, поджигают электрической искрой. В результате взрыва смеси происходит выделение теплоты и образуется ударная волна, которая разогревает и разгоняет частицы порошка до сверхзвуковой скорости в направлении упрочняемой поверхности.

После взрыва смеси горючих газов проводится продувка ствола азотом для удаления продуктов горения. Процесс отрегулирован таким образом, что точно повторяется с частотой 3 — 4 раза в секунду.

Детонационное напыление предназначено в основном для получения твердых износостойких покрытий из карбидов, содержащих небольшие количества металлических связующих, различных окислов и их смесей. За один цикл напыления наносится покрытие толщиной приблизительно 6 мкм. Толщина покрытия составляет 0,25...0,3 мм. Покрытия, полученные детонационным напылением, обладают высокой плотностью и большой прочностью сцепления с основой. При напылении температура основы остается низкой и

не превышает 200 °С (при напылении газопламенной горелкой температура основы составляет 260...320 °С). Поэтому основа практически не подвергается другим физическим изменениям.

Недостатком детонационного напыления являются значительные шумы, достигающие 140 дБ; поэтому установку следует располагать в специальном помещении.

Горелка для высокочастотного индукционного напыления показана на рис. 2.9.47. Помещенный в индуктор стержень (проволока) нагревается и расплавляется вихревыми токами, возникающими под действием переменного магнитного поля, образующегося при прохождении высокочастотного тока по катушке. Расплавленный металл распыляется струей сжатого воздуха и наносится на обрабатываемую поверхность. При напылении металлов, активно взаимодействующих с кислородом, вместо сжатого воздуха используются инертные газы.

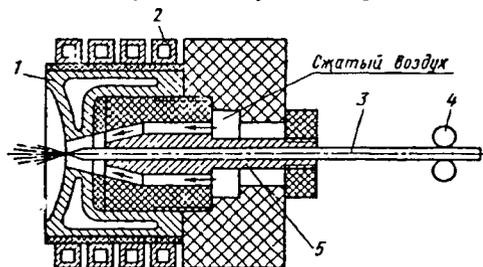


Рис. 2.9.47. Горелка для высокочастотного индукционного напыления

*1* — вставка, концентрирующая электромагнитное поле; *2* — индуктор; *3* — напыляемая проволока; *4* — подающие ролики; *5* — направляющая вставка

Напыляемая проволока подается в горелку электрическим приводом со скоростью 46...120 см/мин. Размер напыляемых частиц, которые образуются при расплавлении проволоки, зависит от давления сжатого воздуха и обычно колеблется в пределах 20...120 мкм. Выгорание элементов сплавов, напыляемых данным методом, незначительно, а прочность покрытия с основой высокая. Однако производительность при высокочастотном индукционном напылении невысокая.

Плазменное напыление — это метод нанесения покрытий, в котором для расплавления напыляемого материала используется низкотемпературная плазма (рис. 2.9.48). Для получения плазмы используют два типа горелок: плазменно-дуговые и плазменно-струйные. В плазменно-дуговой горелке электрическая дуга горит между анодом-деталью и катодом, изготовленным из вольфрама или вольфрамового сплава, содержащего приблизительно 2 % тория. Дугу стабилизирует закрученный поток рабочего газа, истекающий из сопла горелки. В плазменно-струйной горелке дуга образуется между вольфрамовым катодом и анодом, которым является медное, охлаждаемое водой сопло.

Дуговой разряд ионизирует и нагревает до высокой температуры рабочий газ, подаваемый с закруткой в камеру горелки, который вытекает из сопла со скоростью сотни метров в секунду в виде плазменной струи.

Высокая температура плазменной струи (несколько тысяч градусов) позволяет сравнительно просто проводить напыление тугоплавких металлов, керамики и органических материалов. При напылении на поверхность детали расплавление и термическая деформация основы нежелательны. Этому условию соответствуют плазменно-струйные горелки (плазменные распылители). Для напыления обычно используют порошок с частицами размером 40...100 мкм, проволоку, гибкий шнур.

Так как в качестве рабочего газа используется инертный газ, в напыляемом покрытии образуется сравнительно немного окислов. Покрытия, полученные методом плазменного напыления, обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой. Однако плазменное напыление имеет сравнительно низкую производительность, сопровождаемую шумом и сильным ультрафиолетовым излучением. К недостаткам этого метода можно отнести высокую стоимость оборудования и эксплуатационные затраты.

Покрытия, полученные газотермическим напылением, имеют различные эксплуатационные свойства, зависящие от напыляемого материала. Широкие возможности в этом направлении обеспечивают специальные металлические порошки композиционные (табл. 2.9.28), самофлюсующиеся (табл. 2.9.29), коррозионно-стойкие (табл. 2.9.30) и др.

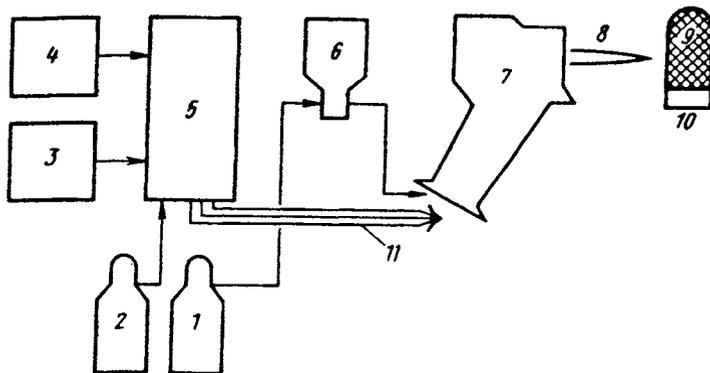


Рис. 2.9.48. Принципиальная схема установки для плазменного напыления:

- 1 — газ, транспортирующий порошок; 2 — рабочий газ; 3 — охлаждающая вода; 4 — источник электроэнергии; 5 — пульт управления; 6 — порошковый питатель; 7 — плазменный распылитель; 8 — плазменная струя; 9 — напыляемое покрытие; 10 — деталь; 11 — подвод порошка, электроэнергии, рабочего газа, воды

## 2.9.28. Композиционные порошки для газотермического напыления покрытий

Индекс	Марка порошка	Химический состав, %	Твердость НВ	Прочность сцепления, МПа
K01	ПГ-Ю5Н	Ni + 5,2Al	210	55
K02	ПГ-Ю10Н	Ni + 9Al	170	55
K03	ПГ-ЮНХ15СР2	NiCr5Si3B2 + 1,2Al	360	55
K04	ПГ-ЮНХ16СР3	NiCr6Si3B3 + 1,2Al	380	55

Примечание. 1. Размер частиц: 40-100 мкм.

2. Характеристики порошков: экзотермически реагирующие порошки, образующие соединения Ni-Al. Гарантируется регламентированный тепловой эффект и хорошая текучесть через отверстия сопла 1,7...2,5 мм.

3. Области применения: порошки ПГ-Ю5Н и ПГ-Ю10Н используются в качестве подслоя и для восстановления размеров. Порошки на основе самофлюсующихся сплавов — для создания износостойких рабочих слоев в сочетании с коррозионной стойкостью. Широко применяются для восстановления и упрочнения посадочных мест деталей автотранспорта и судовых механизмов.

4. Способ нанесения покрытий: газопламенное напыление без оплавления, высокочастотное припекание с добавкой В и Si в пределах 5 %.

## 2.9.29. Самофлюсующиеся порошковые сплавы для газотермического напыления покрытий

Индекс	Марка порошка	Химический состав, %							Твердость покрытий НRC
		Ni	Cu	C	Cr	Si	B	Другие элементы	
B17	ПР*-НСР	Ост.	—	0,15 max	—	2,4	1,4	Co-0,5 max	20—25
B18	ПР-НХ3СР2	Ост.	—	0,12	2,5	2,5	2,3	—	—
B19	ПР-НХ4СР	Ост.	—	0,45	6,75	3,75	2,85	—	25—30
B20	ПР-НХ7СР3МД	Ост.	1,75	0,45	0,75	3,75	2,85	Mo-2,2	50—52
B21	ПР-НХ8СРД6	Ост.	6	0,85	8,0	2,25	2,9	P-0,6	—
B22	ПР-НХ9СР2	Ост.	—	0,3	9,0	3,0	1,6	—	30—35
B23	ПР-НХ12СР2	Ост.	—	0,45	12,0	2,2	2,25	—	36—45
B01	ПР-НХ13СР	Ост.	—	0,3	13,0	2,4	1,5	—	29—34
B24	ПР-НХ13СР3	Ост.	—	0,6	13,0	4,0	3,0	—	46—55
B02	ПР-НХ15СР2	Ост.	—	0,47	15,0	3,15	2,0	—	37—42
B25	ПР-НХ16СР2	Ост.	—	0,52	16,5	3,25	2,2	—	42—50
B03	ПР-НХ16СР3	Ост.	—	0,75	16,0	3,2	2,65	—	47—52
B04	ПР-НХ17СР4	Ост.	—	1,0	17,0	4,15	3,55	—	55—59
B05	ПР-НХ18СР4	Ост.	—	1,2	17,5	4,5	4,25	—	60—62
B07	ПР-НХ21СР	Ост.	—	0,42	21,0	4,5	1,15	—	44—50
B06	ПР-НХ25СР3	Ост.	—	1,2	25,0	2,7	2,5	—	45—51
B12	ПР-НХ42СР	Ост.	42,5	0,2	—	0,9	1,0	—	200 НВ

Продолжение табл. 2.9.29

Индекс	Марка порошка	Химический состав, %							Твердость покрытий HRC
		Ni	Cu	C	Cr	Si	B	Другие элементы	
B13	ПР-ДОл8НСП	4,75	бал.	0,5 max	—	0,85	0,85	Sn-7,5	140 HRB
B26	ПР-ЖХСП	—	0,5 max	1,15	3,75	2,25	3,65	V-0,75 Fe-бал.	58—60
B27	ПР-НХ28М8СП2	Ост.	—	0,12	28,0	1,5	2,2	Mo-8,0	—

\* ПР — порошок, распыленный азотом

Примечания: 1. Размер частиц порошка: 20—63; 40—100; 90—160; 100—280 мкм и др.

2. Плюсовая фракция — не более 2%.

3. Минусовая фракция — не более 5%.

4. Текучесть, не более 22(25) с/50 г.

5. Область применения: сварка и создание покрытий, стойких против механического износа и коррозии.

6. Методы нанесения покрытий: газотермическое напыление, наплавка и припекание Ni и NiCr; сплавы используются преимущественно для покрытий на детали из стали и чулуна; NiCu сплавы — для восстановления изделий из чулуна; самофлюсующаяся бронза — для нанесения покрытий и сварки изделий из Cu и стали.

## 2.9.30. Коррозийно-стойкие стали и сплавы для газотермического напыления покрытий

Индекс	Марка порошка	Химический состав, %						
		Fe	Cr	Ni	Cu	Mo	Si	Другие
B01	ПР*1-Х18Н9	Ост.	18	9,5	—	—	0,8 max	C-0,2 max
B02	ПР-Х23Н28МДЗ	Ост.	23	28	3	3	0,8 max	Ti-0,7 C-0,06 max
B03	ПР-Х19Н11М2	Ост.	19	11	—	2,5	0,6 max	Mn-1,5 C-0,08 max
B04	ПР-Х19Н9ФС	Ост.	19	9	—	—	1,6	V-2,1 C-0,1 max
B06	ПР-Х20Н80	1,0 max	20,5	Ост.	—	—	0,5 max	C-0,1 max
B07	ПР-Х29Н9М2Б	Ост.	29	8,7	—	2,2	1,0	Nb-0,3 C-0,12 max
B08	ПР-Х31Н8М2Б	Ост.	31	8,0	—	2,5	0,6	Nb-0,3 C-0,14 max
A10	ПР-НЮ5	1,0 max	—	Ост.	—	—	1,0 max	Al-4,7
Ж05	ПВ*2-Х25Ю6	Ост.	24,5	—	—	—	—	Al-6,0 C-0,2 max
Ж07	ПВ-Х20Ю6И	Ост.	20,5	—	—	—	—	Al-6,0 Y-0,1

Продолжение табл. 2.9.30

Индекс	Марка порошка	Химический состав, %						
		Fe	Cr	Ni	Cu	Mo	Si	Другие
A01	ПВ-Н70Ю30	0,2 max	—	Ост.	—	—	—	Al-30,5 C-0,07 max
A02	ПВ-Н85Ю15	0,2 max	—	Ост.	—	—	—	Al-18,5 C-0,07 max
A03	ПВ-Н55Т45	0,6 max	—	Ост.	—	—	—	Ti-45 C-0,07 max
A05	ПВ-Т65Ю35	0,2 max	—	Ti Ост.	—	—	—	Al-37,5 C-0,07 max
A06	ПВ-Н75Ю23В	0,2 max	3	Ост.	W 1,0	0,85	Ti 0,4	Co-1,0 C-0,09 max Al-23

\*1 ПР — порошок, распыленный азотом

\*2 ПР — порошок, восстановленный гидридом кальция

- Примечания: 1. Размер частиц порошка: 20—63; 45; 40—100; 90—160; 100—200 мкм.  
 2. Плюсовая фракция — не более 2%.  
 3. Минусовая фракция — не более 5%.  
 4. Область применения: для создания износостойких и коррозионно-стойких покрытий на изделия из стали.  
 6. Методы нанесения покрытий: плазменное напыление, наплавка и припекание с добавкой В и Si в пределах 5%.

**Ионно-вакуумное нанесение покрытий** объединяет методы нанесения покрытий в вакууме, в образовании которых принимают участие ионы формирующих покрытие материалов.

Процесс ионно-вакуумного нанесения покрытий состоит из следующих этапов: получение в рабочей камере вакуума; очистка изделия (подложки) от загрязнений, адсорбированных газов, окислов; создание в камере парогазовой среды, содержащей пары материалов (металлов, неметаллов, сплавов) и газы (инертные или активные);

осаждение парогазовой среды на поверхность изделия, происходящем в форме термического напыления (или конденсации).

Ионы инициируют следующие процессы:

- 1) низкоэнергетическую ионную имплантацию;
- 2) ионное перемешивание материала покрытия;
- 3) образование покрытия за счет массы ионов и нейтральных частиц.

Ионная очистка является обязательной для вакуумной технологии.

До помещения изделия в вакуумную камеру подготавливаемые к напылению поверхности должны очищаться от загрязнений и обезжириваться спиртом, ацетоном, гексаном, бензолом и др. или щелочными растворителями.

При ионной очистке изделие является мишенью, которая испускает частицы под действием удара заряженных или нейтральных частиц тлеющего разряда, энергия которых должна превышать некоторую величину, называемую пороговой энергией распыления  $E_n$  (табл. 2.9.31).

Наибольшее для процесса распыления (очистки) значение  $E_n$  по отрицательному потенциалу подложки -5...6 кВ. При больших энергиях процесс имплантации будет преобладать над процессом распыления.

Существуют оптимальные диапазоны давлений для распыления различных материалов в зависимости от применяемого газа. В процессе очистки постоянно проводятся откачка газа в камере вместе с распыленным материалом подложки и напуск чистого газа. Время очистки 3...10 мин.

### 2.9.31. Пороговая энергия положительных ионов аргона

Распыляемый материал	Пороговая энергия $E_p$ , эВ
Тантал	26
Вольфрам	33
Кобальт	25
Железо	20
Алюминий	13
Титан	20
Хром	20
Никель	21
Молибден	24

Парогазовая среда получается путем смешивания газа и паров различных материалов (или их соединений) в вакуумной камере. Потоки пара и газа способны смешиваться в любой пропорции, что определяет разнообразный состав парогазовой среды. Перевод

исходной твердой фазы вещества в парообразное состояние осуществляется двумя способами: испарения — через жидкую фазу расплава; распыления — минуя жидкую фазу расплава.

Процесс испарения зависит от электрической мощности, подводимой к источнику теплоты (от 0,5 до 200 кВт), температуры и скорости ее достижения (табл. 2.9.32).

Для испарения применяют следующие способы нагрева материала:

с помощью сопротивления (резистивный нагрев) с применением трех типов источников: нить накала, лодочка, тигель; высокочастотным индуктором; путем электронной бомбардировки (рис. 2.9.49.).

Наиболее распространенный способ перевода вещества в парообразное состояние — катодное распыление (рис. 2.9.50). Распыляемый материал — катод. Второй электрод (анод) установлен параллельно мишени на расстоянии в несколько сантиметров. Часто анод служит подложкодержателем. Созданное между электродами электрическое поле вызывает ионизацию газа (обычно аргона) при давлении внутри камеры  $10^{-2} \dots 1$  Па.

### 2.9.32. Рекомендуемые температуры испарения различных материалов для достижения давления насыщенных паров 1,33 Па

Материал	Температура, °C		
	испарения	плавления	кипения
Алюминий	1220	660	2370
Медь	1260	1083	2595
Хром	1400	1845	2508
Никель	1530	1455	2730
Титан	1750	1672	3260
Молибден	2530	2622	4804
Вольфрам	3230	3345	5930
Свинец	715	327	1744
Серебро	1030	960	2212
Золото	1400	1063	2530
Платина	2100	1760	4410
Диоксид кремния	1250	1993	2250
Диоксид алюминия	1800	2320	3250

Одним из способов повышения энергии напыляемых частиц является их ионизация и затем ускорение их в электрическом поле.

Способы получения ионно-вакуумных покрытий из парогазовой среды можно разделить на две основные группы:

1. **Напыление** покрытия из парогазовой среды.
2. **Осаждение**, использующее конденсацию покрытий из парогазовой среды с дополнительным энергетическим воздействием на составляющие парогазовой среды.

*Примеры таких способов:*

вакуумно-дуговой (КИБ-конденсации и ионной обработки), ионное распыление с ускорением заряженных частиц, вакуумное конденсационное напыление с одновременным использованием ионных, электронных, лазерных излучений, воздействующих на парогазовую среду.

Для каждой группы способов характерны свои параметры парогазовой среды:

- плотность потока напыляемых частиц  $N$  [изменяется от  $10^{14}$  до  $10^{24}$  частиц / (см<sup>2</sup> · с)];
- энергия напыляемых частиц  $W$  (изменяется от 0,2...0,5 эВ/атом до 10...20 кэВ/ион);
- степень ионизации напыляемых частиц  $n_i$  (изменяется от 0,02 до 20...30% и более);
- скорость частиц в направлении поверхности напыления (до 2000 м/с и более);
- угол расхождения потока парогазовой среды от источника (колеблется в широких пределах и определяет угловое распределение частиц, влияющее на неравномерность толщины потока).

Плотность и энергия частиц для различных групп ионно-вакуумных способов создания покрытий приведены на рис. 2.9.51.

Область I — способы создания парогазовой среды термическим испарением с конденсацией покрытий из парогазовой среды.

Область II — способы ионного распыления с последующим ускорением заряженных частиц.

Область III — способы высокоскоростного распыления с последующей ионизацией частиц и их ускорением. Одним из преимуществ способов ионно-вакуумного нанесения покрытий является хорошая адгезия их к поверхностям изделия.

На адгезионные свойства влияют совместимость покрытия и основы. Для улучшения адгезии применяется напыление промежуточных подслоев, а также создание между покрытием и основой переходных модифицированных слоев переменного состава и свойств. Чем температура подложки выше (при некоторых способах нанесения может

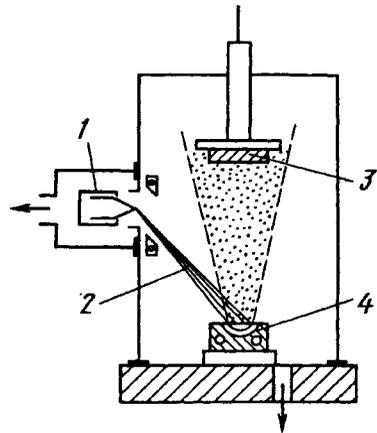


Рис. 2.9.49. Схема испарения материалов с применением электронной бомбардировки: 1 — электронная пушка; 2 — электронный луч; 3 — изделие; 4 — тигель

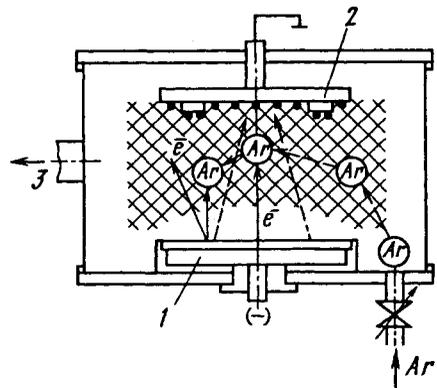


Рис. 2.9.50. Схема катодного распыления: 1 — мишень-катод; 2 — подложка-анод; 3 — откачная система

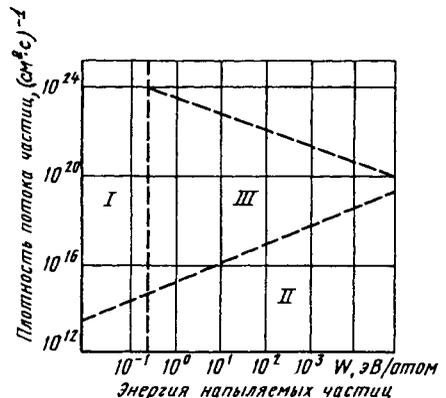


Рис. 2.9.51. Диаграмма распределения плотности потока частиц и энергии для различных групп ионно-вакуумных способов создания покрытий

достигать сотен градусов Цельсия), тем лучше адгезионные связи покрытия за счет диффузии и меньше градиент напряжений между покрытием и основой. Однако чрезмерный нагрев подложки приводит к термическим изменениям, являющимся недопустимыми или вредными для работоспособности изделий (например, из закаленных инструментальных сталей). В этом случае целесообразно применять способы ионно-вакуумного осаждения с использованием ионного высокоэнергетического излучения. Нагрев подложки при этом обычно не превышает нескольких десятков градусов.

Равномерность покрытия по толщине зависит от следующих причин:

- остаточного давления в камере;
- степени ионизации парогазовой среды;
- угла расхождения потока парогазовой среды;

формы источника парогазовой среды.

Когезионные и механические свойства покрытий зависят от их структуры, пористости и других характеристик. Наилучшие когезионные свойства у покрытий, сформированных из парогазовой среды с высокой ионной составляющей, ускоренной в электрическом поле подложки и производящей за счет этого ионное перемешивание покрытий в процессе их нанесения.

Установки для ионно-вакуумного нанесения покрытий представляют собой относительно сложные комплексы, включающие в себя следующие элементы:

- вакуумную систему;
- систему получения парогазовой среды;
- систему нанесения покрытий из парогазовой среды;
- систему для закрепления и осуществления относительного движения подложки и источника образования парогазовой среды;
- систему контроля и управления работой установки;
- систему электропитания;
- вспомогательные устройства и приборы.

Установки для ионно-вакуумного нанесения покрытий бывают периодического, полунепрерывного и непрерывного действия. В установках последнего типа изделие (например, стальная полоса, проволока, лента) непрерывно подается через систему шлюзовых камер в рабочую камеру, где происходит нанесение покрытия, и затем выводится также через систему шлюзов в атмосферу.

Основные модели установок для ионно-вакуумного нанесения покрытий:

типа УВ: периодического действия с испарением за счет резистивного нагрева (УВМ-66, УВ-59, УВ-67, УВН-2М);

типа УЭ: полунепрерывного или непрерывного действия с электроннолучевым испарением материала (УЭ-137, УЭ-175);

типа "Булат" — с электродуговым испарением материала периодического действия (ВУ-1Б, Булат-3Т и др.);

типа УВН — периодического действия с различными способами распыления напыляемого материала (УВН-Р, УВН-75П);

типа ВУП: вакуумный универсальный пост — установки для ионно-вакуумного нанесения покрытий прерывистого действия с резистивным или электронно-лучевым испарением. Основной представитель ВУП-5.

Упрочнение микродуговым окислением. *Микродуговое окисление* (МДО) — метод получения защитных покрытий на имеющих вентильные свойства металлах (алюминии, титане, ниобии, цирконии и др.) путем их электроплазмохимического окисления.

Принципиальная схема МДО представлена на рис. 2.9.52. Технологическая установка состоит из источника технологического тока (ИТТ) 1 и технологической ванны 2, снабженной системами охлаждения 3 и перемешивания электролита 4. Деталь помещается в электролит 6 и закрепляется на токоподводящей шине 5.

При напряжении свыше 400 В переменного (100 В постоянного) и выше тока на поверхности обрабатываемой детали появляются микродуговые разряды, следствием которых является формирование оксидного покрытия. Важным для процесса МДО является электрический режим работы ИТТ. При потенциостатическом режиме (со стабилизированным напряжением) формируются плотные, мелкодисперсные и газонепроницаемые покрытия. При гальваностатическом режиме (со стабилизированным током) покрытия имеют сквозную пористость, обладают повышенной толщиной, износостойкостью и теплоизоляционными свойствами.

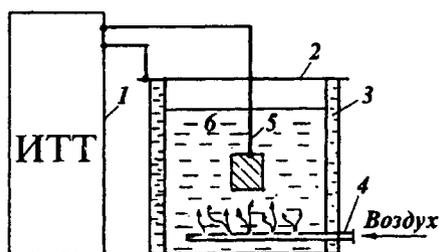


Рис. 2.9.52. Схема микродугового окисления (МДО)

Основные технологические факторы МДО: состав электролита, плотность тока, напряжение и время обработки.

В качестве электролита используются растворимые в воде соли металлосодержащих кислот, такие как алюминат и титан натрия, кремниевокислый калий, хромат калия, молибдат натрия и др.; можно значительно варьировать характеристики получаемых покрытий и их качество. Основным электролитом для МДО является водный раствор технического жидкого натриевого стекла (ГОСТ 13079-93) с плотностью  $1,47 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> и модулем 2,8. Концентрация жидкого стекла варьируется от 1 до 500 г/л. Введение добавок гидроксидов щелочных металлов (калия, натрия) с концентрацией от 1 до 5 г/л способствует увеличению микротвердости покрытия.

Время обработки (от 15 до 200 мин) выбирается в зависимости от требуемой толщины покрытия, обрабатываемого материала, плотности тока, состава и концентрации электролита.

Плотность тока назначают в диапазоне от 1 до 50 А/дм<sup>2</sup> в зависимости от требований, предъявляемых к покрытию.

Покрытия, сформированные на алюминиевой основе, являются наиболее плотными и содержат максимальное количество оксида алюминия (керамики), обладающей универсальными эксплуатационными свойствами. Лучшей способностью к оксидированию обладают чистый алюминий и сплавы Д16, Д16Т, АК6, АМг и др. Сплавы других металлов используются для получения покрытий со специальными свойствами: Ti, Nb — коррозионными, Zr, V — жаростойкими.

МДО-покрытия могут быть нанесены и на стальные детали. В этом случае на упрочняемые поверхности напыляют Al с последующим преобразованием его в МДО-покрытие.

Физико-механические характеристики покрытия МДО-покрытия на основе оксида алюминия.

1. Высокая адгезия покрытия (более 350 МПа).

2. Поликристаллическая структура представляет собой композиционный материал, сочетающий относительную пластичность матрицы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  с высокой твердостью встроенных в нее включений  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

3. МДО-покрытие имеет микротвердость 12-20 ГПа.

4. Износостойкость МДО-покрытий превышает износостойкость карбида вольфрама (рис. 2.9.53).

5. В отличие от напыленной керамики МДО-покрытие имеет повышенную пластичность.

6. Упрочненный слой жаростоек, так как представляет собой оплавленную поликристаллическую структуру оксида алюминия.

7. Толщина МДО-покрытий 50-300 мкм.

8. Удельное электросопротивление  $2 \cdot 10^{14}$  Ом·м.

МДО может применяться в различных областях промышленности с целью получения износостойких, коррозионно-стойких, диэлектрических, теплостойких, эрозионно-стойких, химически стойких и декоративных покрытий, в том числе за счет замены цветных сплавов, коррозионно-стойких и жаростойких сталей и других дефицитных материалов (табл. 2.9.33).

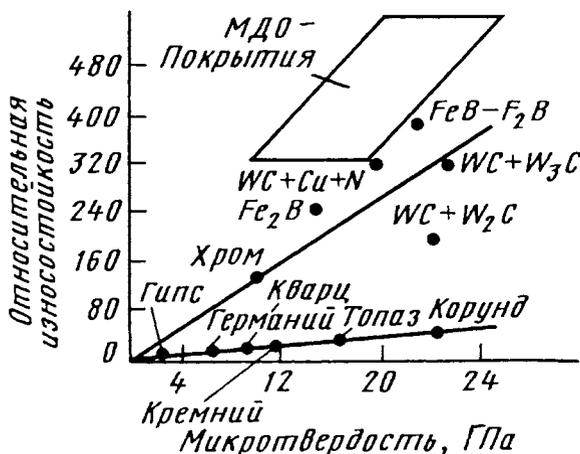


Рис. 2.9.53. Диаграмма относительной износостойкости материалов по отношению к износостойкости оловянно-свинцового сплава.

## 2.9.33. Области возможного применения МДО-покрытий

Отрасль промышленности	Изделие	Назначение и вид покрытия
Автомобилестроение	Поршень и гильза ДВС Кольца уплотняющие	Теплоизоляционное, износостойкое Износостойкое
Газонефтяная и угольная промышленность	Рабочие колеса, втулки, детали буровых насосов и запорной арматуры	Износостойкое, коррозионно-стойкое
Электротехника	Детали электроаппаратуры, сварочного оборудования	Электроизоляционное, теплостойкое
Радиотехника и электроника	Подложки и изолирующие слои	Электроизоляционное
Легкая промышленность	Фильтры прядильных машин, нитеводители чулочных автоматов	Износостойкое
Медицина	Хирургические инструменты	Коррозионно-стойкое, износостойкое, режущие кромки
Строительство	Декоративно-отделочные материалы	Декоративное
Энергетика, машиностроение	Лопатки турбин, формы для литья деталей, подшипники Детали погружных насосов Рубашки термопар	Износостойкое, жаростойкое Износостойкое, коррозионно-стойкое Теплостойкое

Технологический процесс подготовки деталей перед МДО включает в себя:

- 1) механическую обработку обрабатываемой поверхности до  $Ra=1,25\pm 3$  мкм;
- 2) химическое обезжиривание;
- 3) изоляцию необрабатываемых участков.

Предварительное пластическое деформирование поверхности увеличивает микротвердость покрытия. В этом случае формируются покрытия с повышенным содержанием фазы  $\alpha - Al_2O_3$ , имеющей увеличенную микротвердость и износостойкость. Время обработки уменьшается на 20-30%, по сравнению с обычным МДО.

**Упрочнение импульсной магнитной обработкой.** Сущность импульсного магнитного упрочнения заключается в том, что деталь перед обработкой помещают в полость солевого раствора, соединенного с возбудителем импульсов.

Эффект упрочнения импульсной магнитной обработкой определяется режимами

упрочнения: напряженностью магнитного поля, количеством импульсов, продолжительностью, амплитудой импульсов.

Под действием магнитного поля в металле происходит образование новых субзерен, количество которых зависит от размеров зерен исходной структуры и величины напряженности магнитного поля. Одновременно происходит уменьшение поверхностной энергии в субграницах и перераспределение дислокационной структуры: часть дислокации равномерно распределяется по объему зерна, а часть скапливается на границах.

Структура упрочненного слоя характеризуется высокой дисперсностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками.

*Импульсная магнитная обработка (ИМО)* наиболее эффективна после термической обработки стали со структурой мартенсита, троостита, и мало эффективна для сталей со структурой сорбита, зернистого перлита.

Методы импульсной магнитной обработки материалов различны как по своим

физическим и технологическим принципам, так и по конструктивным исполнениям установок.

Методы импульсной магнитной обработки деталей целесообразно классифицировать следующим образом:

обработка переменным магнитным полем напряженностью 100...150 кА/м с частотой 8...10 Гц при продолжительности воздействия 5...300 с;

обработка полем напряженностью 300...1500 кА/м с количеством импульсов 5...10 при длительности импульса 0,1...1 с.

Установки для ИМО различаются конструктивно, величиной напряженности магнитного поля, назначением. Они создают магнитное поле напряженностью 50...2000 кА/м при максимальной силе тока в соленоиде 50...2000 А и мощности до 200 кВт.

Время обработки импульсным магнитным полем определяет конечную цель упрочнения: если требуется мелкодисперсная структура с высокой плотностью дислокаций и величиной микронапряжений, обладающая высокой износостойкостью, то необходима начальная стадия обработки продолжительно-

стью 10 с при напряженности магнитного поля 100...150 кА/м и частоте 8...10 Гц или 5...10 импульсами при длительности импульса 0,1—1с при напряженности магнитного поля 500...1500 кА/м. Если требуется направленная структура металла, то продолжительность обработки следует увеличить до 30 с.

Импульсную магнитную обработку применяют для упрочнения различных деталей, конструкций и сборочных единиц (табл. 2.9.34).

#### 2.9.7. КОМБИНИРОВАННОЕ УПРОЧНЕНИЕ

Деформационно-термическое упрочнение (ДТУ) основано на сочетании в единой технологической цепочке пластической деформации и термической обработки. В промышленности нашли применения следующие схемы ДТУ.

*Схема 1*— высокотемпературная термомеханическая обработка с закалкой на мартенсит (ВТМО) и отпуском или ВТМО поверхностных слоев деталей с последующим упрочнением поверхности обкатыванием роликами или дробью.

#### 2.9.34. Рекомендуемые режимы импульсной магнитной обработки

Тип детали	Материал	Режимы импульсной магнитной обработки			Относительная износостойкость детали, %
		Напряженность поля, кА/м	Длительность импульса, с	Количество импульсов	
Сверла, метчики, зенкеры, развертки, фрезы	P18, P12, P9, P6M5, P5K6	80—400	0,3—1,0	5—10	110—200
Резцы	BK6, BK3, T15K6	400—800	0,2—1,5	5—10	115—180
Пилы	У8, У12, BK3	350—600	0,2—0,5	5—8	120—220
Штампы	X12Ф1, 5ХНВ, 6ХВ2С	200—800	0,2—1,0	2—5	120—180
Зубчатые колеса	Сталь, медь	300—650 800—1500	0,2—0,6 0,5—1,0	2—10	120—200 120—150
Тросы, канаты	Сталь	160—200	0,5—1,0	2—5	130—200
Пильчатая лента	Сталь	80—300	0,1—1,0	5—10	200—300

Упрочнение ВТМО (с деформацией прокаткой) с последующим обкатыванием роликами увеличивает предел выносливости пальцев траков диаметром 30 мм с 1200...1300 МПа до 1400...1650 МПа по сравнению с пальцами, упрочненными высоким отпуском и обкатыванием.

Для упрочнения пальцев траков созданы высокопроизводительные автоматические линии.

На линии проводится нагрев вала до температуры аустенизации, последующая деформация кручением с одновременным осевым растяжением и немедленная заковка в масле.

**Схема 2** — термомеханическая (ВТМО с деформацией прокаткой или закручиванием) или обычная термическая обработка (заковка на мартенсит) и отпуск, упрочнение обкатыванием роликами и последующий отпуск.

Использование кручения в качестве деформации при ВТМО создает направленное упрочнение деталей, эффект от которого наблюдается лишь в случае совпадения направления закручивания деталей при горячей деформации и при эксплуатации.

Например, для повышения циклической долговечности в несколько раз по сравнению с традиционной обработкой закалкой, отпуском и упрочнением обкатыванием, валки из стали 45ХН2МФА-Ш диаметром 35...55 мм, длиной 1000...2400 мм, обрабатывали по режиму: сквозной нагрев токами высокой частоты до температуры  $(920 \pm 20)^\circ\text{C}$ , одноразовое закручивание на угол  $(2160 \dots 1800) \pm 90^\circ\text{C}$ , последеформационная выдержка порядка 15-30 с, охлаждение в масле, низкий отпуск, обкатывание и отпуск.

Упрочнение в процессе отпуска после обкатывания роликами стали с мартенситной структурой обусловлено в основном уменьшением локальных микронапряжений вблизи

структурных концентраторов в той зоне слоя, где зарождается очаг усталостного разрушения. Остаточные сжимающие напряжения, твердость в упрочненном обкатыванием слое после отпуска несколько снижаются.

Упрочнение по указанной схеме повышает предел выносливости и ограниченной долговечности деталей, работающих на изгиб. Для осуществления ВТМО кручением валков создана автоматическая линия.

**Схема 3** — заковка на мартенсит, низкий отпуск, деформационное старение мартенсита (ДСМ), упрочнение обкатыванием.

Деформационное старение мартенсита повышает предел текучести на 40-50%. Оптимальный эффект от использования ДСМ получен при степенях деформации 0,4—10%.

Для деформации закаленных и низкоотпущенных валов (51...57HRC<sub>3</sub>) диаметром 28...53 мм и длиной 600—2400 мм применен метод холодного продольного раскатывания (А.С. № 55780).

Раскатывание стержня и галтелей вала осуществляется двумя неприводными роликами с ручьями, охватывающими вал двумя секторами. Цикл раскатывания включает (рис. 2.9.54) проталкивание вала 2 между роликами 1, разведение роликов, поворот вала на заданный угол, холостой ход назад. Цикл проводят с программой поворотов на угол: 0; 90; 45; 90; 67,5; 90; 45; 90°.

Оптимальная степень деформации раскатыванием валков из сталей 45ХН2МФА и 45ХН2МФА-Ш составляет 0,4...0,6% (по удлинению вала); последеформационный отпуск проводят при температуре 140...160°С с выдержкой 3 ч (рис. 2.9.55).

Упрочнение деталей по указанной выше схеме, включающей ДСМ, обеспечивает повышение упругих свойств: предел пропорциональности увеличивается с 930 до 1120 МПа, предел текучести с 1260 до 1430 МПа, практически без изменения пластичности.

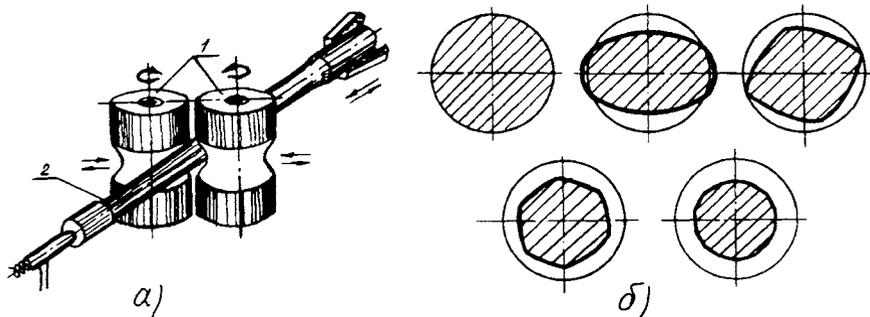


Рис. 2.9.54. Схема процесса холодной упрочняющей продольной раскатки (а) и изменение профиля вала при раскатке (б)

Для раскатывания торсионных валов созданы специализированные упрочняющие станки-полуавтоматы ПР-140 (А.С. 553033, 560688, 738736).

**Схема 4** — закалка, отпуск, обкатывание роликами, пластическое деформирование деталей кручением, длительное выдерживание под нагрузкой при рабочей температуре.

Указанная схема применяется для упрочнения валиков, работающих при постоянно действующей нагрузке кручения при повышенной температуре.

Технология упрочнения включает в себя закручивание на угол, превышающий предел текучести материала на 50%, при рабочей температуре 130...150 °С.

Валы, упрочненные по указанной схеме, имеют более высокую релаксационную стойкость по сравнению с другими схемами упрочнения. Для упрочнения деталей по ука-

занной схеме разработан специальный стенд.

**Схема 5** — обработка на структуру низкоотпущенного мартенсита (закалка, низкий отпуск или ВТМО, низкий отпуск), заневоливание, обкатывание. Последние две операции могут выполняться в различной последовательности и сочетаниях.

Заневоливание применяется для повышения упругих свойств пружин, рессорных валиков, карданных валов и др.

Необходимо строго соблюдать направление закручивания при заневоливании и эксплуатации деталей.

В случае совпадения направления деформации при упрочнении и эксплуатации происходит снижение суммарных напряжений от приложенных упругих напряжений при эксплуатации на величину остаточных касательных напряжений, так как они направлены в противоположную сторону.

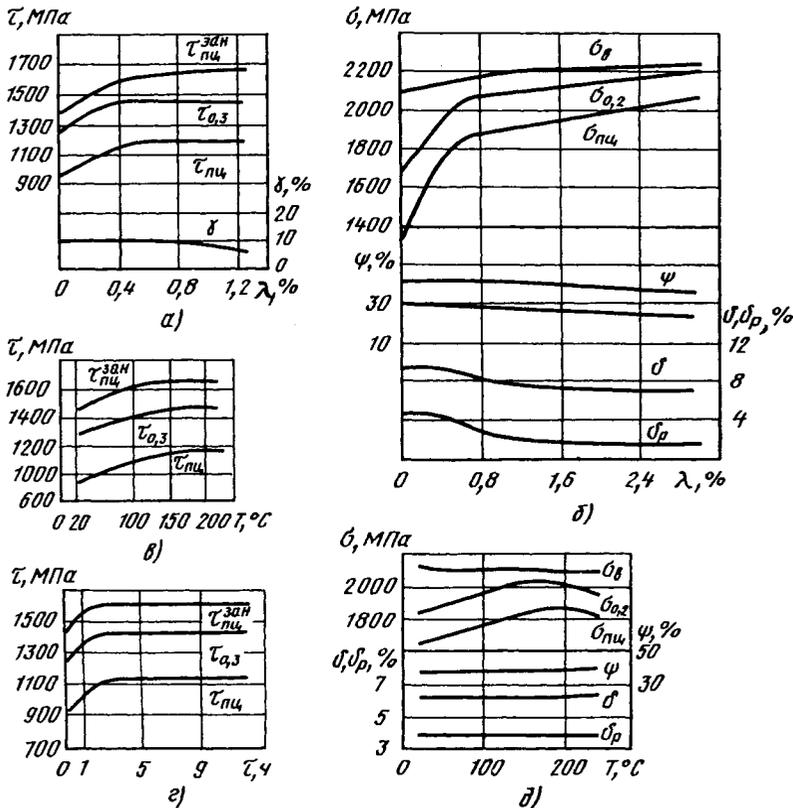


Рис. 2.9.55. Влияние степени деформации при раскатывании (а, б), температуры (в, д) и времени выдержки при отпуске (е) после деформации ( $\lambda=0,5\%$ ) на свойства торсионных валов (а, в, г) и образцов (б, д).

Сталь 45ХН2МФА-Ш. Закалка, отпуск 220 °С, раскатывание, отпуск (а, б —  $T_{\text{отп}} = 150$  °С)

Степень деформации при заневоливании оценивают коэффициентом заневоливания  $K$ , равным отношению угла при пределе пропорциональности до упрочнения к углу заневоливания.

Упрочнение заневоливанием повышает упругие свойства торсионов на 40–60%; сопротивление усталости повышается на 10–20%.

Одновременное повышение упругих свойств и сопротивления усталости достигается комбинированным упрочнением, заневоливанием и обкатыванием. Наибольший эффект получается при упрочнении в последовательности: заневоливание, обкатывание, заневоливание (А. с. 1488330). В этом случае в поверхностных слоях одновременно создаются наибольшие по величине остаточные касательные и сжимающие нормальные напряжения (табл. 2.9.35).

Упрочнение в последовательности: заневоливание, обкатывание, заневоливание — увеличивает упругие свойства торсионных валов с 850–900 МПа до 1300–1420 МПа. Ограниченная циклическая долговечность валов составляет 500–800 тыс. циклов при максимальных напряжениях цикла 1300–1420 МПа.

Использование термомеханической обработки с деформацией кручением вместо обычной закалки и низкого отпуска в указанной схеме упрочнения обеспечивает дополнительное повышение пластичности при кручении деталей на 20...30 % при одновременном увеличении сопротивления усталости (рис. 2.9.56).

Схема 6 — закалка или ТМО (кручением), отпуск, деформационное старение мартенсита (раскатывание, отпуск), заневоливание, обкатывание роликами, заневоливание (А. с. 559973, 1135780, 1355635, 1013501).

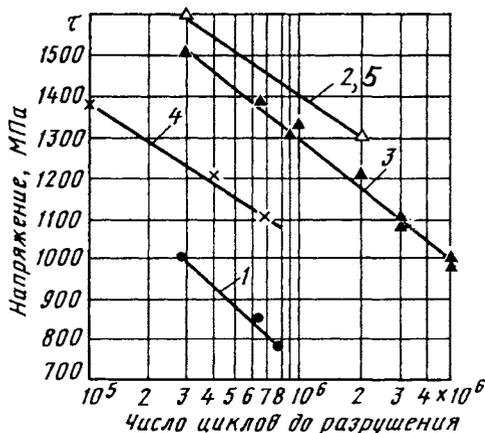


Рис. 2.9.56. Усталостные кривые валов, упрочненных по схемам:

закалка, отпуск, обкатывание, заневоливание (1, 4), закалка, отпуск, заневоливание, обкатывание, заневоливание (3), ТМО кручением, отпуск, заневоливание, обкатывание, заневоливание (2), сталь 45ХН2МФА-Ш, отпуск 200–220 °С (3, 4, 5), отпуск 470 °С (1)

### 2.9.35. Изменение упругих свойств и предела выносливости в зависимости от схемы упрочнения

Схема упрочнения	Повышение, %		Остаточные напряжения, МПа	
	Упругих свойств	Предела выносливости	Нормальные	Касательные
Обкатывание роликом, ( $P = 2,8$ кН)	0	52	750	0
Заневоливание ( $K = 0,5$ )	40	20	0	180
Обкатывание ( $P = 2,8$ кН), заневоливание ( $K = 0,5$ )	49	57	500	175
Заневоливание ( $K = 0,5$ ), обкатывание ( $P = 2,8$ кН) <sup>^</sup>	11	68	900	120 *
Заневоливание ( $K = 0,5$ ), обкатывание ( $P = 2,8$ кН), заневоливание ( $K = 0,5$ )	56	73	910	220

\* Другое направление

В указанных схемах упрочнения используется удачное сочетание ориентированности упрочнения горячей деформацией кручением с последующим холодным упрочнением заневоливанием (кручением). Дополнительное упрочнение материала обеспечивается за счет упрочнения при ДСМ. Для предотвращения обезуглероживания деталей при высокотемпературном нагреве применен нагрев ТВЧ. Повышенная пластичность и упрочняемость материала при ТМО обеспечивается совокупностью структурных изменений, связанных с протеканием полигонизационных процессов и фрагментацией структуры, дроблением мартенситных пакетов и пластин, уменьшением напряженности структуры за счет перестройки дислокаций и выделением мелкодисперсных карбидов.

Валы, упрочненные по указанной выше схеме, работают в упругой области до максимальных рабочих напряжений 1480...1570 МПа, обеспечивая высокую циклическую долговечность ( $N$ ) при испытании ( $\tau_{\max} - \tau_{\min} = 372$  МПа) по различным режимам (табл. 2.9.36).

Для упрочнения валов по указанной схеме созданы линии, включающие станки для продольного холодного раскатывания валов при обработке ДСМ, станки для упрочнения стержня, галтелей и шлицевых головок, стенд для заневоливания, а также автоматическая линия для обработки ТМО кручением.

**Комбинированное упрочнение нанесением покрытий и ППД.** Покрытия, применяемые при комбинированной обработке, можно разделить на следующие группы.

1. Металлические тонкие пленки из мягких материалов: золото, серебро, медь, кадмий, цинк и др., наносимые химическими, гальваническими, электрохимическими способами.

2. Покрытия со сложной структурой: дисульфиды, диселениды молибдена, вольфрама, ниобия; тантала и др. Из покрытий этой группы наибольшее применение получил порошок дисульфида молибдена, который наносят на трущиеся поверхности как в чистом виде, так и со связующими.

3. Твердые металлические покрытия (твердость HV 3000 — 9000 МПа): хромовые, никелевые и др., наносимые гальваническим, электрохимическим и гальваномеханическим способами.

4. Тонкие покрытия из металлокерамических сплавов, соединений из тугоплавких металлов и других различных материалов и др., осаждаемые такими методами как электроискровое легирование, конденсация вещества из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки, детонационное и др.

5. Тонкие твердые покрытия на деталях из титановых сплавов, формируемые за счет газонасыщения титана кислородом, азотом и парами воды.

Вместе с тем покрытия, повышая одни служебные свойства, в ряде случаев могут снижать другие, нередко более важные эксплуатационные характеристики деталей (снижение предела выносливости, растрескивания, наводороживания, образование растягивающих остаточных напряжений и др.)

Наиболее целесообразным методом устранения указанных недостатков является алмазное выглаживание, которое в зависимости от требований эксплуатации выполняется по следующим схемам:

- а) выглаживание + покрытие, вибро-выглаживание + покрытие;
- б) выглаживание + покрытие + выглаживание;
- в) покрытие + выглаживание + термообработка;
- г) покрытие + выглаживание или вибро-выглаживание;
- д) термообработка + выглаживание или вибровыглаживание.

Выглаживание твердых покрытий формирует густую сетку коротких микротрещин, имеющих перекрытие по толщине покрытия, что препятствует проникновению корродирующих веществ через каналы покрытия к основному металлу. При ППД покрытий повышается на 10—50 % микротвердость покрытия и основы; увеличивается в 2-4 раза прочности сцепления покрытия с основой; формируются сжимающие остаточные напряжения, снижается в 2-8 раз шероховатость поверхности, сглаживаются различные выступы, в частности, капельная фаза покрытий, осаждаемых в вакууме; вскрываются пороки пред-

2.9.36. Долговечность деталей, упрочненных по схеме б

$\tau_{\max}$ , МПа	$N$ , тыс. циклов
1470	400
1545	290
1470	462
1300	2000

шествующей обработки, раковины, углубления и др. (табл. 2.9.37).

Резервом повышения прочности и других характеристик поверхностных слоев является многослойное легирование. Наиболее прочные слои получаются при нанесении электроэрозионным методом многослойных композиций легирующими электродами, образующими с подложкой и между собой системы с неограниченной растворимостью, а также системы с карбидным упрочнением, в которых промежуточным электродом является

металлокерамика или карбиды переходных металлов. Выглаживание таких покрытий позволяет снижать шероховатость после легирования в 5-9 раз. Чем ниже твердость наносимого слоя и выше твердость подложки, тем ниже шероховатость поверхности после выглаживания. При выглаживании твердых покрытий, нанесенных на мягкую подложку, возможно вдавливание частиц покрытия в металл, в ряде случаев наблюдается снижение твердости покрытий (табл. 2.9.38).

### 2.9.37. Изменение параметров поверхностного слоя гальванических покрытий после выглаживания

Покрытие	$R_y$ , Н	$R_{сф}$ , мм	$Ra_{выг}$ , мкм	$H_{исх}$ , МПа	$H_{выг}$ , МПа
Хром	120 — 180	1,2 — 1,8	0,04 — 0,12	8800	11000
Никель	120 — 180	2,5 — 3,5	0,04 — 0,08	2300 — 3000	3000 — 3800
Никель (Т/О = 600 °С)	150 — 180	1,5 — 1,8	0,04 — 0,12	8800	11200
Кадмий	30 — 50	3,5 — 5	0,04	40	40 — 60
Серебро	100 — 120	3 — 5	0,04	100	115 — 120

Примечание: Толщина покрытия  $h_n = 30...40$  мкм,  $Ra_{исх} = 0,32...0,63$  мкм.

### 2.9.38. Изменение параметров поверхностного слоя электроэрозионных покрытий после алмазного выглаживания

Материал подложки и ее микротвердость, МПа	Легирующий электрод	$Ra_n$	$Ra_d$	$Ra_b$	$H_n$	$H_b$	Р, Н
		мкм			МПа		
Х12М ( $H_n = 7200$ )	ВК6-М	0,63	1,48	0,15	9200	9350	600
	Та	0,63	1,63	0,1	7900	7900	1000
	Мо	0,63	1,32	0,1	7450	7550	1000
	$N_{вс}$ Мо, ВК6-М	0,63	1,15	0,2	6700	8300	1000
	ВК6М, БраЖМц	0,63	1,72	0,1	5250	6350	1000
ВТ20 ( $H_n = 3856$ )	ВК6-М	0,52	1,60	0,25	6650	6850	100
	Та	0,46	1,93	0,40	10305	6950	500
	Мо	0,48	2,03	0,35	8850	7050	400
	Al	0,65	1,26	0,25	8850	6300	500
	$N_b$	0,45	1,94	0,34	6650	6350	600
	$N_{вс}$	0,48	0,79	0,1	8850	5450	1000
	$N_b, W, Cr, Mo$	0,71	1,93	0,3	5850	4600	1000
	Td, Hf, Al	0,49	2,07	0,4	9050	7450	1000

Примечание:  $Ra_n$ ,  $Ra_d$ ,  $Ra_b$  — шероховатость исходной легированной и выглаженной поверхностей соответственно;  $H_n$ ,  $H_d$ ,  $H_b$  — микротвердость соответственно исходной, легированной и выглаженной поверхностей; Р — механическая прочность легированного слоя, оцениваемая величиной нормальной нагрузки, при которой происходит разрушение легированного слоя при скольжении сферического алмазного индентора.

Алмазное выглаживание повышает прочность сцепления покрытия с основой (табл. 2.9.39).

Для расширения технологических возможностей процесса алмазного выглаживания находят применение его различные кинематические разновидности (рис. 2.9.57).

В отличие от сглаживающей обработки скользящим индентором поверхность в этом случае формируется в виде системы микроканалов разной конфигурации, или чередующихся лунок. Варьирование форм, размеров и расположения микровыступов и микровпадин достигается изменением частоты вращения детали  $n$ , подачи инструмента  $S$ , амплитуды и частоты его колебаний  $f$ , силы выглаживания  $P_y$ , размеров и формы рабочей части выглаживателя.

Форма канавок и их относительное расположение, виды рисунков могут быть определены на основе кинематического анализа взаимного перемещения обрабатываемой детали и инструмента.

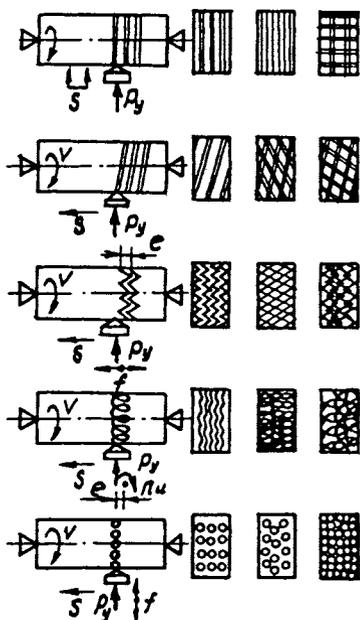


Рис. 2.9.57. Схемы вибровыглаживания и виды рельефа поверхности

### 2.9.39. Прочность сцепления покрытия с основой

Материал покрытия (толщина $\delta$ )	Шероховатость основы, $R_a$ , мкм	Без обра- ботки	Напряжение отрыва покрытия, МПа			
			Виброобкатывание с усилием, Н		Алмазное выглажи- вание с усилием, Н	
			100	200	50	100
MoS <sub>2</sub> ( $\delta = 30$ мкм)	2,5	3,2	18,2	31,6	—	—
	1,25	4,5	24,3	33,2	22,8	30,6
	0,8	3,8	23,0	32,8	22,0	29,1
	0,63	3,3	18,5	31,9	21,2	28,5
Цинк ( $\delta = 21$ мкм)	2,4	42,5	262,3	448,6	—	—
	1,25	44,6	271,5	452,5	262,4	438,0
	0,83	39,3	246,8	415,2	238,6	402,8
	0,63	37,2	235,6	395,8	217,5	390,3
Кадмий ( $\delta = 21$ мкм)	1,25	9,6	59,5	88,3	35,4	82,6
	0,83	9	53,7	85,7	49,5	76,2
	0,63	8,3	50,8	76,8	45,8	70,4
Серебро ( $\delta = 6$ мкм)	1,25	48,5	280,2	—	273,5	—
	0,8	56,8	312,2	—	305,6	—
	0,63	54,2	311,5	—	298,4	—
	0,32	50,7	305,7	—	290,4	—
Хром ( $\delta = 50$ мкм)	1,25	224	—	438	—	418
	0,8	284	—	569	—	534
	0,63	307	—	625	—	612
	0,3	320	—	648	—	635

Примечание. Материал основы сталь 30ХГСН2А; радиус инструмента 2,5 — 3,5 мм для обработки мягких покрытий и 1,5—2 мм для обработки твердых покрытий

Одним из важных элементов рельефа наряду с глубиной  $h_k$ , шириной канавок  $b$  и шага между ними  $t$  является размер наплывов и их высота  $h_n$  (рис. 2.9.58). Регулируя параметр  $h_n$  можно в определенных пределах изменить размер детали, а также воздействовать на некоторые такие эксплуатационные свойства сопряжений, как стабильность коэффициента трения, гидроплотность, износостойкость и повреждаемость в условиях вибрационного проскальзывания.

Параметры микрорельефа, наносимого на рабочие поверхности деталей из высокопрочных материалов с покрытиями, имеют следующие значения:  $h_n = 10 \dots 13$  мкм,  $h_k = 6 \dots 8$  мкм,  $b = 0,3$  мм (индентор  $R_{сф} = 0,5$  мм, нагрузка  $P = 300 \dots 400$  Н).

#### Электроконтактное припекание покрытий.

Процесс припекания обеспечивается совместным действием на порошок слой высокой температуры ( $0,9 \dots 0,95$  температуры плавления порошка) и давления (до 100 МПа). В кинетике образования металлического покрытия принимают участие как бездиффузионные явления схватывания, так и диффузионные процессы спекания и сварки в твердой фазе. Электронагрев металлического порошка, засыпаемого между деталью и электродом, происходит за счет тепловой энергии, выделяемой электрическим током на активном сопротивлении.

Нанесенные электроконтактным методом покрытия обладают достаточно высокой прочностью сцепления с основой и низкой пористостью, причем наличие окисных пленок на поверхности порошка или детали практически не сказывается на прочности сцепления, так как пленка имеет наиболее высокое электрическое сопротивление и интенсивно нагревается импульсами тока с последующим удалением из зоны соединения. По сравнению с другими методами нанесения порошковых покрытий процессы электроконтактного упрочнения имеют ряд преимуществ: высокую производительность и низкую электроемкость, минимальную зону термического влияния, возможность получения необходимой геометрической формы детали без последующей механической обработки. Они обеспечивают лучшие санитарно-гигиенические условия труда ввиду отсутствия светового излучения и газовой выделений и являются предпочтительными с экономической точки зрения.

Интенсивное силовое воздействие и высокая скорость нагрева порошкового слоя при электроконтактном припекании позволяют отказаться от применения химических активаторов и снизить необходимое время для осуществления процесса приблизительно на 2 порядка по сравнению, например с индукционным способом нанесения покрытий.

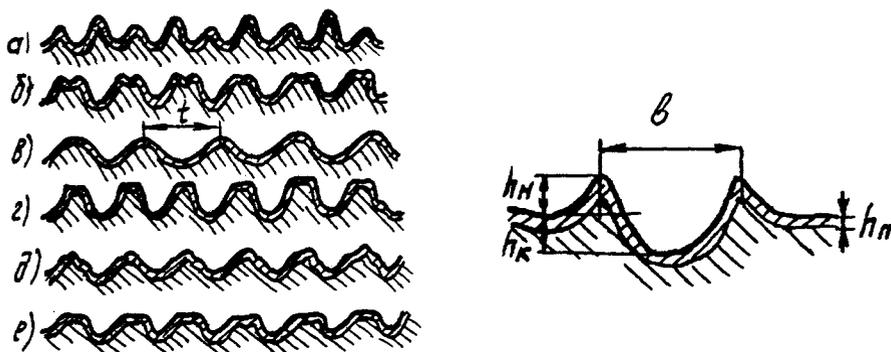


Рис. 2.9.58. Профилограммы виброобработанных поверхностей на разных режимах (а-с) с последующей осадкой профиля сферическим (д) и цилиндрическим (е) индентором

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. М.: Машиностроение. 1974. 134 с.
2. Бабичев А.П., Рысева Т.Н., Самадуров В.А., Тамаркин М.А. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки. М.: Машиностроение. 1988. 65 с.
3. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение. 1978. 184 с.
4. Беринг Р. Распыление тел ионной бомбардировкой. М.: Мир, 1984. 184 с.
5. Бернштейн М.Л., Зайковский В.А., Капуткина М.Л. Термомеханическая обработка стали. М.: Металлургия. 1983. 480 с.
6. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А., Хворостухин Л.А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М.: Машиностроение. 1991. 144 с.
7. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. М.: Машиностроение, 1975. 160 с.
8. Брондз Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. М.: Машиностроение. 1986. 184 с.
9. Васильев А.С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. Л.: Машиностроение. 1979. 87 с.
10. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. М.: Машиностроение, 1987. 304 с.
11. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение: 1989. 304с.
12. Грипченко И.Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1971. 120 с.
13. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: Справочник термиста /Л.Е.Попова, А.А. Попов. 3-е изд. М.: Металлургия. 1991. 503 с.
14. Дигам М.С., Шалай А.Н., Попченко Ю.А. Перспективы применения электроискрового легирования для повышения долговечности деталей ДВС, изготовленных из алюминиевых сплавов // Двигателестроение. 1988. № 10.С.19-23.
15. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат. 1987. 184 с.
16. Другов П.Н., Яковлев С.И., Кравецкий Г.А. Микродуговой электролиз на углеродных материалах: Обзорная информация ЦНИИЦВЕТМЕТ экономики и информации. М. 1991. 12 с.
17. Заваров А.С., Баскаков А.П., Грачев С.В. Химико-термическая обработка в кипящем слое. М.: Машиностроение, 1985. 159 с.
18. Кальнер В.Д., Юрасов С.А. Современные методы цементации и нитроцементации. М.: Машиностроение. 1987. 65 с.
19. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., Подчерняева И.И. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М.: Наука. 1986. 276 с.
20. Коваленко В.С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. 176 с.
21. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учебник для вузов. М.: Металлургия. 1986. 688 с.
22. Конструкционные материалы: Справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение. 1990. 688с.
23. Кострицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. М.: Машиностроение. 1987. 208 с.
24. Кудрявцев И.В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин. М.: Машиностроение. 1969. 100 с.
25. Кудрявцев И.В., Науменко Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. М.: Машиностроение. 1981. 237с.
26. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение. 1992. 304 с.
27. Кургузов Ю.И., Папшев Д.Д. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щетками // Вестник машиностроения. 1986. №4. С. 54-58.
28. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.П. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985, 236 с.
29. Мальгин Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М.: Машиностроение, 1989. 112с.
30. Митин Б.С. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М.: Металлургия. 1987. 792 с.
31. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками./ Под общей редакцией Дж.М. Поута и др.; Под ред. Углова А.А. М.: Машиностроение. 1987.424с.

32. **Одинцов Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение. 1987. 328 с.
33. **Олейник Н.В., Клычин В.П., Луговский А.Л.** Поверхностные динамические упрочнение деталей машин. Киев. Техника. 1984. 150с.
34. **Перепичка Е.В.** Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. М.: Машиностроение. 1989. 134 с.
35. **Петросов В.В.** Гидроробуструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение. 1977. 166 с.
36. **Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением/Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, И.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков.** М.: Машиностроение. 1988. 144 с.
37. **Полевой С.Н., Евдокимов В.Д.** Упрочнение металлов. М. Машиностроение. 1986. 312 с.
38. **Проскураков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н.** Объемное дорнование отверстий М.: Машиностроение. 1984. 224 с.
39. **Полетаев В.А. Третьякова Н.В.** Износ зубьев пильчатой гарнитуры чесальных машин. // Трение и износ. 1996. Т.17. №2 С.230-234.
40. **Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К.** Физические основы пластической деформации: Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия. 1982. 584 с.
41. **Розенберг О.А.** Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. Киев: Наук. думка. 1981.288 с.
42. **Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н.** Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
43. **Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М.** Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. М.: Машиностроение, 1985. 152 с.
44. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования. М.: Объединение "МАШМИР", 1992. 60 с.
45. **Справочник по технологии лазерной обработки / В.С. Коваленко, В.П. Котляров, В.П. Дятел и др.** Под общ. ред. В.С. Коваленко. Киев. Техника. 1985. 167 с.
46. **Сысоева В.С., Маслова Н.С., Чумак Г.А.** Высоконагруженные торсионные валы гусеничных машин. М.: ЦНИИ Информации. 1980, 152 с.
47. **Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта.** М.: Машиностроение 1980. 783 с.
48. **Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.Д. Дальский и др.;** Под общ. ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение. 1990. 256 с.
49. **Тушинский Л.И.** Теория и технология упрочнения металлических сплавов. Новосибирск: Наука. 1990. 301с.
50. **Тылкин М.А.** Газопламенная закалка металлургического оборудования. Металловедение и термическая обработка стали. М.: Металлургия. 1983, Т. 111, с 204-212.
51. **Углов А.А.** Современные методы расчета тепловых процессов при сварке. М.: Машиностроение. 1988. 50с.
52. **Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / Под ред. Л.С. Ляховича.** М.: Металлургия. 1981. 424с.
53. **Хирвонен Дж.К.** Ионная имплантация. М.: Металлургия. 1985. 392с.
54. **Хасуй А.** Техника напыления / Пер. с японского. М.: Машиностроение, 1975. 287 с.
55. **Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И.** Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Л.: Химия. 1991. 128 с.
56. **Шаповалов А.Н., Бодажков В.А.** Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л.: Машиностроение, 1974. 280 с.
57. **Шепеляковский К.З.** Объемно-поверхностная закалка как способ повышения прочности, надежности и долговечности деталей машин // Металловедение и термическая обработка металлов. 1995. №11. С 2-9.
58. **Шнейдер Ю.Г.** Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. 2-е изд. перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1982. 248 с.
59. **Schiller S., Panzer S.** Thermal surface Modification bu HF-deflected Electron Beam, Proc. Intern. Conf. "The Laser vs tne Electron Beam in Welding, Cutting and Surface Treatment, Reno, Nevada/USA, Nov. 1985,15 p.
60. **Ярошевич В.К., Генкин Я.С., Верещагин В.А.** Электроконтактное упрочнение. М.: Наука и техника. 1982. 256 с.

## Глава 2.10

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Понятие метод обработки включает в себя все элементы технологической системы, порядок и режимы ее работы.

Новизна методов обработки определяется всеми компонентами технологической системы: станком (устройством), оснасткой, инструментом. Каждый из компонентов может иметь собственную новизну или же создавать новизну системы в целом за счет определенного сочетания известных компонентов. Степень новизны оценивают, в первую очередь по ее появлению в структуре или параметрах системы.

Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки заключается в том, что доля затрат труда, необходимого для разработки прогрессивных технологий, непрерывно возрастает. Систематизация этой работы позволяет совершенствовать и создавать новые технологии, позволяющие повысить качество машин и снизить себестоимость их изготовления. Для этого необходимо широко использовать как накопленный опыт проектирования прогрессивных технологий, так и новый системный подход, базирующийся на единстве технологии проектирования, производства и эксплуатации машин.

#### 2.10.1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Практически все методы обработки основаны на механическом, физическом, химическом или их совместном воздействии на заготовку при определенной кинематике перемещений (рис. 2.10.1). В то же время любая изготовленная деталь имеет определенное функциональное назначение. Наряду с первоначальным позиционированием деталей в сборочной единице, определяемым точностью размеров, в процессе эксплуатации детали испытывают новое механическое, физическое или химическое воздействие при определенной кинематике движений. Это приводит к изменению взаимного положения собранных деталей, потере точности, а иногда и к разрушению машин.

Все это говорит об идентичности процессов воздействия на деталь как при ее изготовлении, так и в процессе эксплуатации, а следовательно, указывает на необходимость целенаправленного воздействия на детали при

обработке, исходя из их дальнейшего функционального назначения. Подтверждением этой концепции являются поверхности трения деталей, финишную обработку которых можно рассматривать как процесс приработки, обеспечивающий их равновесное состояние.



Рис. 2.10.1. Процесс обработки заготовки на любой операции

При эксплуатации отдельные участки одной и той же рабочей поверхности имеют различное механическое, физическое и химическое воздействие, что сказывается на их долговечности. Это относится:

- к цилиндрическим, сферическим и криволинейным поверхностям трения (подшипники скольжения, чашки дифференциала заднего моста автомобиля, кулачки распределителей, рабочие поверхности зубьев и др.);
- к цилиндрам двигателей, к цилиндрическим и коническим подшипникам качения;
- к рабочим поверхностям катания железнодорожных рельсов и колес;
- к резьбовым соединениям;
- к рабочим поверхностям режущих и деформирующих инструментов и т.д.

Большинство деталей машин, их соединений и инструментов работают при изменяющихся условиях эксплуатации (скорости, нагрузки, температуры). Рабочие поверхности трения таких деталей и инструментов должны обладать быстрой прирабатываемостью. Естественно, что для повышения долговечности таких деталей, соединений и инструментов необходимо при изготовлении обеспечить различные эксплуатационные показатели, а в большинстве случаев создавать новые поверхностные слои, обладающие быстрой прирабатываемостью. Всё это ставит задачу целена-

правленного системного совершенствования существующих и разработки новых методов обработки деталей машин, исходя из их функционального назначения.

Совершенствование существующих методов обработки, как правило, происходит случайно, а иногда исходя из поставленной задачи. Так, придание дополнительно осциллирующего движения рабочему шарикю при накатывании позволило получить новый метод обработки — вибронакатывание [8]. Пропускание тока через зону контакта "рабочий ролик-заготовка" при накатывании привело к открытию электромеханической обработки [2].

Затруднения с механической обработкой резанием труднообрабатываемых материалов, а также необходимость повышения производительности труда привели к комбинированным методам обработки. Совершенствование существующих технологий обработки деталей зачастую происходит из необходимости повышения их долговечности. Так, цилиндрические и конические ролики подшипников качения для предотвращения их разрушения по краям необходимо обрабатывать с эксплуатационным распределением давлений вдоль образующей (рис. 2.10.2). Это позволяет обеспечить шлифование роликов бесконечной лентой. В результате такого шлифования ролики приобретают бочкообразную форму, которая при эксплуатации дает почти равномерное распределение давления вдоль образующей ролика (рис. 2.10.2, б).

Правильный расчет условий обработки (ширина и натяжение ленты, радиальная сила) позволяет получить форму ролика, обеспечивающую практически равномерное распределение давления вдоль образующей при

его эксплуатации. Аналогично обстоит дело и с подшипниками скольжения, но в данном случае неравномерность давления при эксплуатации возникает как вдоль образующей, так и по дуге контакта. Избежать этого можно отделочно-упрочняющей обработкой ППД поверхности трения подшипника при закономерно изменяющемся рабочем давлении.

Для обеспечения равномерности износа отдельных участков поверхностей трения чашек дифференциала и кулачков распределов можно применять электромеханическую обработку (ЭМО) с закономерно изменяющейся силой тока. Это позволяет получить поверхности трения с закономерно изменяющейся степенью упрочнения, обеспечивающей равномерный износ  $I$  при различных давлениях и скоростях:

$$I(\varphi) = 176 + 3,6 \text{ НВ}_{\text{ис х}} K(\varphi) + 176 v - 5,1 P,$$

где  $K(\varphi)$  — степень упрочнения поверхностного слоя;  $\text{НВ}_{\text{ис х}}$  — исходная твердость обрабатываемой заготовки;  $v$  — скорость обработки, м/мин;  $P$  — рабочее усилие при ЭМО, Н.

Из полученного уравнения следует, что воздействие на степень упрочнения может быть осуществлено не только через силу тока, но и через скорость и давление, то есть те же факторы, которые при эксплуатации вызывают различную интенсивность износа. Это еще раз подтверждает правильность выдвинутой гипотезы о единстве процессов силового, температурного и другого воздействия на рабочие поверхности деталей как при их изготовлении, так и эксплуатации.

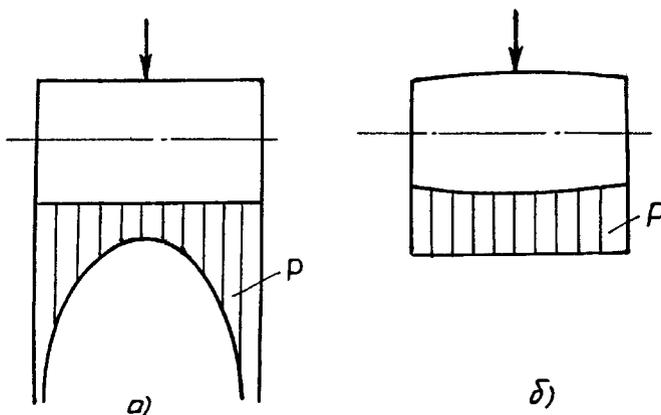


Рис. 2.10.2. Распределение рабочих давлений вдоль образующей при контакте ролика и поверхности катания: а — при цилиндрической форме; б — при бочкообразной форме

Так как эти детали работают при постоянно изменяющихся режимах, необходимо, чтобы их поверхности обладали быстрой прирабатываемостью. Это лучше обеспечивается, если поверхности имеют чередующиеся мягкие и твердые участки. Получить такую поверхность можно, если току придать импульсный характер. Так появилась импульсная ЭМО.

Различные участки рабочих поверхностей зубьев наряду с тем, что они работают при различных условиях, должны также обеспечивать совершенно разные эксплуатационные свойства. Так, у их основания должно обеспечиваться сопротивление усталости на участке у делительной окружности — контактная прочность; на остальных участках боковой поверхности — износостойкость. Это характерно особенно для силовых зубчатых передач. Очевидно, для принятых технологий обработки боковых поверхностей зубьев (фрезерование и шлифование) не могут обеспечить выполнение таких условий. Это может быть обеспечено целенаправленным изменением силового и температурного воздействий на обрабатываемую поверхность зуба, что реализуется через комбинированную обработку ППД и ЭМО, которая требует целенаправленной разработки как инструмента, так и оборудования.

Анализ износа цилиндров двигателей показал, что они имеют наибольший износ в верхней части. Это, очевидно, объясняется повышенными температурами в этой части цилиндров при их эксплуатации, которая при недостаточной масляемкости поверхности может приводить к явлениям схватывания, особенно в начальный период приработки. Для избежания этого вредного явления на цилиндрах двигателей целесообразно сформировать вибронакатыванием масляемкие карманы. Величина этих карманов по длине цилиндра должна быть различной, что обеспечивается закономерно изменяющимися режимами обработки: частотой колебаний и усилием рабочего шарика вибронкатного устройства.

В процессе эксплуатации железнодорожных рельсов их поперечный профиль в зависимости от участка дороги (повороты, подъемы, подложка, средние температуры и др.) в начальный период работы (процессе приработки) претерпевает значительные изменения, то есть происходит его естественная адаптация к условиям эксплуатации. Однако эксплуатационники железных дорог при ремонте рельсов стремятся вернуть им исходный поперечный профиль, что значительно удорожает ремонт и опять приводит к быстрому и большому их износу в период новой приработки. Всё это в значительной мере

сокращает долговечность железнодорожных рельсов.

Учитывая эти обстоятельства, целесообразно при ремонте рельсов сохранять сформировавшийся их поперечный профиль, убирая при этом вредный дефектный поверхностный слой. Обеспечить это могут так называемые упругие технологии (иглофрезерование, лепестковое шлифование). Вследствие упругих деформаций рабочих элементов инструмента (проволочек и лепестков) при определенном сохранении жесткости они позволяют снимать поверхностный дефектный слой и сохранять сформировавшийся поперечный профиль. Это приводит к необходимости целенаправленной разработки инструмента с определенной упругостью его рабочих элементов. Одновременно на поворотных участках в результате большого силового и температурного воздействия на боковые поверхности головки рельса от реборды колеса происходит их быстрый износ (практически срезание), что приводит к необходимости быстрой их замены. Для избежания этого вредного явления эти воздействия сил и температур на боковые поверхности рельс на этих участках дорог целесообразно из эксплуатации перенести в технологический процесс с увеличением температурного и уменьшением силового воздействия. Это позволяют обеспечить термомеханическая или электромеханическая обработка.

У поверхности катания обода железнодорожного колеса часть его участков вдоль образующей при эксплуатации работает при различных давлениях и температурах, а поэтому в процессе приработки изменяет свой оптимальный профиль. Во избежание этого поверхность катания обода колеса целесообразно подвергать электромеханической обработке с закономерно изменяющейся силой тока.

Резьбовые соединения имеют различное функциональное назначение (рис. 2.10.3). Кроме этого, различные участки резьбовых соединений по их длине будут испытывать различные нагрузки: начиная от максимальных (на первых витках) до нулевых (на последних витках). Поэтому технология изготовления резьбовых соединений требует своего совершенствования.

Рассмотрим пример. При эксплуатации различных двигателей обнаружен процесс самоотвинчивания шпилек. Это происходит из-за уменьшения первоначального натяга в резьбовом соединении "шпилька-алюминиевый корпус" в результате пластических деформаций резьбы корпуса при действии динамических нагрузок. Избежать этого вредного явления можно, если обеспечить раскачивание резьбовых отверстий в корпусе или

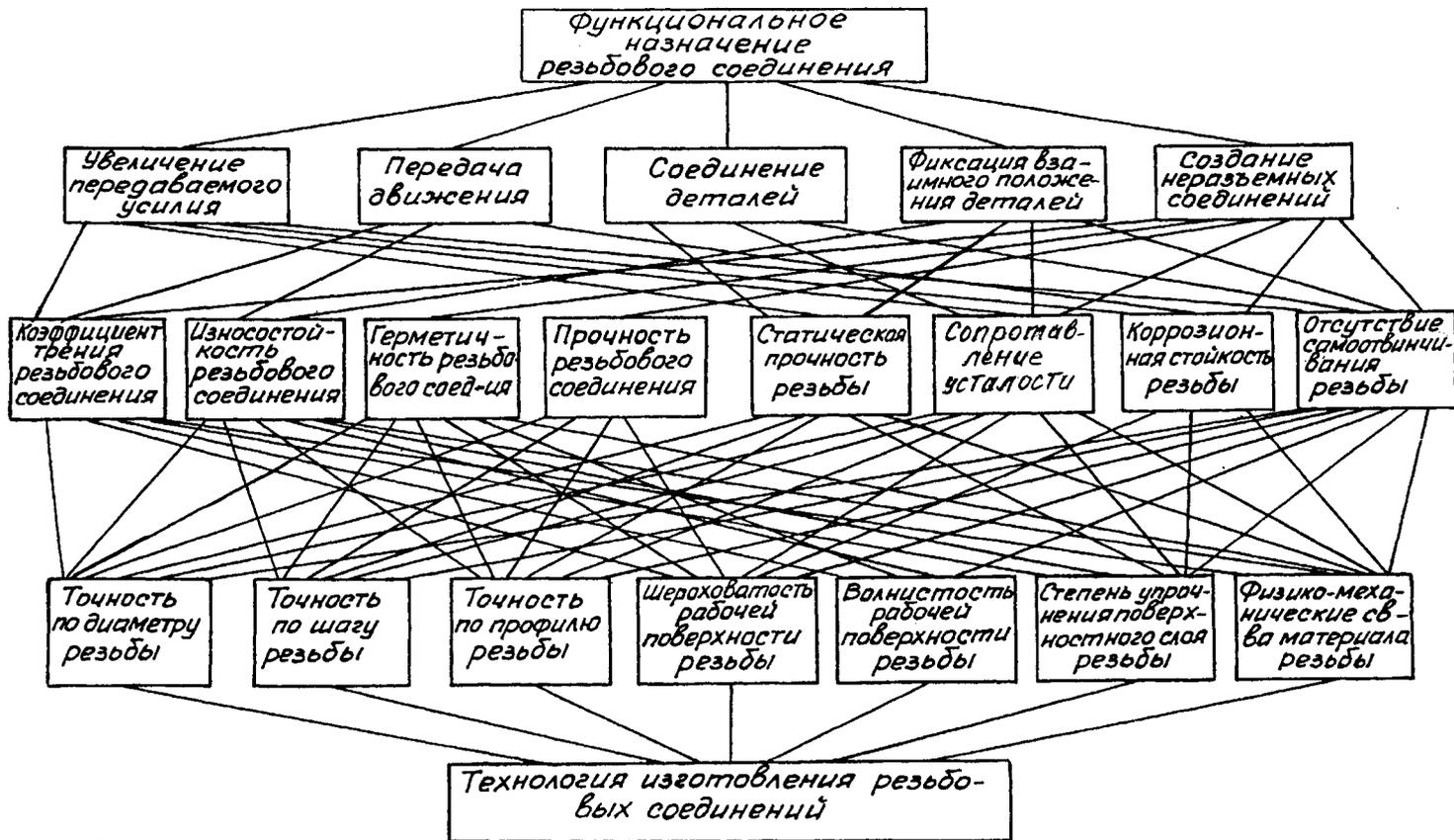


Рис. 2.10.3. Структурная схема взаимосвязи функционального назначения резьбовых соединений с технологией их изготовления

создание так называемых гладкорезьбовых соединений. Для раскатывания резьб необходима целенаправленная разработка инструмента. Сущность гладкорезьбового соединения заключается в вворачивании шпилек в гладкие отверстия. Как в первом, так и во втором случаях, в процессе формирования резьбы отверстия происходит пластическое насыщение материала, что предотвращает возможность её пластических деформаций при эксплуатации.

Обработка внутренних резьб в алюминиево-кремнистых сплавах связана со значительными трудностями. Резание затруднено вследствие вязких свойств материала, а пластическое деформирование — его хрупкостью. Всё это привело к необходимости комбинированной обработки и разработке специального инструмента, обеспечивающего при обработке благоприятные условия резания и пластического деформирования, что позволило значительно повысить производительность обработки и качество резьбы.

Рабочие поверхности вырубных пуансонов, как и других инструментов, работают в различных условиях. Основную нагрузку несёт режущая кромка, которая должна обладать повышенной поверхностной динамической прочностью и износостойкостью. Для обеспечения благоприятных условий резания и достаточной поверхностной динамической прочности режущая кромка вырубных пуансонов должна иметь оптимальный радиус скругления, что обеспечивается его виброобработкой. Для повышения поверхностной динамической прочности и износостойкости вырубных пуансонов их рабочая кромка должна быть легирована материалами, обеспечивающими это, что осуществляется лазерным легированием.

Изучение взаимодействия рабочей части режущего инструмента и обрабатываемой детали показывает на возможность частичного или полного перевода процесса резания к пластическому деформированию. Это в значительной мере расширяет возможности совершенствования обычных методов механической обработки.

### 2.10.2. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Создание новых методов обработки является творческой задачей, формализация которой возможна лишь в редких частных случаях.

Однако вполне реально, проанализировав состояние вопроса, указать основные на-

правления, а также сформулировать отдельные приемы и методы решения данной задачи.

В целом эволюционную систему технологических преобразований и создания новых прогрессивных технологий можно представить в виде следующей модели (рис. 2.10.4). Основными объектами модели являются: кадровое обеспечение, техническое обеспечение и технологические среды. Они осуществляют технологическое воздействие  $N(t_k)$  материального  $S_o(t_k)$ , энергетического  $E_o(t_k)$  и информационного  $I_o(t_k)$  типов на предметы обработки (заготовки, изделия) и реализуют процесс технологических преобразований заготовок в изделия, которые имеют вход  $V$  и выход  $W$ . Сам процесс технологических преобразований имеет обратную связь с обеспечивающими объектами системы. Обратная связь позволяет получать сведения о количественных и качественных параметрах процессов технологических преобразований, а также дает возможность многократного использования средств технологического воздействия, организовать их поточность и непрерывность функционирования.

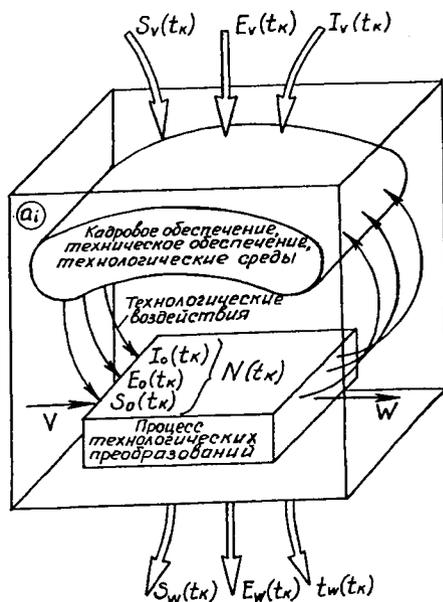


Рис. 2.10.4. Модель системы технологических преобразований (базовая модель технологии)

Все объекты системы технологических преобразований функционируют в пространстве и во времени, поэтому между ними действуют пространственно-временные отношения. Объекты модели ограничены пространственной границей, определяющей эту систему как функциональную единицу или объемно-пространственную производственную ячейку.

*Воздействия, оказываемые на систему технологических преобразований со стороны других систем,* могут быть представлены следующим множеством:

$$F^i = \{F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i\} \equiv S_v(t_k) \cup E_v(t_k) \cup I_v(t_k),$$

где  $F^i$  — вектор обобщенного входа;  $S_v(t_k)$  — входные обобщенные воздействия материального типа;  $E_v(t_k)$  — входные обобщенные воздействия энергетического типа;  $I_v(t_k)$  — входные обобщенные воздействия информационного типа;  $t_k$  — момент времени.

Входные воздействия оказывают различное действие на систему технологических преобразований.

Основные задачи входных воздействий  $F^i$  следующие: обеспечение необходимой структуры объектов; реализация требуемого поведения объектов; восстановление потоков технологического воздействия орудий и средств обработки на изделия и другие.

*Воздействия, реализуемые системой технологических преобразований на другие системы,* могут быть описаны следующим образом:

$$F_i = \{F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i\} \equiv S_w(t_k) \cup E_w(t_k) \cup I_w(t_k),$$

где  $F_i$  — вектор обобщенного выхода;  $S_w(t_k)$  — выходные обобщенные воздействия материального типа;  $E_w(t_k)$  — выходные обобщенные воздействия энергетического типа;  $I_w(t_k)$  — выходные обобщенные воздействия информационного типа.

Входные и выходные обобщенные воздействия включают как основные потоки различных типов, направленные на прогрессивное развитие системы, так и побочные (вредные, сопутствующие), оказывающие отрицательное влияние на качественные показатели развития.

Проектирование технологии подразумевает учет противоречивых требований, причем продукты его являются модели, позволяю-

щие понять структуру будущей технологии. Однако разработка технологии остается до сих пор трудоемким процессом, целью которого является: обеспечение требуемого алгоритма функционирования (технологического воздействия); реализация приемлемой цены; удовлетворение явным и неявным требованиям по эксплуатационным качествам, ресурсопотреблению и дизайну; удовлетворение требованиям к стоимости и продолжительности разработки технологии. При этом процессы проектирования технологий могут выполняться по различным схемам. Этапы традиционного жизненного цикла технологии характеризуются лавинообразным нарастанием сложности (рис. 2.10.5). Во многих компаниях и фирмах такую схему создания технологий рассматривают как незыблемую. Однако несмотря на силу традиций, анализ жизненного цикла технологии показывает следующие недостатки этой схемы:

непригодность для разработки сложных технологий, состоящих из большого количества подсистем и автономных модулей, образующих сетевые структуры;

обязательно последовательное выполнение всех этапов создания технологии;

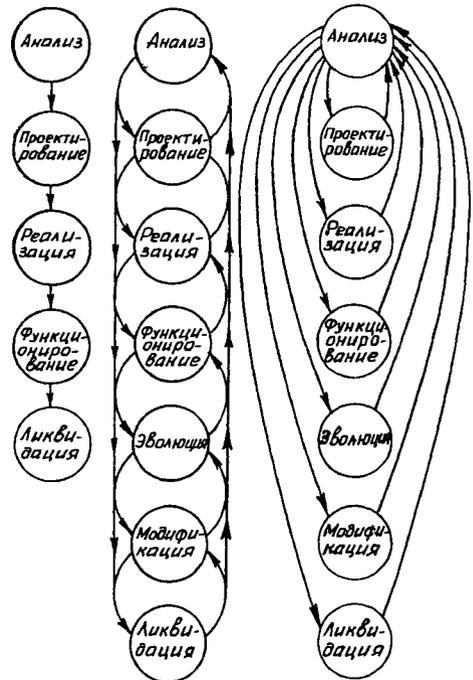


Рис. 2.10.5. Этапы жизненного цикла технологий

несовместимость с эволюционным подходом;

несовместимость с перспективными методами автоматизированного проектирования и управления технологиями.

Поэтому для создания прогрессивных технологий традиционные методы не подходят.

Начинает развиваться объектно-ориентированное проектирование, что особенно перспективно для создания новых технологий. В основе объектно-ориентированного проектирования лежит объектный подход, главными принципами которого являются: абстрагирование, ограничение доступа, модульность, иерархичность, типизация, параллелизм и устойчивость.

На рис. 2.10.5 показаны этапы жизненного цикла технологии при объектно-ориентированном проектировании. Здесь процесс создания технологии не является отдельным монолитным этапом. Он представляет собой один из шагов на пути последовательной итеративной разработки технологии; при этом последовательность шагов может иметь произвольный характер. Частный вариант последовательной итеративной разработки технологии с направленными шагами через анализ представлен также на рис. 2.10.5.

Применение описанных моделей позволило определить основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения, которые, дополняя известными данными, можно представить структурной схемой, изображенной на рис. 2.10.6. Она имеет иерархическую структуру и содержит основные признаки, особенности и обеспечение прогрессивных технологий. Основные признаки, характеризующие прогрессивность новых технологий, даны на структурной схеме (рис. 2.10.6) относительно конечного результата их действия — изделий. Эти признаки можно представить следующими категориями:

качественно новая совокупность свойств изделий (причина);

качественно новая мера полезности изделий (следствие).

С развитием науки и техники создаются возможности для улучшения свойств изделий, например, геометрических, кинематических, механических, тепловых, оптических и других, а также реализуются качественно новые свойства изделий, например, экологические, манипуляционные, отражения жестких космических лучей, свойства обладания эффектом "магнитная потенциальная яма" и др. Для обеспечения этого проектируемые технологии непрерывно совершенствуются и создаются качественно новые, а это значит, что они будут постоянно улучшаться и создавать качественно новые свойства изделий.

Однако только мера этих свойств — полезность изделий или их ценность, имеет решающее значение, так как конечной целью изготовления любого изделия является обеспечение необходимой ценности. Создаваемые прогрессивные технологии непрерывно повышают ценность изделий и соответственно реализуют качественно новую меру их полезности, например, обеспечивается возможность использования их в работах *n*-го поколения, для "гипердвигателей" межгалактических кораблей, для марсианского транспорта, построенного по принципу мехатроники, и др.

Создаваемые прогрессивные технологии нового поколения имеют некоторые базовые особенности, основные из которых могут быть связаны с высокой наукоемкостью их создания, сложностью реализации и функционирования; при этом необходимы высокая информационность и компьютеризация, определенный уровень электрификации и энергообеспечения, поэтому проектирование новых технологий должно базироваться на оптимальных технологических процессах. При необходимости могут быть использованы новые методы преобразования заготовок в изделия. Для этого должны применяться прогрессивные способы производства. На всех этапах жизненного цикла (см. рис. 2.10.5) новых технологий необходимо обеспечивать высокую степень автоматизации процессов. Созданные технологии должны иметь высокую устойчивость и надёжность функционирования по заданному алгоритму. Все это должно быть тщательно проработано на основе принципов объектно-ориентированного подхода и обеспечена экологическая чистота технологий. Вместе с тем создаваемые технологии должны быть открытыми к развитию и иметь возможность эволюционировать и модифицироваться в соответствии с изменяющимися внешними условиями. Кроме того, прогрессивные технологии могут иметь ряд других особенностей, относящихся к специальным технологиям или технологиям будущего.

Для создания прогрессивных технологий нового поколения необходимо нетрадиционное обеспечение, а именно: высококвалифицированные кадры, прогрессивные технологические системы и специальные технологические среды. В этом случае, проектирование технологических систем должно прежде всего определяться конъюнктурой рынка; основываться на новых принципах, свойствах и качестве композиции элементов оборудования; иметь высокие уровни автоматизации, производительности и прецизионности оборудования, оснастки и инструментов. Созданные технологические системы должны быть эстетичны и эргономичны, иметь высокую устой-

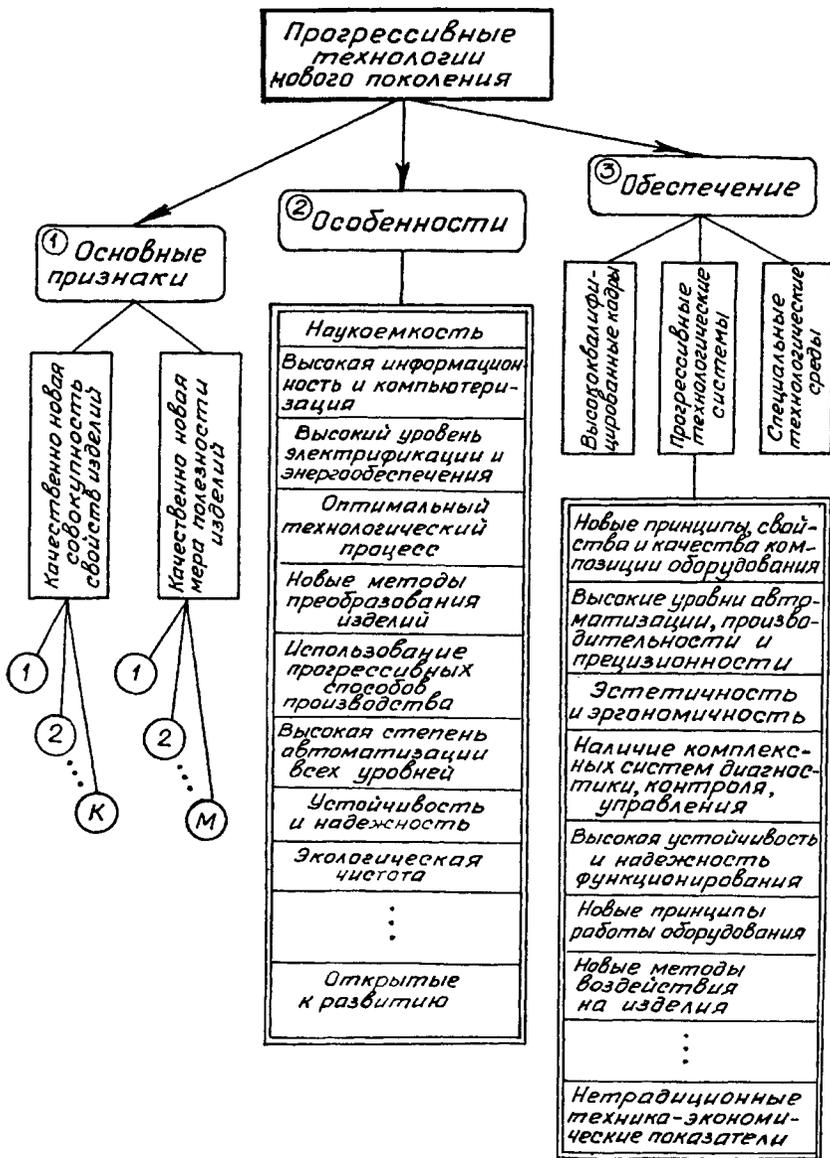


Рис. 2.10.6. Основные характеристики прогрессивных технологий нового поколения

чивость и надёжность функционирования. Для этого широко должны быть использованы комплексные системы диагностики, контроля и управления, а также новые принципы работы оборудования и методы воздействия орудий и средств обработки на изделия. Такой комплексный подход в создании прогрессивных технологических систем дает качественно новые нетрадиционные технико-экономические показатели их создания и функционирования.

Проведенные исследования с использованием разработанных моделей позволили определить и дополнить известные тенденции прогрессивного развития технологий новыми, к которым можно отнести следующие: повышение концентрации и параллелизма технологических зон обработки, обеспечивающих повышение производительности; создание нетрадиционных прогрессивных пространственных структур технологических зон обработки (создание многомерных

циклических структур, повышение размерности многообразия и объектов в каждом многообразии структуры), реализующих повышение технологических возможностей пространства и среды;

компоновка технологических зон обработки в линейные, поверхностные и объемные структуры; компоновка этих структур в производственные ячейки; компоновка производственных ячеек в пространственные структуры и заполнение ими всего объема пространства производственного цеха с возможностью изменения их пространственного расположения;

повышение степени компактирования структуры за счет увеличения плотности (линейной, поверхностной, объемной) технологических зон обработки;

организация поточности функционирования технологических зон обработки и повышение их интенсивности;

повышение непрерывности и устойчивости функционирования технологических систем в соответствии с заданным алгоритмом;

повышение информативности технологий, снижение массы технологических систем и повышение их энергообеспеченности;

создание технологий и технологических систем с использованием принципов мехатроники;

упрощение функциональной структуры за счет совмещения различных функций технологических систем; выполнение технологических функций посредством транспортных функций, и наоборот;

применение комплексных систем диагностики, контроля и управления процессами.

Анализ этих тенденций позволил сформулировать и разработать общий теоретический подход в создании и функционировании нетрадиционных технологических систем, называемых поточно-пространственными технологическими системами. Эти технологические системы имеют качественно новые свойства и возможности, а также существенно повышают уровень автоматизации и интенсификации производственных процессов. Разработанная общая методика синтеза дает возможность создавать *поточно-пространственные технологические системы непрерывного действия* следующих видов:

технологические системы высокой и сверхвысокой производительности для производства изделий медицинской, радиоэлектронной, пищевой промышленности, приборостроения и других отраслей народного хозяйства;

технологические системы непрерывного действия для длительных циклов технологического воздействия (термические, химические, физико-химические методы обработки и др.);

технологические системы непрерывного действия для комплексной обработки изделий;

гибкие технологические системы непрерывного действия.

Эти технологические системы позволяют значительно повысить производительность производственных процессов, сократить занимаемые оборудованием производственные площади, уменьшить длительность производственного цикла, число рабочих, занятых в производстве, и улучшить другие показатели.

Данная методология ориентированная на конечную цель — создание прогрессивных технологий, дает возможность видеть взаимосвязи, понимать и применять целостность как принцип проектирования. Создаваемые технологии являются отражением современного развития техники; теория их создания позволяет объяснить и предсказывать закономерности эволюционного процесса развития прогрессивных технологий.

Создание новых методов обработки является творческой задачей, формализация которой возможна лишь в редких частных случаях. Однако вполне реально, проанализировав состояние вопроса, указать основные направления, а также сформулировать отдельные приемы и методы решения данной задачи.

Методология разработки новых методов обработки базируется на предложенной концепции нового научного подхода к решению этой проблемы, основанной на единстве технологии изготовления и эксплуатации деталей машин и их соединений.

Так, для повышения долговечности пар трения необходимо как только возможно уменьшить их приработку в процессе эксплуатации. Этого добиваются финишной обработкой поверхностей трения, моделирующей ускоренный процесс их приработки. В соответствии с разработанной теорией трения и износа, процесс приработки представляет микрорезание и пластические деформации микронеровностей поверхностей трения.

Обеспечить этот процесс приработки можно на стадии финишной обработки поверхности трения специальным инструментом с моделированными микронеровностями. Рабочая поверхность инструментов должна проскальзывать по поверхности трения обрабатываемой детали, вызывая микрорезание и микродеформирование её шероховатости. В качестве такого инструмента могут быть использованы притирочный абразивный брусок (с определенной зернистостью) или иглофреза (с определенным диаметром рабочих игловок). Усилия прижатия и скорость проскальзывания инструмента определяются условиями эксплуатации обрабатываемой поверхности трения.

В зубчатых передачах в процессе приработки изменяется форма эвольвентной поверхности, увеличивается боковой зазор, что ведет к росту шума, изменению линий контакта и разрушению зубьев. Избежать этого явления можно, если в процессе изготовления и приработки зубчатых передач смоделировать все эти процессы: при зубонарезании и шлифовке зубьев — обеспечить их эксплуатационный профиль, а при обкатке — равновесное состояние качества поверхности. Для этого должен быть скорректирован рабочий профиль фрезы и шлифовального круга. Это, в свою очередь, говорит о необходимости учета при проектировании инструмента функционального назначения обрабатываемой поверхности.

Для окончательной обработки боковых поверхностей зубчатых колес может быть использована обкатка или специальная технология финишной обработки, обеспечивающая процесс микрорезания и пластических деформаций микронеровностей. Финишная обработка обеспечивается алмазным или обычным шевингованием.

Известно, что тот или иной метод обработки реализуется через выполнение технологических операций, объединение которых в одной детали представляет из себя технологический процесс.

В условиях жёсткой рыночной конкуренции разработка технологического процесса может определяться рыночной ценой изделия. Если классическая типовая технология не позволяет уже производить деталь с себестоимостью, обеспечивающей её ценовую конкурентоспособность, то объективно возникает проблема создания нового технологического процесса. В качестве примера может служить новая технология зубчатых колес с цельнокатанymi зубьями.

### 2.10.3. САПР НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Современный этап развития машиностроения неразрывно связан с автоматизацией инженерного труда на основе широкого и эффективного использования электронно-вычислительной техники, что является одним из элементов комплексной автоматизации современного производства, наиболее полно проявляющейся при создании гибких автоматизированных производств. В основу промышленных систем положены принципы централизованной переработки конструкторской, технологической, технико-экономической информации и обеспечения управления станками с ЧПУ, промышленными роботами, транспортными системами от ЭВМ.

Анализ функциональных возможностей подобных интегрированных САПР, известных как САД-САМ системы, показывает, что в

них отсутствуют проектные модули для выбора и проектирования новых технологий, характеризующихся малооперационностью и обеспечивающих материало-, энерго-, трудосбережение. Под термином проектирование новых технологий в рассматриваемом случае понимается поиск наиболее рациональных методов обработки и оптимальных условий их проведения.

Создаваемые САПР новых технологий, в первую очередь, должны быть ориентированы на поиск наиболее рациональных методов изготовления ответственных деталей, как правило, из труднообрабатываемых материалов, или характеризующихся повышенными требованиями к точности и качеству рабочих поверхностей, а также на значительное повышение производительности обработки и снижения себестоимости изготовления изделий.

При функционировании подобных систем выделяется ряд этапов, характерных для традиционного технологического проектирования, а также ряд дополнительных этапов, направленных на получение принципиально новых решений. На функциональной схеме рассматриваемой системы (рис. 2.10.7) приведен перечень основных этапов выбора технологических решений, а также взаимосвязь рассматриваемой САПР новых технологий с другими автоматизированными системами, подготавливающими для него исходную информацию и использующими результаты выбора технологических решений: САПР конструирования изделий, ППП (пакет прикладных программ) обеспечения эксплуатационных свойств деталей, САПР технологических процессов (ТП) и САПР оборудования и технологической оснастки.

Процесс поиска новых прогрессивных технологий начинается с формирования и постановки задачи поиска. Учитывая основную направленность описываемой системы на решение задач выбора технологий (методов обработки) на стадиях механической обработки, на первом этапе проводится формализация задачи поиска с одновременным решением ряда технологических задач, представляющих интерес для конструктора и технолога. Это, в первую очередь, выбор более полного набора характеристик качества для рассматриваемой детали с учетом требований к её эксплуатации. Эта процедура выполняется с использованием программ и совокупности математических моделей эксплуатационных свойств (износостойкости, контактной жёсткости, сопротивления усталости, коррозионной стойкости), хранящихся в базе данных технологий.

Следующими задачами, решаемыми на первом этапе, являются выбор оптимального вида и метода получения заготовки и формирование возможных маршрутов обработки

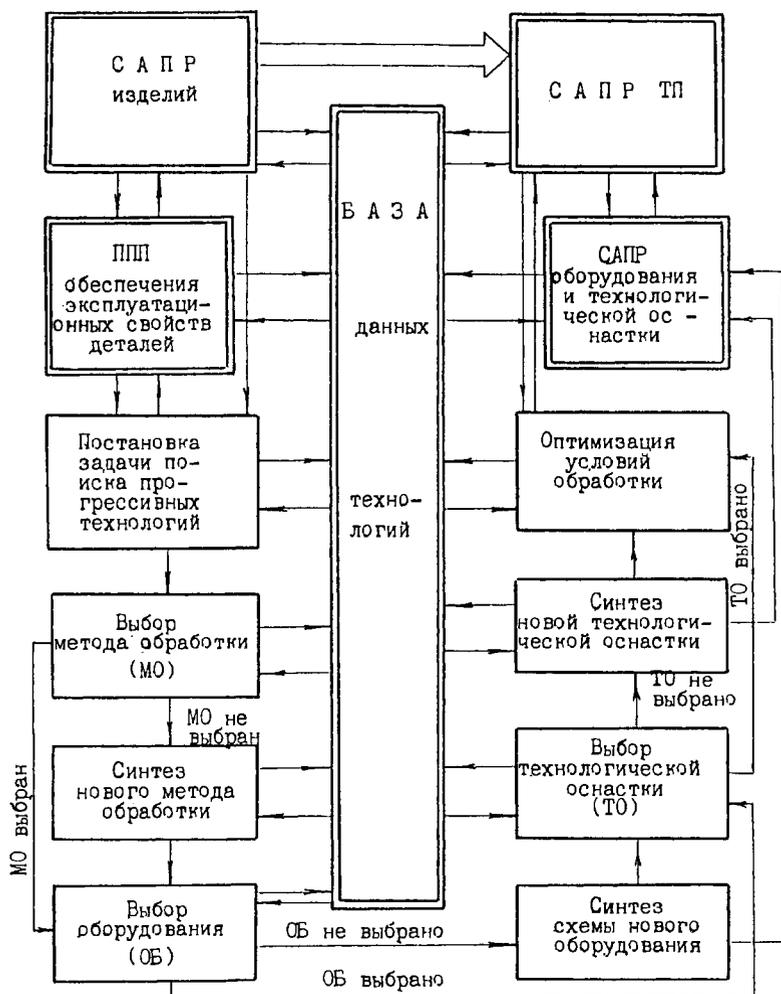


Рис. 2.10.7. Функциональная схема автоматизированной системы создания прогрессивных технологий

детали с последующим выбором наиболее рационального из них. Завершает первый этап — задача формирования массивов качества изделий до начала выполнения анализируемой операции ТП и после нее. Таким образом, искомая операция и, соответственно, метод обработки, лежащий в её основе, представляют известную модель "черного ящика", для которой описаны вход и выход. Эта информация является исходной для решения задач поиска на следующих этапах.

На втором и третьем этапах решаются основные задачи САПР новых технологий, связанные с выбором и синтезом новых методов обработки (МО). При этом используются библиотека МО, библиотека физико-технологических эффектов (ФТЭ), массивы условий выбора процессов обработки, схем форм-

мообразований и отдельных ФТЭ, хранящихся в базе данных технологий. При отсутствии в базе данных сведений о выбираемом методе обработки, обеспечивающем все заданные и сформированные на первом этапе требования, происходит синтез МО, включающий в себя решение задач синтеза принципа действия, выбора процесса обработки и схемы формообразования. Результатом синтеза МО является описание метода обработки, который в отдельных случаях может быть принципиально новым. Однако возможность реализации таких МО должна оцениваться группой специалистов-экспертов, которые определяют целесообразность проведения дальнейших экспериментальных исследований предложенного метода обработки.

При выборе прогрессивного МО наряду с определением наиболее рационального метода обработки и условий его реализации необходимо выбирать соответствующий вид технологического оборудования и оснастки. Поэтому, как показано на рис. 2.10.7, важными этапами решения задач САПР новых технологий являются: выбор оборудования, синтез схем нового оборудования, выбор технологической оснастки (ТО) и синтез новой ТО. Выполнение этих процедур зависит от многих условий и является многовариантным.

Так, для выбора оборудования существуют следующие пути:

1) выбран известный МО, для которого найдена в базе данных конструктивная схема реализации МО и имеются для нее аналоги оборудования — принимается определенная модель станка;

2) выбран известный МО, для которого найдена конструктивная схема, но отсутствуют аналоги оборудования (например по габаритам детали) — производится описание конструктивной схемы к разработке технического задания на проектирование оборудования;

3) выбран неизвестный МО, для которого найдена известная конструктивная схема и имеются аналоги оборудования — принимается определенная модель станка и составляется техническое задание на его усовершенствование;

4) выбрав неизвестный МО, для которого не найдены конструктивная схема и известные аналоги оборудования — синтезируется новая конструктивная схема обработки, формируется ее описание и разрабатывается техническое задание на проектирование нового вида оборудования.

Решение названных выше задач сопровождается поиском и выбором информации в базе данных, в которой хранятся библиотеки конструктивных схем обработки, оборудования и массивы условий выбора конструктивных схем и моделей станков, а также описания их элементов. Рассмотренная подсистема связана с САПР конструирования оборудования, для которой вся необходимая информация формируется в виде технического задания.

Подсистемы выбора и синтеза технологической оснастки предназначены для поиска известных видов инструментов и приспособлений для реализации новых методов обработки. В случае отсутствия в базе данных соответствующих сведений о видах технологической оснастки проводится её синтез. В основу подсистемы синтеза инструментов и приспособлений положены известные методы поискового конструирования. В частности, создан ППП автоматизированного синтеза токарных приспособлений, обеспечивающий получение новых технических решений для этого вида

технологической оснастки. Заканчивается процесс проектирования в рамках этих двух подсистем разработкой технических заданий на проектирование технологической оснастки в САПР-инструмент и САПР-приспособление.

Последним этапом выбора прогрессивных технологий является оптимизация условий обработки для известных МО при наличии в базе данных соответствующих описаний этих МО и их математических моделей. Эта информация формируется в базе данных на основе разработанных паспортов методов обработки. Для выбора оптимальных решений в этом случае должны быть созданы специальные комплексы многокритериальной оптимизации режимов механической обработки.

Особенность решаемых задач с использованием САПР новых технологий открывает возможность выполнения ряда новых проектных процедур. Так, представляется возможным проводить укрупненный поиск МО по одному или нескольким параметрам, что особенно целесообразно на стадии конструкторской подготовки, и уточненный поиск МО по большому числу параметров. По специальному запросу может быть сформировано информационное описание для изучения возможностей МО, построена математическая модель МО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аверченков В.И.** Формализация методов технологического проектирования, обеспечивающих требуемое качество изделий // Трение и износ, Т.18, №3, 1997.
2. **Аскинази Б.М.** Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. Л.: Машиностроение. 1997. 184 с.
3. **Буц Г.** Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: Пер. с англ. М.: Конкорд. 1992. 519 с.
4. **Михайлов А.Н.** Закономерности эволюционного процесса развития технологий машиностроения. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк. 1995.
5. **Рыжов Э.В., Аверченков В.И.** Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев: Наук. думка, 1989. 192 с.
6. **Суслов А.Г., Горленко А.О., Симкин А.З.** Повышение долговечности кулачковых пар трения. // Трение и износ. Т. 18, № 3, 1997.
7. **Суслов А.Г.** От технологического обеспечения эксплуатационных свойств к качеству машин // Трение и износ, Т. 18, № 3, 1997.
8. **Шнейдер Ю.Г.** Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение. 1972. 210 с.

## РАЗДЕЛ 3

# СРЕДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Глава 3.1

#### МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ

##### 3.1.1. ТИПЫ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СТАНКОВ

Металлорежущие станки являются технологическими машинами для окончательной обработки деталей машин, главным образом снятием стружки режущим инструментом (обработка резанием).

На металлорежущих станках могут осуществляться как промежуточные, так и финишные этапы обработки деталей.

Имеется группа станков, где используются специальные методы обработки — электрофизические, электрохимические, лазерным лучом, пластическим деформированием и другие процессы, связанные с измерением или контролем обрабатываемых деталей, а в ряде случаев и их сборкой.

Материалами обрабатываемых деталей являются в основном различные металлы и сплавы, а также пластмассовые, керамические, спеченные углеграфитные и другие твердые материалы, применяемые для деталей машин.

Металлорежущие станки являются основным элементом технологической системы, предназначенной для обработки резанием, которая включает также режущий инструмент, заготовку, исполнителя (оператора) и другие составляющие, которые в совокупности обеспечивают заданный технологический процесс обработки.

Процесс обработки складывается из рабочих и холостых ходов, которыми являются функциональные действия механизмов, устройств, инструментов в металлорежущем станке, которые применительно к рабочим ходам непосредственно реализуют технологический процесс, а применительно к холостым ходам — создают необходимые условия для выполнения технологического процесса (загрузка и съем изделий, их зажим и разжим, подвод и отвод режущего инструмента и др.).

Металлорежущие станки являются технологическими машинами циклического действия, в которых рабочие и холостые хода периодически повторяются через определенный интервал времени, называемый рабочим циклом. За каждый рабочий цикл обрабатывается, как правило, одно изделие.

Конструкция и компоновка станков чрезвычайно разнообразны, однако все они содержат типовые системы, узлы, механизмы и элементы, которые показаны на структурной схеме (рис. 3.1.1).

Узлы и механизмы данного целевого назначения могут образовывать самостоятельную конструктивную единицу (что является более желательным), либо создается система со многими функциями, где конструктивно объединены механизмы и элементы различного назначения.

Движение рабочих органов станка осуществляется от электропривода непосредственно через механизмы (зубчатые передачи, а также кулачковые механизмы, гидро- и пневмопередачи и др.). Законы их перемещения и координация движений (цикл станка) определяются механизмом управления.

**Формообразующие узлы** несут заготовку и инструмент, сообщая им заданное относительное движение для осуществления процесса формообразования обрабатываемых поверхностей.

**Механизмы вспомогательных функций** обеспечивают полный цикл обработки с необходимыми транспортными перемещениями обрабатываемых деталей и инструмента и выполняют действия, необходимые для достижения требуемого качества обработки.

**Несущая система** обеспечивает жесткое взаимное положение всех узлов станка и определяет его компоновку.

**Система управления** и уровень ее развития во многом определяют возможности станка по работе в автоматическом цикле, а также связи станка с другими автоматизированными технологическими машинами и системами, образующими современную высокоразвитую гибкую производственную систему (ГПС) или

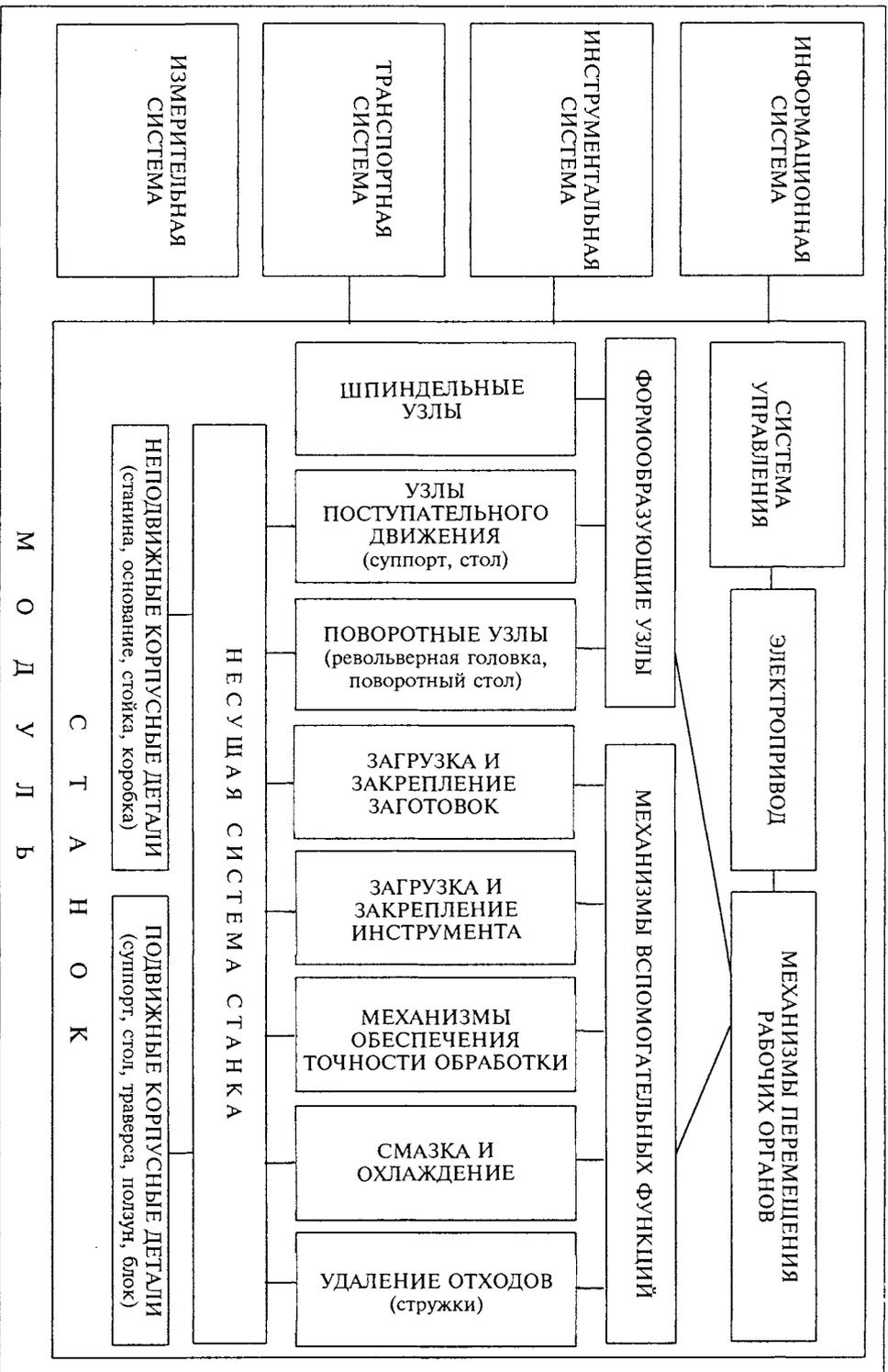


Рис. 3.1.1. Структурная схема построения металлорежущего станка, ПИМ и РТК

станочную автоматизированную систему данного назначения (автоматическую линию).

**Гибкий производственный модуль (ГПМ)** или роботизированный технологический комплекс (РТК) включают кроме станка также системы и устройства, обеспечивающие функционирование модуля или комплекса как единой технологической единицы, имеющей возможность встраиваться в более сложную производственную систему, например, ГПС.

ГПМ и РТК могут включать системы и устройства, выполненные в виде самостоятельных конструктивных единиц (см. рис.3.1.1).

**Информационная система** осуществляет связь системы управления станка с системой управления более высокого уровня и дает также информацию о состоянии станка (диагностику), его производительности и точности изготовления деталей) по данным измерительной станции.

**Инструментальная система (магазин)** обеспечивает хранение и автоматическую смену инструмента и приспособлений при обработке сложных изделий одного или нескольких наименований.

**Транспортная система**, которая может включать промышленные роботы, манипуляторы, накопители, тактовые многопозиционные столы, конвейерные устройства и др., служит для транспортировки заготовок, готовых изделий, инструмента и приспособлений в соответствии с заданным технологическим циклом.

**Измерительная (метрологическая) система (станция)** осуществляет автоматизированный контроль обработанных изделий (наряду с встроенными в станок измерительными системами) и дает сигналы для управления ходом технологического процесса, его коррекции или прекращения с целью недопущения изготовления изделий, не отвечающих заданным техническим требованиям.

При всей важности перечисленных функций систем, составляющих станочный модуль, именно станок является той технологической машиной, которая, в первую очередь, определяет качество и эффективность процесса обработки.

Все те движения инструмента, заготовки и обработанной детали, которые необходимо проводить для осуществления полного цикла обработки на станке, называются исполнительными.

По целевому назначению движения разделяют следующим образом.

**1. Движения формообразования** связаны с непосредственным осуществлением процесса резания или другого вида обработки, когда происходит образование поверхности задан-

ной формы. Схемы обработки и конструкция станка диктуют те относительные движения инструмента и заготовки, которые сообщаются формообразующим узлам станка.

При обработке резанием движение, при котором происходит снятие стружки, называют главным; его скорость, наибольшая в процессе обработки, — это скорость  $v$  (м/мин) главного движения резания  $D_r$ . Движение, определяющее возможность непрерывного врезания режущихлезвий инструмента в новые слои материала, называют движением подачи  $D_S$  (скорость подачи  $v_S$ , мм/мин, подача  $S$ , мм/об, мм/зуб).

Точность выполнения заданных движений формообразования в основном определяет точность станка, как главного компонента технологической системы, и его вклад в образование погрешностей обработки.

**2. Установочные движения** — это перемещение инструмента или заготовки в исходное положение, при котором может осуществляться процесс формообразования. К ним относятся: подвод инструмента в исходное положение для начала резания (например, резца при обработке детали), движения позиционирования заготовки (например, перемещение в заданное положение стола координатно-расточного станка), делительные движения (например, поворот револьверной головки или шпиндельного блока).

Во время установочных движений процесс обработки не осуществляется, однако они, как правило, влияют на точность обработки и это связано с точностью перемещения и фиксации узла станка в заданном положении.

**3. Вспомогательные движения** — это необходимые транспортные перемещения заготовки и инструмента для осуществления на станке полного цикла обработки. К ним относятся движения, обеспечивающие установку, закрепление, освобождение и транспортировку заготовок и инструмента, а также движения, связанные с удалением отходов (стружки), правкой инструмента и др.

Эти движения прямо не связаны с процессами резания и их влияние на точность обработки может быть либо косвенным (например, за счет динамических нагрузок при работе соответствующих механизмов), либо оказывать на точность непосредственное влияние (например, точность правки шлифовального круга).

Наибольшее влияние на конструкцию, компоновку и технические характеристики станка оказывают движения формообразования (как правило, это вращательные и поступательные движения и их сочетания).

При работе станка в зависимости от схемы обработки инструменту и заготовке

может быть сообщено до четырех формообразующих движений одновременно. Кинематика резания анализирует и классифицирует различные схемы резания как функцию относительных движений инструмента и заготовки с учетом трансформации углов резания. В табл. 3.1.1 приведена классификация формообразующих движений на станке в зависимости от их числа и сочетания вращательного и поступательного движений.

Сравнительно редко применяется одно или два одностипных движения (два поступательных или два вращательных). Наиболее характерно сочетание поступательного и вращательного движений, а также схемы с тремя движениями и более. Чем больше формообразующих движений в станке, тем сложнее, в общем случае, обеспечить их заданное выполнение, т.е. получить высокие технические

показатели станка с позиций точности. Однако разнообразие движений формообразующих узлов станка увеличивает его технологические возможности и универсальность. Поэтому выходные параметры станка, определяющие его технический уровень, должны быть, в первую очередь, связаны с теми формообразующими и установочными движениями, которые определяют вклад станка в точность обработки.

Металлорежущие станки в зависимости от вида обработки делят на девять групп (табл. 3.1.2), а каждую группу — на десять типов (подгрупп), характеризующих назначение станков, их компоновку, степень автоматизации или вид применяемого инструмента. Четвертая группа предназначена для электроэрозионных, ультразвуковых и других станков.

3.1.1. Классификация формообразующих движений на металлорежущих станках

Поступательное движение	Вращательное движение		
	Нет	Одно	Два
Нет	1 	5 	9 
Одно	2 	3 	7 
Два	4 	6 	8 
			10 
			11 

Примечания: 1 — обработка лучом лазера; 2 — протягивание поверхностей; 3 — ультразвуковая обработка; 4 — фасонное строгание; 5 — электроэрозионная обработка каналов; 6 — точение; 7 — сверление; 8 — суперфиниширование; 9 — протягивание; 10 — зубофрезерование; 11 — шлифование

### 3.1.2. Классификация металлорежущих станков

Станки	Группа	Типы станков									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Токарные	1	Автоматы и полуавтоматы			Токарно-револьверные	Токарно-револьверные полуавтоматы	Карусельные	Токарные и лоботокарные	Много-резцовые и копи-ральные	Специализированные	Разные токарные
		специализированные	одношпиндельные	многошпиндельные							
Сверлильные и расточные	2		Настольно-и вертикально-сверлильные	Полуавтоматы		Координатно-расточные	Радиально-и координатно-сверлильные	Расточные	Отделочно-расточные	Горизонтально-сверлильные	Разные сверлильные
				одношпиндельные	многошпиндельные						
Шлифовальные, полировальные, доводочные, заточные	3		Круглошлифовальные, бесцентровошлифовальные	Внутришлифовальные, координатношлифовальные	Обдирочно-шлифовальные	Специализированные шлифовальные	Продольно-шлифовальные	Заточные	Плоскошлифовальные	Притирочные, полировальные, хонинговальные, доводочные	Разные станки, работающие абразивным инструментом
Электрофизические и электрохимические	4			Светолучевые		Электрохимические			Электроэрозионные, ультразвуковые прошивочные	Анодно-механические отрезные	

Зубо- и резьбообрабатывающие	5	Резьбно-нарезные	Зубодолбежные для цилиндрических колес	Зубонарезные для конических колес	Зубофрезерные для цилиндрических колес и шлицевых валов	Для нарезания червячных колес	Для обработки торцов зубьев колес	Резьбофрезерные	Зубоотделочные, проверочные и обратные	Зубо- и резьбошлифовальные	Разные зубо- и резьбообрабатывающие
Фрезерные	6	Барабанно-фрезерные	Вертикально-фрезерные консольные	Фрезерные непрерывного действия	Продольные одно-стоечные	Копировальные и гравировальные	Вертикально-фрезерные бесконсольные	Продольные двух-стоечные	Консольно-фрезерные операционные	Горизонтально-фрезерные консольные	Разные фрезерные
Строгальные, долбежные, протяжные	7		Продольные		Поперечно-строгальные	Долбежные	Протяжные горизонтальные	Протяжные вертикальные для протягивания			Разные строгальные станки
			одно-стоечные	двух-стоечные				внутреннего	наружного		
Разрезные	8		Отрезные, работающие			Правильно-отрезные	Ленточно-пильные	Отрезные с дисковой пилой	Отрезные ножовочные		
			резцом	абразивным кругом	гладким или насеченным диском						
Разные	9		Трубо- и муфто-обрабатывающие	Пилонасекательные	Правильно- и бесцентровые обдирочные		Для испытания инструментов	Делительные машины	Балансировочные		

Для обозначения различных моделей металлорежущих станков принята специальная система, применение которой позволяет по цифровому и буквенному индексу станка определить его тип, основные технологические параметры, класс точности и систему программного управления.

Обозначение модели станка состоит из сочетания трех или четырех цифр и букв. Первая цифра означает номер группы, вторая — номер подгруппы (тип станка), а последние одна или две цифры — наиболее характерные технологические параметры станка. Например, 1E116 означает токарно-револьверный одношпиндельный автомат с наибольшим диаметром обрабатываемого прутка 16 мм; 2H125 означает вертикально-сверлильный станок с наибольшим условным диаметром сверления 25 мм. Буква, стоящая после первой цифры, указывает на различное исполнение и модернизацию основной базовой модели станка. Буква в конце цифровой части означает модификацию базовой модели, класс точности станка и его особенности.

Для обозначения применяемой на станках системы управления принята следующая индексация: Ц — с цикловым программным управлением; Ф1 — с цифровой индикацией положения, а также с предварительным набором координат; Ф2 — с позиционной системой ЧПУ; Ф3 — с контурной системой ЧПУ; Ф4 — с комбинированной системой ЧПУ.

Например, 16Д20П — токарно-винторезный станок повышенной точности; 6P13K1 — вертикально-фрезерный консольный станок с копировальным устройством; 1Г34ОПЦ — токарно-револьверный станок с горизонтальной головкой, повышенной точности, с цикловым программным управлением; 2455АФ1 — координатно-расточной двухстоечный станок особо высокой точности с предварительным набором координат и цифровой индикацией; 2P135Ф2 — вертикально-сверлильный станок с револьверной головкой, крестовым столом и с позиционной системой числового программного управления; 16К20Ф3 — токарный станок с контурной системой числового программного управления; 2202ВМФ4 — многоцелевой (сверлильно-фрезерно-расточной) горизонтальный станок с инструментальным магазином и с комбинированной системой ЧПУ (буква М означает, что станок имеет магазин с инструментами).

Для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), учитывая их разную

компоновку и конструкцию, а также различное количество управляемых координат, принято строго определенное обозначение осей координат и направлений движений рабочих органов станка, связанных с обрабатываемой заготовкой и режущим инструментом (рис. 3.1.2).

При этом за основу принимается перемещение инструмента относительно системы координат неподвижной заготовки. Стандартная система координат представляет собой правую прямоугольную систему координат, связанную с заготовкой, оси которой параллельны прямолинейным направляющим станка (рис. 3.1.3, а).

В общем случае имеется три линейных перемещения (соответственно  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) и три вращательных движения вокруг этих осей (соответственно  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ).

Положительное направление перемещений по осям координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и  $A$ ,  $B$ ,  $C$  определяется по правилу правой руки (рис. 3.1.3, б). Положительное направление движения  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  рабочего органа станка предпочтительно соответствует направлению отвода инструмента от заготовки. Положительным направлением вращения  $A$ ,  $B$ ,  $C$  рабочего органа станка считается вращение по часовой стрелке, если смотреть вдоль положительного направления осей координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Направления движения рабочих органов, несущих инструмент, обозначаются буквами без штриха (рис. 3.1.3, а). Если, наоборот, рассматривается перемещение заготовки относительно неподвижного режущего инструмента, то ее положительное направление обозначается теми же буквами, но со штрихом ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ).

Ось  $Z$  всегда совмещается с осью вращения шпинделя, несущего инструмент (например, на фрезерном станке с ЧПУ) или заготовку (например, в токарных станках с ЧПУ).

Если дополнительно к основным прямолинейным движениям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  имеются вторичные движения, параллельно им, они обозначаются соответственно буквами  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . А для обозначения третичных движений, параллельных им, используются буквы  $P$ ,  $Q$ , и  $R$  соответственно. Вторичные вращательные движения, параллельные или непараллельные основным движениям  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , обозначаются буквами  $D$  и  $E$ .

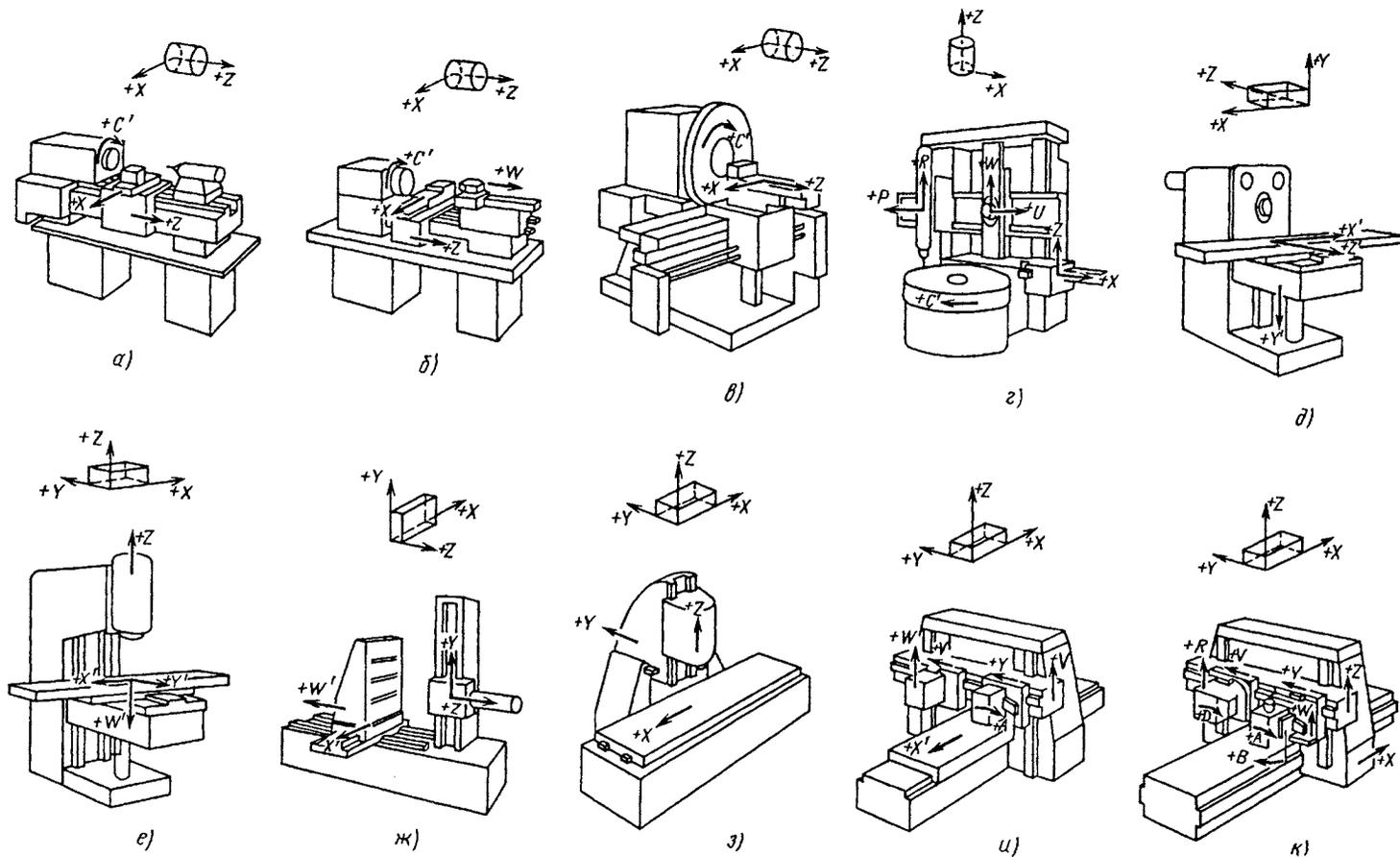


Рис. 3.1.2. Примеры компоновок металлорежущих станков и обозначения осей координат:

*a* — токарно-винторезный станок; *б* — токарно-револьверный станок; *в* — лоботокарный станок; *г* — токарно-карусельный станок; *д* — консольно-фрезерный горизонтальный станок; *е* — вертикальный координатно-расточной станок; консольно-фрезерный вертикальный, вертикально-сверлильный станок; *ж* — горизонтально-расточной станок; *з* — продольно-фрезерный вертикальный станок; *и* — порталный продольно-фрезерный станок; *к* — порталный копировально-фрезерный станок;

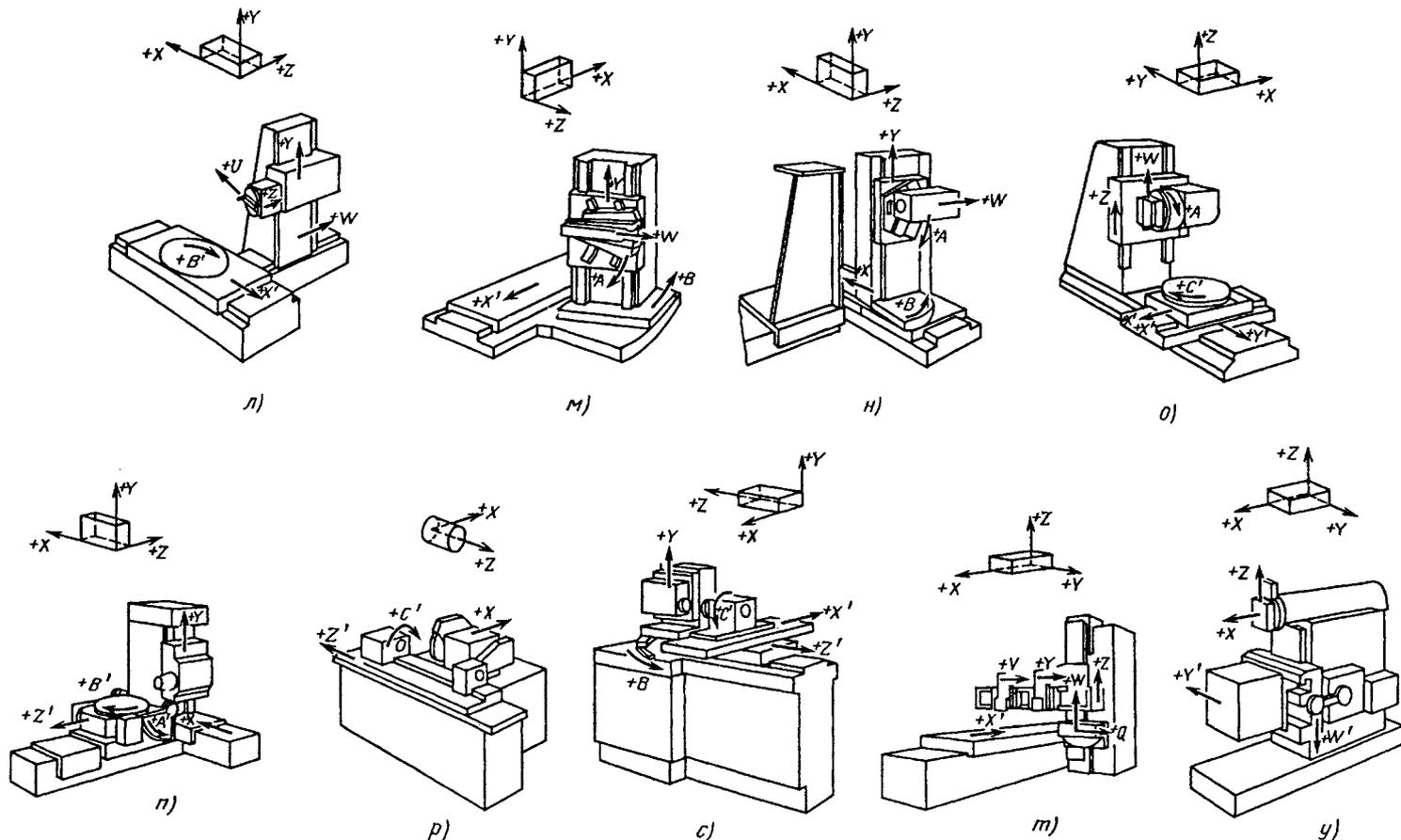


Рис. 3.1.2. Примеры компонок металлорежущих станков и обозначения осей координат (продолжение):

л — горизонтально-расточной станок; м — пятикоординатный фрезерный станок с подвижным столом; н — пятикоординатный фрезерный станок с горизонтальным шпинделем; о — пятикоординатный фрезерный станок с крестовым поворотным столом и поворотной бабкой; п — пятикоординатный фрезерный станок с продольно-подвижным и поворотным столом; р — универсальный кругло-шлифовальный станок; с — станок для заточки режущего инструмента; т — одностоечный продольно-строгальный станок; у — поперечно-строгальный станок.

Принцип работы, возможности металло-режущего станка по обработке той или иной номенклатуры изделий с заданным качеством и наибольшей производительностью, его компоновка связаны, в первую очередь, с выбранным методом обработки, соответствующими движениями формообразования, а также со степенью концентрации в одном станке технологических операций.

В соответствии с этими признаками в табл. 3.1.3 приведена классификация металло-режущих станков по технологическому назначению, которая отражает также развитие станков от простых одноинструментных к станкам, в которых обеспечивается более эффективная обработка за счет концентрации в одном станке различных инструментов или одновременной обработки изделий в нескольких рабочих позициях.

Обработка на одноинструментных станках (с возможной заменой инструмента при обработке различных поверхностей) приводит обычно к созданию более простых, универ-

сальных и точных станков, обладающих однако сравнительно низкой эффективностью.

К таким станкам относятся токарно-винторезные, алмазно-расточные, строгальные, долбежные и другие.

Большую производительность обеспечивает применение многолезвийного инструмента (фрез, протяжек, сверл и др.).

Фрезерные, протяжные, зубообрабатывающие и другие станки требуют создания, как правило, более жесткой конструкции, воспринимающей статические и динамические нагрузки.

Для финишной обработки широко применяются станки с абразивным инструментом — шлифовальные, хонинговальные, притирочные и другие.

Еще большую производительность может обеспечить многоинструментная обработка с применением однотипного (например, многолезвовая обработка) или разнотипного инструмента.

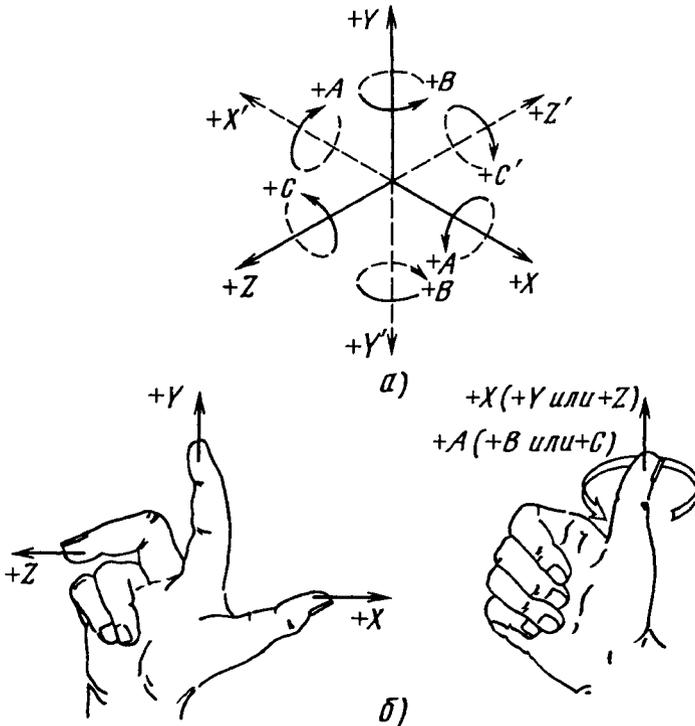
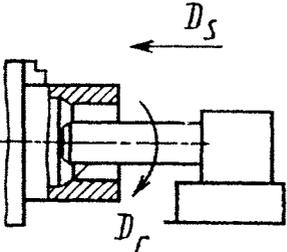
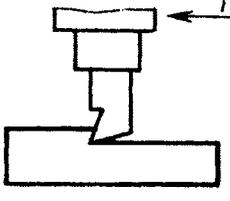
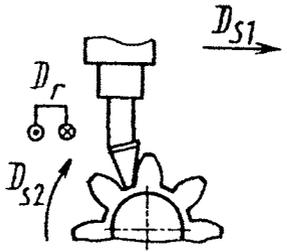
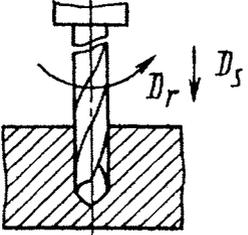
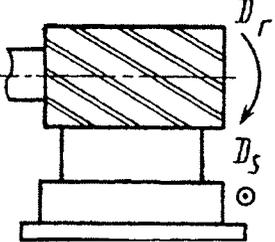
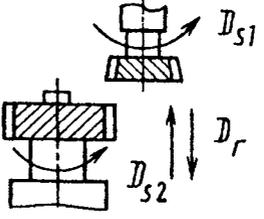
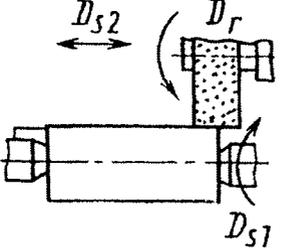
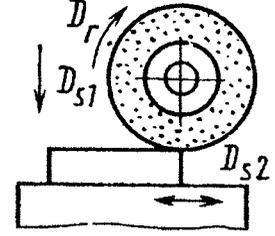
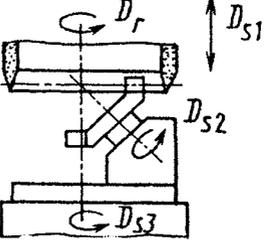
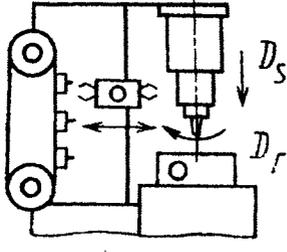
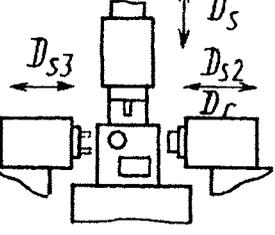
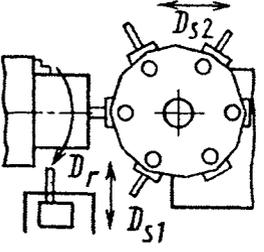


Рис. 3.1.3. Система координат станков с ЧПУ:

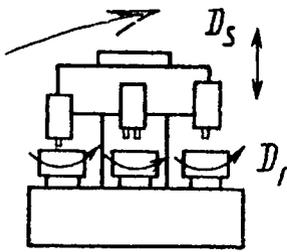
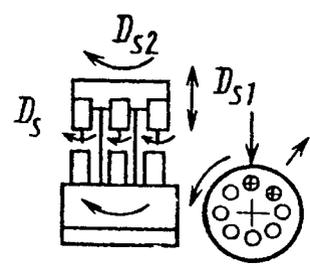
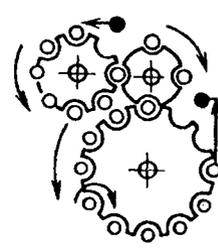
а — правая прямоугольная система координат;

б — правило правой руки при определении положительных направлений осей координат

3.1.3. Классификация металлорежущих станков по технологическому назначению

Обрабатываемая поверхность		
Вращения и винтовая	Плоская и линейная	Фасонная
Однопозиционный одноинструментный станок		
Однолезвийный инструмент		
		
Многолезвийный инструмент		
		
Абразивный инструмент		
		
Однопозиционный многоинструментный станок		
Последовательная обработка	Параллельная (одновременная) обработка	Параллельно-последовательная обработка
		

Продолжение табл. 3.1.3

Обрабатываемая поверхность		
Вращения и винтовая	Плоская и линейная	Фасонная
Многопозиционный станок		
		

Многоинструментная обработка на однопозиционном станке, где обрабатывается в данный момент времени одна деталь, может быть осуществлена:

а) как **последовательная обработка**, когда различный инструмент последовательно устанавливается в рабочую позицию из магазина или с помощью револьверной головки. К таким станкам относятся револьверные станки и автоматы, многоцелевые станки с инструментальным магазином (обрабатывающий центр);

б) как **параллельная обработка**, когда у заготовки одновременно обрабатывается ряд поверхностей с помощью инструмента, установленного в нескольких суппортах или инструментальных головках. К таким станкам относятся токарные многорезцовые и карусельные станки, агрегатные станки с многшпиндельными сверлильными головками, продольно-фрезерные и координатно-расточные станки с несколькими инструментальными головками;

в) как **параллельно-последовательная обработка**, осуществляемая инструментами одновременно с двух револьверных головок или револьверной головки и поперечных суппортов, например, в токарно-револьверных станках и автоматах.

Наибольшая концентрация операций достигается в многопозиционных станках при одновременной обработке на одном станке нескольких деталей.

В многопозиционных станках последовательного действия заготовка устанавливает-

ся в загрузочную позицию и последовательно проходит через все рабочие позиции и обрабатывается там согласно заданному технологическому процессу. В каждой позиции, как правило, проводится многоинструментная обработка. Обычно такие станки имеют поворотные столы или шпиндельные блоки, которые периодически поворачиваются для перемещения заготовки из одной позиции в другую. К таким станкам относятся многшпиндельные прутковые и патронные токарные автоматы и полуавтоматы, агрегатные станки с поворотными столами, двухшпиндельные токарные автоматы.

В многопозиционных станках параллельного действия в каждой позиции осуществляется одинаковый технологический процесс, одновременно или со сдвигом фаз по времени (ротационные станки).

Такой метод обработки находит применение для сравнительно простых технологических процессов, но с высокими требованиями к производительности при крупносерийном и массовом производстве. Примерами таких станков могут служить плоскошлифовальные станки с непрерывно вращающимся столом (например, для шлифования торцов подшипниковых колец). Но особенно характерны для этого случая роторные станки, например, для сверлильной и токарной обработки сравнительно простых деталей.

Характерной тенденцией современных многопозиционных станков с применением многоинструментной обработки является включение наряду с обработкой резанием

других операций, основанных на использовании пластического деформирования, лазерной обработки, сварки, сборки, а также включение операций контроля и измерения.

К более сложной конструкции станка может привести применение принципа параллельно-последовательной обработки. Например, на четырехпозиционном столе агрегатного станка каждая рабочая позиция выполнена двосонной и в ней параллельно обрабатываются две детали. Таким образом, здесь через четыре последовательные позиции проходят одновременно два параллельных потока и в процессе обработки находится восемь деталей.

В качестве другого примера параллельно-последовательной обработки можно привести роторно-конвейерную линию, состоящую из нескольких (в табл. 3.1.3 — двух) рабочих роторов, в каждом из которых осуществляется своя технологическая операция в нескольких одинаковых позициях.

Большая концентрация операций в одном станке за счет многоинструментной обработки и тем более, при многопозиционной (многошпиндельной) обработке, приводит к созданию более сложных, но высокоэффективных станков.

Основная задача при проектировании станков такого типа — обеспечить возможно большую их универсальность и возможность быстрой переналадки. Это достигается путем создания станков, приспособленных к работе в качестве гибкого производственного модуля в автоматизированных системах с управлением процессами замены инструмента и заготовок и с переналадкой на новый цикл обработки.

По степени универсальности различают: универсальные станки, предназначенные для выполнения различных операций на изделиях многих наименований;

станки широкого назначения, предназначенные для выполнения определенных операций на изделиях многих наименований;

специализированные станки, предназначенные для обработки изделий одного наименования и разных размеров;

специальные станки, предназначенные для обработки определенного (одного) изделия.

Специальные и специализированные станки обозначают буквенным индексом (из одной или двух букв), присвоенным каждому заводу, с номером модели станка. Например,

МШ-245 — рейкошлифовальный полуавтомат повышенной точности Московского завода шлифовальных станков.

По массе, зависящей от габаритных размеров, станки подразделяют на легкие — массой до 1 т, средние — до 10 т, и тяжелые — св. 10 т. Тяжелые станки, в свою очередь, подразделяют на три подгруппы: крупные станки массой от 10 т до 30 т, собственно тяжелые — массой от 30 т до 100 т и особо тяжелые (уникальные) массой 100 т.

По точности станки подразделяют на пять классов.

Класс Н — станки нормальной точности, обеспечивают обработку деталей примерно по 7-8 качеству точности.

Класс П — станки повышенной точности, изготовлены преимущественно на базе станков класса Н, но с более высокими требованиями к точности базовых деталей (шпиндель и его опоры, направляющие и др.).

Класс В — станки высокой точности, которая обеспечивается за счет специальной конструкции отдельных элементов, высшего качества их изготовления и использования станка в специальных условиях эксплуатации.

Класс А — станки особо высокой точности, изготовленные с более строгими допусками, чем станки класса В.

Класс С — сверхточные станки — специальные мастер-станки, предназначенные для изготовления сверхпрецизионных деталей станков, машин и приборов, от точности которых зависит получение требуемых характеристик изделия (делительные и эталонные колеса, измерительные винты и др.).

Допускаемые отклонения для регламентированных нормативами показателей точности станков при переходе от класса к классу составляют геометрическую прогрессию со знаменателем  $\phi = 1,6$ .

В западных странах применяют аналогичную градацию станков на пять классов точности: обычный (без обозначения), высокий (Н), прецизионный (Р), суперпрецизионный (SP) и ультрапрецизионный (UP).

По степени автоматизации различают: металлорежущие станки с ручным управлением, в которых пуск и останов станка, загрузка и зажим заготовки, съем обработанного изделия, переключение скоростей, подвод и отвод суппортов, стола, шпиндельной бабки и др. выполняется оператором вручную;

полуавтоматы, которые работают с автоматическим рабочим циклом, для повторения которого требуется вмешательство оператора;

автоматы, которые самостоятельно выполняют все рабочие и холостые ходы, кроме операций наладки и устранения отказов в работе. Конструктивным признаком автомата является наличие полного комплекта механизмов рабочих и холостых ходов (целевых механизмов), выполняющих все действия, необходимые для получения годных изделий.

Система полуавтоматов или автоматов, расположенных в технологической последовательности, объединенных автоматическими механизмами и устройствами для транспортирования изделий, разделения и соединения их потоков, накопления заделов, изменения ориентации, удаления отходов, а также системой управления называется *автоматической линией*.

Автоматические линии могут иметь жесткую и гибкую межагрегатную связь. При жесткой межагрегатной связи технологическое оборудование с помощью транспортных средств блокируется и работает в едином ритме. Отказ любого конструктивного элемента в этом случае может привести к отказу и простоя всей линии. При гибкой межагрегатной связи между каждой группой полуавтоматов или автоматов, встроенных в автоматическую линию, имеется автоматический накопитель заделов.

По типу применяемого оборудования автоматические линии подразделяются на линии, состоящие из универсальных, агрегатных, специализированных и специальных полуавтоматов или автоматов.

Для автоматизации мелкосерийного и серийного производства применяется гибкое автоматизированное технологическое оборудование, построенное на базе различных типов металлорежущих станков:

гибкий производственный модуль (ГПМ), являющийся единицей технологического оборудования для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик с числовым программным управлением, автономно функционирующий, автоматически осуществляющий все функции, связанные с изготовлением изделий, имеющий возможность встраивания в гибкую производственную систему;

роботизированный технологический комплекс (РТК), являющийся совокупностью единицы технологического оборудования с ЧПУ, промышленного робота и средств ос-

нащения, автономно функционирующий и осуществляющий многократные циклы. Средства оснащения могут быть: устройства накопления, ориентации, поштучной выдачи объектов производства и другие устройства, обеспечивающие функционирование РТК;

гибкая производственная система (ГПС), являющаяся совокупностью в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей, отдельных единиц технологического оборудования с ЧПУ и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающая свойством автоматизированной переналадки при производстве деталей произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик. В общем случае в систему обеспечения функционирования ГПС входят: автоматизированная транспортно-складская система; автоматизированная система инструментального обеспечения; система автоматизированного контроля; автоматизированная система удаления отходов; автоматизированная система управления технологическими процессами и др.

### 3.1.2. ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ И КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТАНКА

Основные принципы и порядок проведения оценки технического уровня продукции машиностроения определены ГОСТ 2.116-84.

Технический уровень продукции машиностроения, в том числе станков, определяется как совокупность свойств конкретного изделия, включающих показатели функционального назначения, общественного полезного эффекта, уровня всех видов затрат, а также потребительских и экономических характеристик.

Совокупность свойств, достаточно полно характеризующая то или иное изделие и пригодная для сравнительной оценки изделий одного функционального назначения, определена укрупненно для групп однородной продукции государственными стандартами системы показателей качества продукции (СПКП).

ГОСТ 4.93-86 «Система показателей качества продукции. Станки металлообрабатывающие. Номенклатура показателей» устанавливает номенклатуру основных показателей, характеризующих технический уровень металлорежущих станков, в том числе с ЧПУ, элек-

троэрозионных, электрохимических и ультразвуковых. Эти показатели включаются в ТЗ на НИР по определению перспектив развития этой продукции, в разрабатываемые и пересматриваемые стандарты, технические условия, по которым выпускаются станки.

Стандартом предусматривается применение восьми групп показателей. Каждая группа содержит, как правило, несколько показателей, позволяющих количественно охарактеризовать те или иные аспекты комплекса свойств изделия, формирующих его технический уровень. Это позволяет получать сопоставимые результаты при сравнении технического уровня станков, сходных по технологическому назначению и области применения, а также формулировать конкретные задачи и направление работ по его целенаправленное повышению.

**1. Показатели назначения** характеризуют технологические возможности станка, приспособленность станка к установке и обработке заготовок определенных размеров, массы; возможность применения на станке инструмента определенного размера; производительность обработки; точность обработки; энергопотребление; приспособленность к транспортированию и размещению; экономичность по расходу материала при производстве.

Показатели назначения включают: показатели заготовки, обрабатываемой на станке (предельные размеры и массу устанавливаемой заготовки);

показатели инструмента, устанавливаемого на станке (наибольшие размеры инструмента, наибольшая масса оправки в магазине, наличие накопителей инструмента);

показатели рабочих и установочных перемещений (наибольшее перемещение рабочих органов, дискретность задания перемещений, точность позиционирования, количество управляемых осей координат, количество одновременно управляемых осей координат);

показатели основных и вспомогательных перемещений станка (пределы частот вращения, рабочих подач, скоростей установочных перемещений подвижных органов станка);

показатели силовой характеристики станка (наибольший крутящий момент на шпинделе, мощность привода главного движения, суммарная мощность установленных на станке электродвигателей);

габаритные размеры и масса станка;

показатели точности и шероховатости обработки изделия (образца);

показатель производительности (коэффициент повышения производительности относительно сравнимой модели);

показатели технического совершенства, в том числе: средства автоматизации (перечень); оснащенность станка дополнительными устройствами и приспособлениями, расширяющими технологические возможности (перечень); класс точности станка; время автоматической смены инструмента.

**2. Показатели надежности** характеризуют безотказность, долговечность, ремонтпригодность станка, т.е. те свойства, от которых во многом зависит эффективность использования станка потребителем.

**3. Показатели экономного использования материалов и электроэнергии** характеризуют экономичность по расходу металла при производстве станков и экономичность по расходу электроэнергии при их эксплуатации.

К этим показателям относятся: удельная масса металла (кг/ед. производительности); удельный расход электроэнергии (кВт/ед. производительности).

**4. Эргономические показатели** характеризуют соответствие станка физическим возможностям человека, приспособленность станка к условиям эксплуатации с учетом требований санитарных норм.

К этим показателям относятся: уровень звука на рабочем месте; скорректированный уровень звуковой мощности.

**5. Показатели технологичности** характеризуют трудоемкость изготовления станка. В стандарте использован лишь один показатель: удельная трудоемкость изготовления станка (нормо-ч./ед. производительности).

**6. Показатели стандартизации и унификации** характеризуют ремонтпригодность станка и экономичность его изготовления, достигаемые за счет применения унифицированных узлов и деталей.

Такими показателями являются: коэффициент применяемости по составным частям (%); коэффициент применяемости по стоимости (%).

**7. Показатели патентно-правовые**, к которым относятся: показатель патентной чистоты; показатель патентной защиты.

**8. Показатели безопасности**, характеризующие обеспечение защиты человека, находящегося в зоне возможной опасности.

Термины, применяемые в стандарте, и пояснения к ним, а также пояснения к определению показателей, приведены в справочных приложениях к стандарту.

В зависимости от характера решаемой задачи сравнение станков одного технологического назначения и области применения может проводиться по любому из приведенных в стандарте показателей. Но для получения укрупненной комплексной сравнительной оценки станков ограничиваются применением основных показателей, к которым относятся:

1. Показатели назначения.
2. Показатели надежности.
3. Показатели экономного использования материалов и электроэнергии.

Количественные значения показателей, которые невозможно получить непосредственным измерением, определяются по отраслевым методикам, разрабатываемым для групп однородной продукции.

Так, коэффициент повышения производительности относительно сравниваемой модели определяется в соответствии с РД Н06-45-87 «Станки металлорежущие. Расчет производительности».

Показатели надежности — по РД 2Н00-30-87 «Станки металлорежущие. Нормы надежности».

Показателей точности — по РД 2Н72-8-87 «Оценка точности металлорежущих станков».

Удельные показатели металлоемкости и энергопотребления — по МУ РД 2Н06-34-87.

Применяемость приведенных в ГОСТ 4.93—86 показателей в различных нормативно-технических документах, сопровождающих этапы жизненного цикла изделия, также определена рассматриваемым стандартом.

Для обеспечения заданного технического уровня станка он должен удовлетворять критериям работоспособности, которые рассмотрены ниже.

Работоспособность станка — это такое его состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации (ГОСТ 27.002-89).

Геометрическая и кинематическая точность станка характеризуют точность перемещения его формообразующих узлов без силовых и тепловых воздействий. Поэтому эти характеристики связаны в основном с точностью изготовления узлов и сборки станка, т.е. с технологическими факторами. Высокие требования к точности современных станков определяют

строгие допуски на точность движения и положения рабочих органов, связанных с геометрией станка как с его исходной характеристикой.

Перечень параметров, характеризующих геометрическую и кинематическую точность станков данного типа, методы их проверки и допустимые отклонения параметров регламентируются соответствующими стандартами в разделе «Нормы точности».

Каждый стандарт содержит обычно 20—30 проверок, осуществляемых, как правило, при ручном перемещении формообразующих узлов станка или при их перемещении на малых скоростях без нагрузок и отражающих, поэтому, совершенство станка по точности с позиций его геометрии и кинематики.

Стандарты «нормы точности» включают также проверку точности и параметров шероховатости образца-изделия, конфигурация и материал которого устанавливаются стандартом. Обработку образца ведут на чистовых режимах.

Перечень проверок точности и соответствующие нормативы, указанные в стандартах, отражают специфику станков данного типа и применяемого метода обработки.

По характеру осуществляемых проверок их можно разбить на группы, указанные в табл. 3.1.4.

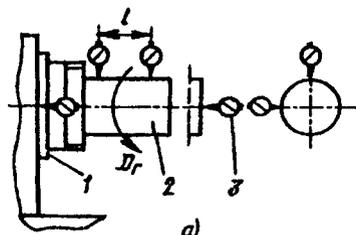
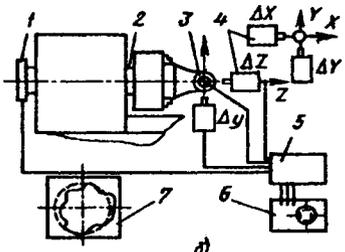
Первые четыре группы проверок (1-4) непосредственно связаны с выходными параметрами станка, т.е. с характеристиками траекторий перемещения формообразующих узлов станка. Если примененный метод измерения позволяет оценить регламентированные параметры и при рабочих режимах станка, то полученные данные будут характеризовать точность станка с учетом его силовых и тепловых деформаций. Для этой цели, обычно не пригодны контактные измерительные приборы, как правило, применяемые при проверке геометрической точности станка, и следует применять бесконтактные опикоэлектронные и другие измерительные системы.

В табл. 3.1.5 показаны схемы измерений геометрической и кинематической точности станков с применением контактных методов, предусмотренных стандартами, и современных методов, позволяющих оценить параметры траекторий формообразующих узлов станка. Приведены схемы следующих проверок точности:

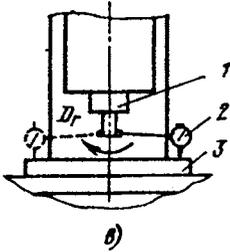
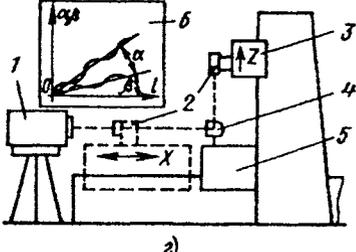
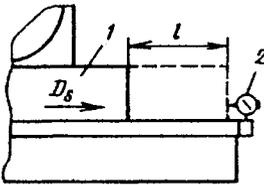
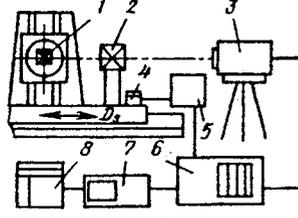
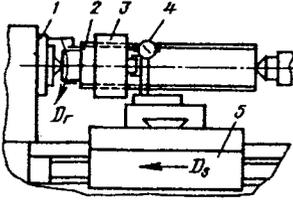
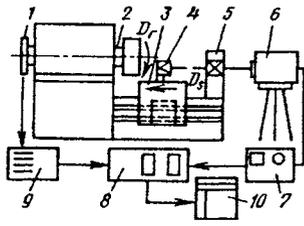
## 3.1.4. Типовые проверки точности станков

№ п.п.	Группа проверок	Примеры
1.	Точность движения	Радиальное и осевое биение шпинделя, торцовое и осевое биение планшайбы (стола). Прямолинейность перемещения суппорта (стола). Постоянство углового положения рабочей поверхности стола при его перемещении.
2.	Точность взаимного положения и движения	Параллельность движения суппорта оси шпинделя. Перпендикулярность оси шпинделя поверхности стола. Соосность или параллельность двух шпинделей. Перпендикулярность продольного и поперечного перемещения стола.
3.	Точность позиционирования (установки)	Точность перемещения стола (суппорта) в заданное положение. Точность фиксации при повороте револьверной головки (шпиндельного блока). Точность ручной установки линейных (угловых) положений рабочего органа по измерительным шкалам.
4.	Кинематическая точность	Точность передаточного отношения шпиндель-ходовой винт (токарно-винторезные станки). Точность взаимного движения продольного и поперечного перемещения крестового стола (обработка фасонных профилей). Точность взаимосвязанного поворота шпинделя и стола (зуборезные станки)
5.	Точность поверхностей, определяющих положение заготовки и инструмента	Плоскостность рабочей поверхности стола. Точность Т-образных пазов стола и их параллельность. Точность конического отверстия шпинделя. Торцовое и радиальное биение базовых поверхностей шпинделя (фланцевый конец).
6.	Точность направляющих поверхностей	Прямолинейность направляющих скольжения. Извернутость направляющих.

## 3.1.5. Схемы измерений точности станков

Группа проверки	Метод измерения	
	Контактный	Бесконтактный
Точность движения	 <p>1 — шпиндель; 2 — оправка; 3 — индикаторы (датчики) линейных перемещений</p>	 <p>1 — датчик угла поворота шпинделя; 2 — шпиндель; 3 — эталонный шарик; 4 — бесконтактные измерительные преобразователи перемещений; 5 — блок обработки данных; 6 — осциллоскоп; 7 — дисплей</p>

Продолжение табл. 3.1.5.

Группа проверки	Метод измерения	
	Контактный	Бесконтактный
Точность взаимного положения	 <p>1 — шпиндель; 2 — индикатор; 3 — стол</p>	 <p>1 — лазер; 2 — четырехквadrанный фотодиод; 3 — шпиндельная бабка; 4 — пентапризма; 5 — стол; 6 — диаграмма результатов измерения; 7 — перемещение стола или бабки; <math>\alpha</math> — отклонения от перпендикулярности; <math>\beta</math> — погрешность установки</p>
Точность позиционирования	 <p>1 — стол; 2 — индикатор</p>	 <p>1 — отражатель, установленный на шпинделе; 2 — интерферометр; 3 — лазер; 4 — датчики давления воздуха и температуры; 5 — компенсатор; 6 — лазерное вычислительное устройство; 7 — блок обработки данных; 8 — блок регистрации данных</p>
Кинематическая точность	 <p>1 — шпиндель; 2 — эталонный ходовой винт; 3 — гайка; 4 — индикатор; 5 — суппорт</p>	 <p>1 — датчик угла поворота; 2 — шпиндель; 3 — суппорт; 4 — отражатель; 5 — интерферометр; 6 — лазер; 7 — блок обработки данных; 8 — блок сравнения; 9 — блок преобразования данных, полученных с датчика 1; 10 — блок обработки и регистрации данных</p>

а) измерение радиального и осевого биения шпинделя;

б) измерение радиального и осевого биения шпинделя и траектории перемещения оси шпинделя;

в) измерение отклонения от перпендикулярности оси шпинделя относительно поверхности стола;

г) измерение отклонения от перпендикулярности двух движений (стола и шпиндельной бабки) с использованием калиброванного лазерного источника;

д) измерение точности позиционирования стола;

е) измерение точности позиционирования стола с использованием лазерного интерферометра;

ж) измерение точности передаточного отношения «шпиндель-суппорт» с помощью эталонного ходового винта;

з) измерение точности передаточного отношения «шпиндель-суппорт» с помощью лазерного интерферометра.

Контактные методы требуют во многих случаях применения специальных контрольных оправок и точной оснастки (угольники, линейки, эталонные ходовые винты и др.), вносящих дополнительные погрешности в получаемые результаты. Этими методами, как правило, измеряются предельные отклонения и они мало приспособлены для измерения параметров траекторий узлов станка. Стандартные проверки позволяют оценить лишь наличие данного параметра в пределах допуска. Бесконтактные методы измерения открывают более широкие возможности по оценке выходных параметров станка, характеризующих его точность. Они более легко позволяют автоматизировать процесс измерения и получить массив данных при многократных измерениях, фиксировать результаты графически, на дисплее или в виде протокола испытаний, перерабатывать информацию с оценкой более широкой номенклатуры показателей, характеризующих точность станка.

**Жесткость и вибростойкость станков.** Деформации узлов станка, возникающие под действием силы резания, приводят к изменению относительного положения инструмента и обрабатываемой детали, т.е. к потере станком точности. Во многих случаях эти деформации играют решающую роль в общем балансе точности станка и поэтому высокая жесткость станка необходима для создания работоспособных, производительных станков.

**Жесткость узла** называется его способностью сопротивляться появлению упругих отжатий (деформаций) под действием нагруз-

ки. Жесткость узла  $j$  может быть определена как отношение силы  $P$ , приложенной к узлу в заданном направлении, к отжатию узла  $\delta$  (Н/мкм):

$$j = \frac{P}{\delta}.$$

При этом применяются два основных способа измерения и подсчета жесткости узлов — когда деформация измеряется в направлении действия силы, и когда деформация измеряется в том направлении, которое оказывает наибольшее влияние на точность обработки и не совпадает с направлением действия силы.

Главную роль в снижении жесткости станков играют обычно деформации стыков. При контактировании небольших участков поверхностей на деформацию стыка влияет в основном шероховатость поверхности. Между давлением и деформациями обычно имеет место степенная зависимость:

$$\delta = Kp^m.$$

Значения коэффициента  $K$  и показателя степени  $m$  зависят от метода обработки поверхности и для диапазона давлений  $p = 100 \dots 500$  кПа и измерения  $\delta$  (мкм) имеют следующие значения: для грубо шабренных поверхностей —  $K = 0,5 \dots 0,65$   $m = 0,5$ ; при обычном шабрении —  $K = 0,25 \dots 0,3$   $m = 0,5$ ; при финишном строгании и шлифовании —  $K = 0,15 \dots 0,2$   $m = 0,4 \dots 0,5$ .

Измерение жесткости стыков различных узлов станка показывает, что с увеличением размера соприкасающихся поверхностей их деформация растет.

Планки, клинья и другие регулировочные элементы, выполненные в виде тонких тел, имеют повышенную деформацию (до 3 раз) по сравнению с обычными стыками.

Для измерения жесткости пользуются специальными приборами, которые включают динамометр для создания и измерения сил, действующих на узел, и приборы, регистрирующие деформации (индикаторы, датчики).

В результате испытаний обычно строится кривая жесткости в координатах нагрузка  $P$  — деформация  $\delta$ . Схема кривой жесткости показана на рис. 3.1.4.

При нагружении узла до выбранного значения силы  $P_0$  в одном направлении (кривая 0-1) и в другом направлении (кривая 2-3) узел (например, суппорт) не возвращается в исходное положение, если в соприкосновениях имелись зазоры (величина  $z$ ). При повторном нагружении кривые нагрузки со-

ответственно 2-1 и 4-3 не совпадают с кривыми разгрузки 1-2 и 3-4, образуя петли гистерезиса, площадь которых характеризует работу сил трения в стыках данного узла.

Методы оценки статической жесткости и допустимые значения деформаций определяются соответствующими стандартами «Станки металлорежущие. Нормы жесткости».

Жесткость основных узлов станков может иметь значения от  $10^4$  (суппорты) до  $3 \cdot 10^5$  (шпиндели) Н/мм.

Жесткость станин, приведенная к перемещению инструмента, велика и выражается сотнями тысяч Н/мм.

Для оценки той доли деформации, которая приходится на отдельные элементы станка, и выявления слабых звеньев строят баланс жесткости станка, когда все деформации относят к взаимному перемещению инструмента и заготовки.

В зависимости от конструкции станка и метода обработки недостаточная жесткость узлов станка может по-разному влиять на точность обработки. В одних случаях возникающие деформации непосредственно искажают размеры и форму обрабатываемой детали, в других — это влияние можно значительно уменьшить или почти исключить подналадкой станка. Часто происходит перераспределение сил, действующих на узлы в процессе обработки, что во многих случаях приведет к изменению положения узлов и, следовательно, к возникновению таких погрешностей обработки, которые трудно устранить подналадкой станка.

Помимо статической точности на работоспособность станка существенное влияние оказывает его вибростойкость.

Возникновение в станках быстропротекающих колебательных процессов (вибрации) отрицательно сказывается на точности и качестве поверхности обрабатываемых деталей, а также нередко уменьшает долговечность станка и снижает его технологические возможности.

Основные причины, вызывающие колебания в станках, и соответственно виды колебательных процессов следующие.

**Вынужденные колебания** появляются под действием внешней периодической возмущающей силы, возникшей, например, из-за прерывистого процесса резания (рис. 3.1.5, а), дисбаланса вращающихся деталей (ротора электродвигателя, шпинделя с заготовкой (рис. 3.1.5, б); погрешностей в передачах, особенно в зубчатых, когда вход в зацепление каждого зуба сопровождается ударом. Колебания могут передаваться также извне от других станков или машин.

Устранение причин, вызывающих вынужденные колебания, связано, в первую очередь, с уменьшением возмущающих сил (балансировка деталей, повышение точности передач) а также с повышением жесткости станков.

**Параметрические колебания** возникают при наличии какого-либо переменного параметра, создающего эффект, аналогичный действию переменной силы. Обычно таким параметром является переменная жесткость детали или узла, например наличие шпоночной канавки на валу или переменная жесткость подшипников качения (рис. 3.1.5, в, г). Это приводит к тому, что при вращении вала при постоянной внешней силе  $P$  прогибы вала будут периодически меняться.

**Автоколебания при резании** являются наиболее характерной формой колебательных процессов в станках. Автоколебания (незатухающие самоподдерживающиеся колебания) характеризуются тем, что силы, поддерживающие колебания системы, возникают в самом процессе колебаний.

Существует целый ряд теорий, объясняющих происхождение сил, поддерживающих автоколебательный процесс. Так, согласно так называемой теории координатной связи, траектория движения реза относительно заготовки имеет форму эллипса (рис. 3.1.5, д). На участке движения реза  $BnA$  сила резания  $P$  производит положительную работу, так как её направление почти совпадает с направлением движения реза, а на пути  $AmB$  — отрицательную работу. Так как на пути  $BnA$  сила резания в среднем больше, чем на пути  $AmB$  из-за большей глубины резания, то в течение одного полного цикла колебания эта сила совершит некоторую положительную работу, поддерживающую колебательный процесс.

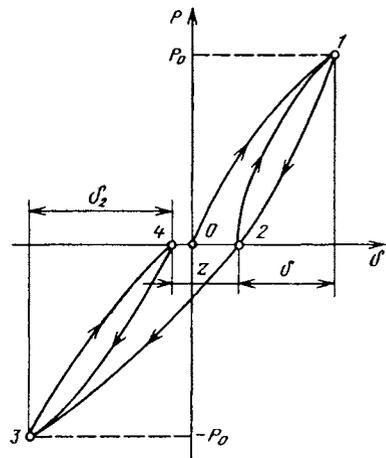


Рис. 3.1.4. Кривая жесткости

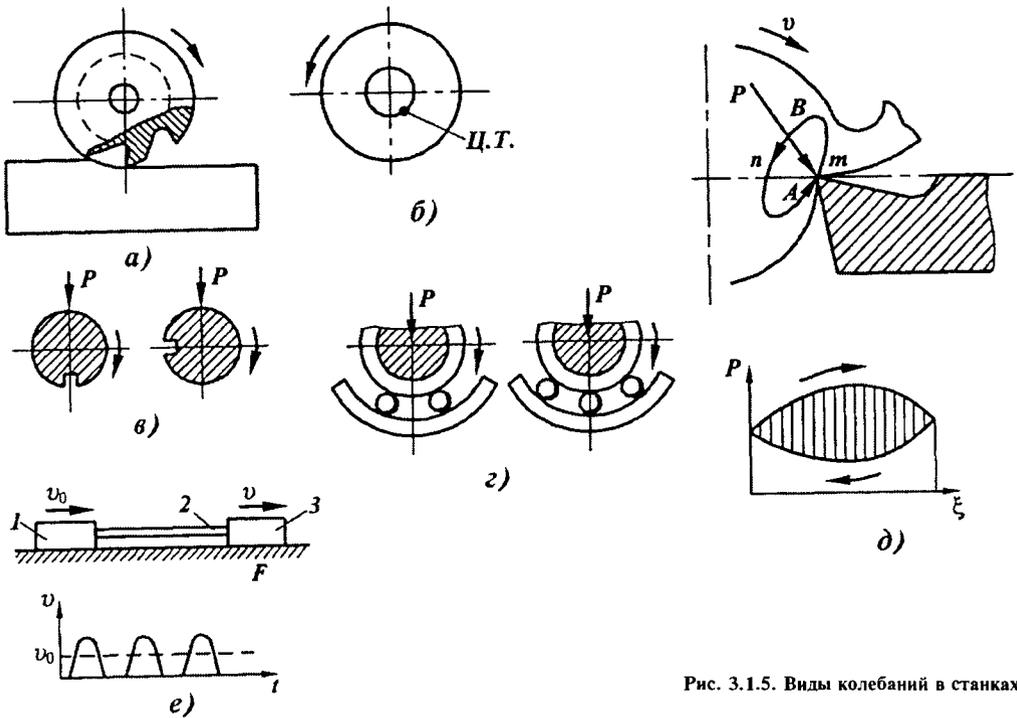


Рис. 3.1.5. Виды колебаний в станках

Эта работа характеризуется площадью диаграммы силы резания  $P$  — перемещение реза  $\xi$ .

Если система станка устойчива, то фазовый сдвиг между колебаниями реза в радиальном и тангенциальном направлениях таков, что движение вершины реза по эллипсу будет происходить в направлении обратном, показанному на рис. 3.1.5, *д*. В этом случае силы резания будут оказывать демпфирующее действие на колебания и площадь эллипса будет характеризовать величину рассеяния энергии.

Автоколебания возникают обычно с частотой, близкой к частоте собственных колебаний узлов и деталей. Поэтому в станках наблюдаются высокочастотные колебания, соответствующие частоте собственных колебаний реза ( $f = 2000 \dots 6000$  Гц), колебания средней частоты, соответствующей частоте собственных колебаний шпинделя ( $f = 200 \dots 300$  Гц) и низкочастотные колебания суппортной группы ( $f = 80 \dots 150$  Гц) или обрабатываемой детали.

**Фрикционные автоколебания.** Причина этих колебаний заключается в переменности силы трения в направляющих элементах; они могут возникать при перемещении столов, суппортов и других узлов станка.

Одной из причин фрикционных автоколебаний является то, что сила трения покоя  $F_0$  больше силы трения движения  $F$ , и зависит от продолжительности неподвижного контакта.

Эти явления способствуют возникновению релаксационных (прерывистых) автоколебаний при медленных перемещениях узлов (рис. 3.1.5, *е*). При малой равномерной скорости перемещения  $v_0$  ведущего звена 1 будет происходить деформация передаточного звена 2 и движение ведомого звена 3 начнется лишь тогда, когда будет преодолена сила сопротивления  $F_0$ . Как только начнется движение, сила трения резко уменьшится, так как  $F < F_0$  и ведомое звено под действием потенциальной энергии сжатого звена 2 получит перемещение с переменной скоростью  $v$  и остановится. Далее циклы скачков будут повторяться во времени  $t$ .

Основными методами повышения вибростойкости станка и всей технологической системы являются повышение жесткости узлов, качества и точности механизмов, выбор рациональных режимов обработки.

Большое влияние на точность станка оказывают тепловые деформации его узлов, приводящие к относительным линейным и угловым смещениям рабочих органов, несущих заготовку и режущий инструмент.

Имеется две группы источников нагрева узлов и механизмов станка: внутренние и внешние.

К первой группе относятся: а) собственные источники тепла: из-за потерь на трение в узлах и механизмах станка (подшипники, муфты, тормоза, направляющие, уплотнения); тепло, выделяемое в электродвигателях, электрических приборах, в устройстве ЧПУ, в гидросистеме станка; б) процесс резания: тепло передаваемое узлам станка при нагреве режущего инструмента, заготовки, приспособления, а также стружкой и СОЖ.

Ко второй группе относятся: нагревательные и осветительные приборы в цехе, солнечные лучи; тепло от соседнего оборудования, колебания температуры фундамента станка; потоки теплого и холодного воздуха при нестабильной температуре воздуха по высоте цеха; изменение времени года, климатических условий места работы станка.

Во времени  $t$  тепловые деформации  $\delta$  протекают обычно по экспоненциальному закону

$$\delta = c(1 - e^{-\alpha t}),$$

где  $c$  и  $\alpha$  — коэффициенты, зависящие от конструкции и материала узла.

С течением времени значение тепловых деформаций стабилизируется (теоретически при  $t \rightarrow \infty$  значение  $\delta \rightarrow c$ ), однако период их интенсивного проявления занимает, как правило, несколько часов.

Влияние тепловых деформаций узлов станка на точность обработки деталей может быть снижена двумя группами способов:

а) на основе отвода или дополнительного подвода тепла узлам станка: принудительным охлаждением узлов станка и масла в гидросистеме; подводом тепла к узлам станка для быстрой стабилизации температуры нагрева и тепловых деформаций; стабилизацией температуры окружающей среды (создание термостатных цехов); б) без отвода и подвода тепла узлам станка: конструктивно-

компоновочными способами; путем коррекции относительных смещений узлов станка из-за тепловых деформаций, проводимой с использованием системы ЧПУ станка.

Значительное влияние на точность станков оказывает износ элементов.

Износу подвергаются многие сопряжения станков — направляющие скольжения и качения, ходовые винты, диски фрикционных муфт, узлы трения различных механизмов, шпиндельные опоры и др. Износ приводит к потере станком точности, к росту динамических нагрузок, падению КПД, увеличению тепловыделения и к другим явлениям, ухудшающим начальные показатели станка. Основные методы борьбы с износом: применение износостойких материалов, смазка поверхностей, изоляция поверхностей от загрязнения, выбор рациональных конструктивных форм, сопряжений, компенсация износа и др. Смазка трущихся поверхностей, станков является одним из основных методов повышения их долговечности и увеличения КПД станка, а также уменьшения шума и вибраций. Слой смазки устраняет непосредственный контакт двух поверхностей, благодаря чему не только значительно уменьшаются силы трения, но и создаются условия для устранения или резкого уменьшения износа поверхностей.

Большинство сопряжений станков работает в условиях неполной смазки, когда между поверхностями возникает граничное трение (слой смазки порядка 0,1 мкм и менее) или полужидкостное трение. В этом случае износ поверхностей значительно меньше, чем при отсутствии смазки, но избежать полностью его нельзя, так как может быть непосредственный контакт трущихся тел.

Применение смазки, износостойких материалов, целесообразных конструктивных решений и рациональных методов эксплуатации должно обеспечить высокую износостойкость ответственных сопряжений станков. Классы износостойкости по скорости изнашивания  $\gamma$  (мкм/ч) и примеры сопряжений станков приведены в табл. 3.1.6.

3.1.6. Классы износостойкости материалов по скорости их изнашивания

Класс	$\gamma$ , мкм/ч	Примеры
0	$< 5 \cdot 10^{-5}$	Шпиндельные подшипники скольжения, гидрораспределители
1	$\leq 10^{-4}$	
2	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	Зубчатые передачи, кулачковые механизмы, ходовые винты и гайки качения
3	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$	
4	$\leq 8 \cdot 10^{-4}$	Направляющие станков, ходовые винты скольжения
5	$\leq 1,6 \cdot 10^{-3}$	
6	$\leq 3,2 \cdot 10^{-3}$	Фрикционные муфты
7	$\leq 6,4 \cdot 10^{-3}$	
8	$\leq 1,25 \cdot 10^{-2}$	Режущий инструмент. В станках не допускается
9	$> 1,25 \cdot 10^{-2}$	

**Надежность** является одной из основных характеристик качества как металлорежущих станков и станочных систем, так и многих других машин и технических комплексов.

Для оборудования особое значение имеет обеспечение его технологической надежности, которая непосредственно связана с качеством выпускаемой продукции.

Основные понятия и определения в области надежности приведены в ГОСТ 27.002—89.

*Надежность* — это свойство объекта сохранять во времени свою работоспособность. Это сложное свойство, которое в зависимости от требований к длительности работы объекта, условий его применения и методов эксплуатации состоит из безотказности и долговечности.

Период времени, в течение которого работает данный объект (станок, механизм или узел), исчисляется либо в отработанных часах (наработка), либо в календарных часах (время работы).

*Безотказность* — это свойство объекта непрерывно сохранять свою работоспособность, т.е. рассматривается такой период работы станка, когда не осуществляются мероприятия для поддержания его работоспособности (ремонт, смазка, проверка состояния, регулировка и т.д.).

*Долговечность* — это свойство объекта сохранять свою работоспособность в течение всего периода эксплуатации при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Здесь допускаются и учитываются те перерывы в работе станка, которые запланированы системой ремонта и т.д.

Продолжительность эксплуатации станков связана как с их моральным износом (появление более эффективных моделей), так и с физическим износом (возрастание затрат на их эксплуатацию и ремонт).

Для современных станков средних размеров это обычно 5...10 лет эксплуатации и для более сложных и тяжелых станков 15...20 лет и выше. Конкретный срок для каждого станка должен устанавливаться на основании экономических расчетов.

Основным показателем надежности является *вероятность безотказной работы*  $P(t)$ , т.е. вероятность того, что в заданном интервале времени  $t = T$  (или в пределах заданной наработки) отказ объекта не возникает.

Допустимая величина  $P(t)$  характеризует степень опасности отказа, и поэтому чем выше его значение, тем, при прочих равных условиях, станок будет работать более надежно.

Для оценки надежности может применяться достаточно широкая номенклатура показателей, которая для различных изделий машиностроения рассмотрена в ГОСТ 27.003—90. Для станков наиболее целесообразно применять показатели, представленные в табл. 3.1.7.

Ресурс станка связан с потерей станком точности (ресурс станка по точности) и либо назначается ( $T_p$ ), либо определяется при заданном значении  $\gamma = P(t)\%$ .

Запас надежности  $K_n$  устанавливается или определяется для нового станка по выходным параметрам точности и показывает, насколько фактические параметры, определяющие точность станка, удалены от заданных предельных состояний, при которых наступит отказ по точности.

Надежность станка связана с отказами, которые могут быть двух основных видов.

Отказ функционирования приводит к тому, что станок или его механизм не может выполнять возложенные на него функции. Часто отказ функционирования связан с поломками или заклиниванием отдельных элементов изделия. Это предельное, как правило, недопустимое состояние станка.

Параметрический отказ приводит к выходу параметров (характеристик) изделия за допустимые пределы. Для современных станков наиболее характерны параметрические отказы, связанные с высокими требованиями к точности обработки.

Методы повышения надежности станка весьма разнообразны, основные направления конструкторских и технологических решений приведены в табл. 3.1.8.

### 3.1.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНКОВ

Металлорежущие станки выпускаются станкостроительными предприятиями, которые в основном имеют четко выраженную предметную специализацию.

Приведенные ниже в таблицах данные технических характеристик отечественных металлорежущих станков имеют тенденцию к изменению в направлении повышения их производительности, точности, мощности привода главного движения, повышения частот вращения шпинделя и скоростей перемещения рабочих органов на холостых ходах.

В наиболее широко выпускаемых токарных и многоцелевых станках с ЧПУ частоты вращения шпинделя возрастут соответственно до 6000...8000 мин<sup>-1</sup> и 8000...10000 мин<sup>-1</sup>, а мощность привода главного движения возрастет в среднем в 1,5...2 раза.

3.1.7. Номенклатура показателей для оценки надежности станков

Наименование показателя	Обозначение	Примечание
Вероятность безотказной работы	$P(t)$	При установленном значении $P(t) = \gamma\%$ продолжительность работы $t = T_\gamma$ — гамма-процентный ресурс
Ресурс (установленный)	$T_p$	Определяется периодом работы до капитального (среднего) ремонта или назначается
Запас надежности по выходному параметру	$K_n$	Определяется для нового станка ( $K_n > 1$ ); оценивает потенциальные возможности станка по сохранению работоспособности
Коэффициент технического использования	$K_{т.и}$	Допустимые значения $K_{т.и}$ определяются нормативами системы ремонта и технического обслуживания
Наработка на отказ (средняя)	$T_{о.ср}$	Значение $T_{о.ср}$ определяет параметр потока отказов $\omega = 1/T_{ср}$

3.1.8. Конструкторские и технологические решения повышения надежности станков

Конструкторское или технологическое решение	Примеры
<b>Сопrotивляемость:</b> конструкция	Портальные конструкции станин, ребра жесткости. Разгрузка направляющих. Устройства для компенсации износа направляющих и опор
технология	Повышение точности изготовления и сборки ответственных деталей и узлов
материалы	Применение износостойких материалов. Антифрикционные покрытия направляющих. Термообработка и повышение твердости зубчатых передач, направляющих и др. пар трения
смазка	Шпиндельные опоры и направляющие с гидростатической смазкой. Аэростатические опоры. Смазка масляным туманом. Специальные смазки с присадками
<b>Изоляция:</b> вибрации	Виброизолирующие фундаменты и опоры
тепло	Покpытия с демпфирующей способностью
внешняя среда	Термоконстантные помещения. Охлаждение жидкостей гидросистем. Системы отвода тепла (обдув, тепловые трубы) Изоляция источников тепловыделения Щитки и "меха" для защиты направляющих. Устройства очистки от запыленности, механизмы удаления стружки
<b>Автоматика:</b> быстро протекающие процессы	Автоматическая балансировка шпинделя с заготовкой в процессе обработки. Управление силой трения в направляющих стола прецизионных станков
процессы средней скорости	Автоматическая компенсация деформаций. Автоматическая подналадка режущего инструмента и правка шлифовального круга. Создание направленного теплового поля
медленные процессы	Автоматическая компенсация износа. Автоматическая очистка трущихся поверхностей

Во всех группах металлорежущих станков с ЧПУ в 1,5...2 раза повысится точность позиционирования рабочих органов за счет применения новых систем ЧПУ и более точных линейных и круговых измерительных преобразователей систем обратной связи.

Зарубежное станкостроение имеет ряд особенностей. Хотя большинство станкостроительных фирм специализируется на выпуске определенных типов металлорежущих станков (токарных, фрезерных, сверлильно-расточных, многоцелевых станков, зубообрабатывающих, шлифовальных и др.), выпуск этих станков производится небольшими партиями, но при достаточно широком диапазоне их типоразмеров и модификаций.

При выборе покупаемого металлорежущего станка или комплектующих узлов для него и фирмы, производящей их, необходимо учитывать следующие факторы:

технические параметры предлагаемого металлорежущего станка (размеры обрабатываемых изделий, величину ходов рабочих органов, диапазон частот вращения шпинделя и подач рабочих органов, количества управляемых координат, точностные характеристики и др.);

дизайн покупаемого станка (общий вид, компоновку, цвет, удобство обслуживания и доступа к отдельным узлам станка и др.);

возможный комплект поставки (приспособлений, оправок, режущих инструментов, устройств, расширяющих технологические возможности станка и др.);

возможность получения вместе со станком разработанного технологического процесса обработки заданной группы изделий с

обоснованным и согласованным с заказчиком необходимым комплектом приспособлений, режущего и вспомогательного инструмента;

стоимость станка и условия платежа за станок: оплата всей стоимости станка сразу при его заказе; части стоимости, например, 20 % при заказе, а остальное — после его поставки; оплата части станка после его поставки, а остальное — в рассрочку;

срок поставки станка; возможность производителя изготовить станок по техническим требованиям заказчика, с учетом его специфических требований, соответствия стандартам страны заказчика, представления фирмой технической документации на станок необходимой комплектности и изложение её на языке заказчика;

гарантия качества станка, его соответствие требованиям техники безопасности;

участие поставщика в техническом обслуживании станка при запуске и в процессе эксплуатации (запуск станка у заказчика, условия поставки запасных деталей и узлов: только в период гарантированной работы, в любой период эксплуатации станка, поставка запасных деталей и узлов бесплатно или за отдельную плату);

возможность проведения изготовителем последующего ремонта станка и необходимой модернизации после его длительной эксплуатации.

В табл. 3.1.9 — 3.1.32 приведены технические характеристики основных групп и типов отечественных и ряда зарубежных металлорежущих станков, осуществляющих обработку лезвийным инструментом.

**3.1.9. Токарные одношпиндельные автоматы продольного точения и токарно-револьверные автоматы (размеры в мм)**

Параметр	1M06B и 1M06A	1M10B и 1M10A	1T16B	1E110 и 1E110П	1E116 и 1E116П	1E125 и 1E125П	1E140 и 1E140П	1E165 и 1E165П
Диаметр обрабатываемого прутка, не более	6	10	16	10	16	25	40	65
Длина подачи прутка, не более	60	80 и 100	80 и 140	70	70	110	110	125
Размер нарезаемой резьбы по стали, не более	M4	M5	M8	M10	M12	M18	M27	M30
Диаметр отверстия для крепления инструмента в револьверной головке	—	—	—	20	20	32	32	40

Продолжение табл. 3.1.9

Параметр	1М06В и 1М06А	1М10В и 1М10А	1Т16В	1Е110 и 1Е110П	1Е116 и 1Е116П	1Е125 и 1Е125П	1Е140 и 1Е140П	1Е165 и 1Е165П
Ход револьверного продольного суппорта, не более	—	—	—	60	60	100	100	120
Ход поперечных суппортов, не более	—	10—20	18—40	32	32	45	45	60
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup> , не более:								
левого вращения	1400-10000	900-8000	450-6300	112-5000	90-4000	125-4000	80-2500	40-1600
правого вращения	—	—	—	56-630	45-500	63-500	40-315	20-250
Мощность главного привода, кВт	1,5	2,2	3,0	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5
Габаритные размеры (без поддерживающей трубы):								
длина	1250	1460	1900	1690	1760	2160	2160	2160
ширина	810	870	945	775	775	1000	1000	1200
высота	1450	1450	1520	1585	1585	1510	1510	1700
Масса (без электрошкафа и поддерживающего устройства для прутка), кг	650	840	1200	1330	1330	2200	2210	2855

**3.1.10. Токарные многошпиндельные горизонтальные прутковые автоматы и патронные полуавтоматы (размеры в мм)**

Параметр	1В225-6	1Б240-6К	1Б265-6К	1Б290-6К	1Б240П-6К	1Б26П-6К	1Б290П-6К
Диаметр, не более:							
обрабатываемого прутка	25	40	65	100	—	—	—
патрона	—	—	—	—	150	160	200
Длина, не более:							
подачи прутка	150	180	200	250	—	—	—
обработки	—	—	—	—	160	175	200
Ход поперечных суппортов, не более:							
нижних	40	80	80	125	80	80	125

Продолжение табл. 3.1.10

Параметр	1Б225-6	1Б240-6К	1Б265-6К	1Б290-6К	1Б240П-6К	1Б26П-6К	1Б290П-6К
верхних	40	80	80	100	80	80	100
заднего среднего	40	80	70	125	80	80	125
отрезного	30	50	70	65	—	—	—
Ход продольного суппорта, не более:	160	180	200	275	180	200	275
Частота вращения шпинделей, мин <sup>-1</sup> :							
нормальное исполнение	280-3000	140-1600	73-1065	70-660	80-1140	78-805	42-617
быстроходное исполнение	600-4400	140-2500	73-1590	70-930	80-1610	78-1160	42-900
Подача на оборот, не более:							
продольного суппорта	2,3	6,6	3,2	5,9	6,6	2,5	5,9
поперечных суппортов	0,7	3,3	1,4	1,4	3,3	1,1	1,4
Длительность быстрого хода, с	1,5	2	3,5	3,7	2	3,06; 4,86	3,7
Мощность главного привода, кВт	11	15	30	30—40	17	30	30—40
Габаритные размеры:							
длина	5700	6170	6265	7945	4330	4675	4785
ширина	1276	1750	1830	2465	1600	1690	2160
высота	1700	1985	2170	2425	1985	2170	2475
Масса, кг	6000	10000	14500	22000	9000	14500	18400

Примечания: 1. Выпускаются автоматы и полуавтоматы четырех-, шести- и восьмишпиндельные.

2. Четырехшпиндельные автоматы имеют четыре поперечных и один продольный суппорт, остальные автоматы имеют шесть поперечных и один продольный суппорт.

3. Шести- и восьмишпиндельные автоматы могут выпускаться с длиной индексацией, т.е. они могут работать соответственно как два трехшпиндельных или два четырехшпиндельных автомата.

## 3.1.11. Токарно-винторезные и токарные станки

Размеры в мм

Параметр	16Т02А	ТВС-100У	М250	16Б16А	16А20Ф3	ТВ380	16Д20	МК-6056	1М63Н-3	16К30Ф3	16К40	1Н65	1А660Ф3
Диаметр обрабатываемой детали, не более:													
над станиной	125	125	280	320	320	380	400	500	630	630	800	1000	1250
над суппортом	75	100	178	180	200	215	210	275	350	320	490	650	800
Диаметр прутка, проходящего через отверстие шпинделя, не более	8	14	35	36	50	38	62	—	—	—	—	85	—
Длина обрабатываемой детали, не более	250	180	—	750	900	—	750; 1000; 1500	1000	3000	1400	3000	3000	6000; 8000; 10000
Диапазон частот вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	320-3200	30-3500	52-2000	20-2000	20-2500	14-2800	8,5-2000	16-2000	10-1250	6,3-1600	10-1250	5-500	0,4-200
Перемещение суппорта, не более:													
продольное	65	185	—	700	905	1000	750; 1000; 1500	—	—	—	3000	2710; 4980	—
поперечное	60	115	—	210	210	260	300	—	—	—	445	600	—
Дискретность перемещений:													
продольных	—	—	—	—	0,001	—	—	—	—	0,001	—	—	0,001
поперечных	—	—	—	—	0,001	—	—	—	—	0,001	—	—	0,001
Мощность электродвигателя главного привода, кВт	0,27	4,0	1,5	2,8/4,6	7,5/11	7,5	11	7,5/11	15	30	18,5	22	110
Габаритные размеры:													
длина	695	1700	1630	2280	3700	2680	2880	2800	5200	5290	5350	6140	12728
ширина	520	1180	859	1060	2260	1230	1270	1265	1780	3470	1860	2200	3285
высота	300	1480	1170	1485	1650	1420	1605	1485	1550	2150	1625	1770	2245
Масса, кг	350	1750	520	2100	4000	2000	2900	3100	5750	7850	6200	12800	46700

## 3.1.12. Токарно-револьверные станки

Размеры в мм

Параметр	1М110 1М116	1Е316П	1Д325П	1Г340ПЦ	1М365	1А425	1П426ДФ3	1Е365ПФ30	1В340Ф30	1325Ф30
Диаметр устанавливаемой детали, не более										
над станиной	—	250	320	400	500	250	500	500	400	320
над суппортом	—	—	—	—	—	—	250	250	200	—
Диаметр обрабатываемого прутка	10 16	18	25	40	65	—	65	65	40	25
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	63-5000 50-4000	100-4000	80-3150	45-2000	34-1500	50-1250	36-1800	31,5-2000	45-2500	90-4000
Число управляемых координат всего (одновременно)	—	—	—	—	—	—	2 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)
Дискретность задания перемещений:										
по оси X	—	—	—	—	—	—	0,005	0,005	0,005	0,005
по оси Z	—	—	—	—	—	—	0,01	0,01	0,01	0,01
Тип устройства ЧПУ	—	—	—	—	—	—	2У22-61	НЦ-31	НЦ-31	НЦ-31
Мощность электродвигателя главного привода, кВт*1	4	1,9/ 3	3,2/5,3	7,1/8,5	15	7,5	18,5	15	7,1/8,5	6
Габаритные размеры:										
длина	1725	4020	4015	4855	5000	2570	7235	4800	4640	4355
ширина	885	920	1000	2250	1500	1650	2355	1700	2450	1177
высота	1460	1250	1500	2050	1739	2150	2655	1950	1780	1700
Масса, кг	1490	1203	1635	3450	4285	4950	9320	4200	3600	2600

\*1 В виде дроби указаны мощности приводов разного исполнения

## 3.1.13. Токарные станки и модули с числовым программным управлением

Размеры в мм

Параметр	1П717Ф3	1П420ПФ40	1716ПФ4	1725РФ3	1713Ф3	РТ-777Ф3	1740РФ3	1П756ДФ3
Диаметр детали, устанавливаемой, не более:								
над станиной	200	200	320	400	400	630	630	630
над суппортом	—	—	160	250	250	400	400	500
Длина обрабатываемой детали, не более	100	125	750	1000	710	1600	1400	320
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	16-2000	25-2500	8-4000	25-2500	125-1250	20-2400	16-1600	8-1600
Число управляемых координат: всего (одновременно)	2 (2)	3 (3)	3 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	—
Дискретность задания перемещений:								
по оси X	0,005	0,0005	0,001	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002
по оси Z	0,01	0,001	0,001	0,01	0,01	0,001	0,001	0,002
Мощность электродвигателя главного привода, кВт *	6/9	30	6/9	30	22	45	37	22
Габаритные размеры:								
длина	3020	3150	6800	4585	3164	5550	4930	3200
ширина	3330	2262	2900	2175	1345	2750	2310	3500
высота	1860	2300	2100	2800	2185	2470	3050	2600
Масса, кг	3185	5700	5600	7500	5230	9000	11600	8700

\* В виде дроби указаны мощности приводов разного исполнения

### 3.1.14. Прецизионные токарные станки с ЧПУ фирмы «Schaublin» (Швейцария)

Параметр	102-CNC	110-CNC	130-CNC
Диаметр прутка, обрабатываемого в цанге, мм, не более	14,5	14,5; 19; 24	36
Диаметр заготовки, устанавливаемой над суппортом, мм, не более	75	115	520
Высота центров, мм	102	—	—
Расстояние между центрами, мм	300	300	300
Мощность главного привода, кВт, не более	4	5,5	14
Частота вращения шпинделя (бесступенчатая), мин <sup>-1</sup>	30—5000	30—6000	30—5000
Перемещение суппортов по осям X/Z, мм, не более	150/300	220/300	210/375
Рабочие минутные подачи по осям X и Z, мм	0—2000	0—5000	0—6000 (X) 0—10000 (Z)
Скорость быстрых перемещений суппортов по осям X/Z, м/мин	4/5	6/10	6/12
Дискретность перемещения по оси X, мм* <sup>1</sup>	0,001/0,0005	0,0005/0,00005 (по радиусу)	0,0005 (по радиусу)
Дискретность перемещения по оси Z, мм* <sup>1</sup>	0,001/0,0005	0,001/0,0001	0,001
Число позиций в револьверной головке	—	8	12
Масса станка, кг	1100	1340	4000

\*<sup>1</sup> Для разных исполнений

3.1.15. Прецизионные токарные станки с ЧПУ  
фирмы «Boley» (Германия)

Параметр	BKN 100E	BDN160 R-ZB	DUO 3030
			DUO 4230
<i>Рабочий шпиндель 1:</i>			
диаметр заготовки, обрабатываемой в цанге, мм, не более	30	42	30/42
диаметр зажимного патрона, мм	100—130	140	130/140
мощность главного привода, кВт	8,7	11	12
частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	50—6300	50—6300	50—6300
<i>Рабочий шпиндель 2:</i>			
диаметр заготовки, обрабатываемой в цанге, мм, не более	30	42	30/42
диаметр зажимного патрона, мм	70	70	70
мощность главного привода, кВт	4,4	4,4	6
частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	1—3000	1—300	1—4000
Перемещение суппорта 1 по осям X/Z, мм, не более	170/200	120/350	170/230
Перемещения рабочего шпинделя 2 по осям U/W, мм, не более	170/200	0/350	205/230
Рабочие минутные подачи суппорта и рабочего шпинделя 2 по осям X, Z, U, W, мм	1—1000	1—1000	1—1500
Перемещение задней бабки, мм	—	100 (для исп. R60)	—
Число позиций в револьверной головке* <sup>1</sup>	2 × 12	16	2 × 12/2 × 16
Масса станка, кг	2300	3300	4300

\*<sup>1</sup> Для разных исполнений

## 3.1.16. Токарные станки с ЧПУ с револьверными

Параметр	Фирма и						
	«Маho Graziano»		«Cincinnati Milacron»	«Monforts»	«Georg Ficher»		«Okuma
	GR300C	GR500C	CINTURN1400	MNC5	NDM-16	NDM-40	ACT4X
Диаметр детали, устанавливаемой над станиной, мм, не более	370	650	483	500	500	620	540
Диаметр детали, устанавливаемой над суппортом, мм, не более	310	430	318	280	300	410	390
Расстояние между центрами, мм	655	1000 1500 2250	—	—	—	—	750
Длина обтачива- ния, мм, не более	—	—	—	750 1250	500 1000	1300 2300	730
Диаметр зажим- ного патрона, мм	—	—	203; 305	—	—	—	—
Мощность глав- ного привода, кВт	15	37; 53	22; 37; 60	34	40	30	22; 30
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup> , не более	5000	2500	5000	6000	4000	3200	3500
Перемещения суппортов по осям X/Z, мм	250/620	Верхнего 320/2340, нижнего 220/1340	200/610	220/840	—	—	245/750
Ход пиноли зад- ней бабки, мм	125	140	—	—	120	120	—
Число позиций в револьверной го- ловке	12	2 × 12	2 × 8	2 × 12	12	12	Верхней 12, нижней 8
Скорость быстро- го перемещения суппортов, м/мин	X — 10 Z — 13	X — 15 Z — 18	—	10	10	10	—

головками (с наклонной компоновкой суппортов)

модель

«Biglia»		«Heid»	«Heinemann»			«Voest-Alpine»		«Heyligen staedt»
B131/S1	B600	S300	DN300	DN600	MOС2000	WNC500S-MT	WNC700S-MT	5UK
520	560	540	690	1230	870	540	750	650
—	—	—	530	980	600	450	610	330
800	800	—	—	—	—	1000 1600 2000	1250 2000 3000	985
420	650	1820	—	—	1250 1750 3000	—	—	850
—	—	315	—	—	500	200 315	315 630	315
15	26	53	63	100	50	35; 60,5	60,5; 118	53
4150	3200	4000	4000	1500	2800	6000	3150	5000
190/420	225/—	—	—	—	Верхней 520/—, нижней 310/—	305/1345	480/1808	—
—	—	—	150	150	—	125, 160	160, 220	140
12	12	2 × 12	12	10	Верхней 12, нижней 8	2 × 12	2 × 12	12
12	12	—	10	10	—	—	—	15

## 3.1.17. Токарные станки с ЧПУ с револьверными

Параметр	Фирма и					
	«Colchester»		«Ramo»	«Index»		
	CNC350	CNC6000	TN2	GSC42	GB65	GU
Диаметр детали, устанавливаемой над станиной, мм, не более	400	760	310	—	—	—
Диаметр детали, устанавливаемой над суппортом, мм, не более	290	520	160	—	—	—
Диаметр обработки, мм, не более	186	—	—	42	65	250
Длина обтачивания, мм не более	350	—	—	—	—	1200
Диаметр отверстия шпинделя, мм	58	168	42	—	—	65
Диаметр зажимного патрона, мм	—	—	132	100	160	250
Мощность главного привода, кВт	5,5; 7,5	26	10	10,5	19	42
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	120—6000	100—1000	5000, 8000	31,5—6300	50—5000	4000
Перемещение суппорта по осям X/Z, мм	—	—	150/500	Для первой головки 100/200 Для второй головки 80/140	20/200	—
Число позиций в револьверной головке	12	—	—	2 × 12	8	—
Скорость быстрых перемещений суппортов, м/мин	X — 10 Z — 15	10	—	—	7	—

головками (с наклонной компоновкой суппортов)

модель

«Traub»				«Gildemeister»	
TNA480	TNS 30D	TNS60	TND300	N.E.F.CT40	GT50
660	390	—	400	400	—
345	200	450	170	225	—
—	140	180	—	—	—
1000	220	490	500	600/1000	—
—	30	60/65	42	72	50
315	140	200	160/175	—	160
34; 41	16; 24,6	19; 22	18	22	12
4000	8000	10—4000	56—5600	20—4000	4500
285/1070	140/220	168/490	180/550	260/640	450
1-ая 14 2-ая 8	2 × 12	12	12	12	2 × 12
X — 10 Z — 15	16	X — 10 Z — 15	X — 10 Z — 15	10	X — 10 Z — 15

## 3.1.18. Вертикальные одно- и двухшпиндельные токарные станки с ЧПУ

Параметр	Фирма и модель				
	«Minganti»		«Pittler»		
	MV512/MV524	MV812/MV824	PV500	PV800	PV1500
Число шпинделей	1/2	1/2	1 или 2	1 или 2	1 или 2
Диаметр детали, устанавливаемой на станке, мм, не более	600	900	700	1000	1500
Мощность главного привода, кВт	36,45	45,75	37,55	55,90	90,150
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup> , не более	2500	1000	2500	1600	630
Перемещения суппортов по осям X/Z, мм, не более	510/460	720/615 510/460	500 или 1800 450	700 или 2500 630	700/800
Инструментальная система: число позиций в револьверной головке	4 — 6 — 8 — 12		4 — 6 — 8 — 12		4 — 5
емкость инструментального магазина	16 — 24 — 60 — 240				

## 3.1.19. Фронтальные токарные станки с ЧПУ

Параметр	Фирма и модель							
	«Pittler»		«Enag»		«Heyligenstaedt»		«Minganti»	
	Petra 1	Petra 2	MSC 12	MSC 22	FD 180	FD 250	TS 6	TS 8
Диаметр детали, устанавливаемой на станке, мм, не более	295	600	260	410	200	280	250	350
Диаметр зажимного патрона, мм	130, 160, 200	250, 315, 400, 500	160, 200, 250	250, 315, 400	200	280	160, 250	315, 400
Расстояние между шпинделями, мм	300 или 350	До 1300	270 или 540	420 или 840	—	—	700	870
Мощность главного привода (один шпиндель), кВт	До 45	55	25	45	60	75	30	45
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup> , не более	6300	4000	5000	3200	6300	5600	6000	3200
Перемещение суппортов по осям X/Z, мм, не более	315/280	500/400	410/270	710/355	370/300	370/300	330/330	380/380
Скорость быстрого перемещения суппортов, м/мин	12	12	15	10	14	14	15	15

### 3.1.20. Двухшпиндельные токарные станки с ЧПУ (с соосной компоновкой шпинделей)

Параметр	Фирма и модель		
	«Biglia»		«Heyligenstaedt»
	B2M	B2M-4A	Heynutwin 250
Диаметр обработки, мм, не более	355	355	280
Длина обработки, мм, не более	650	—	—
Расстояние между шпиндельными бабками, мм	1736	2588	—
Мощность главного привода, кВт	24	30	53
Частота вращения шпинделей, мин <sup>-1</sup>	60—3500	60—2200	До 5000
Перемещение суппорта по осям X/Z, мм, не более	225/1050	225/610	—
Скорость быстрого перемещения суппортов по осям X/Z, мм, не более	10/12	10/12	До 24
Число позиций в револьверных головках	2 × 8	2 × 12	20 — на наружной, 10 — на внутренней
Габаритные размеры станка (длина × ширина × высота), мм	5700 × 2400 × 2000	6600 × 2400 × 1900	3840 × 2300 × 2230
Масса станка, кг	5200	9800	—

### 3.1.21. Координатно-расточные станки

Размеры в мм

Параметр	2431СФ10	2Е450АФ1-1	2Е460АФ1	24К60АФ4	24К70АФ4	2Е470АФ1
Размеры рабочей поверхности стола	320×560	630×1120	1000×1600	1000×1600	1600×2500	1400×2240
Перемещение стола:						
продольное	400	1000	1400	1600	2000	2000
поперечное	250	630	1000	1000	1600	1400
Диаметр растачивания, не более	220	—	—	320	320	—
Точность установки координат	0,002	0,006	0,008	0,001	0,001	0,01
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	20—4000	10—2000	10—2000	6,3—3150	6,3—3150	10—2000
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	—	7,2	8,5	12	12	8,5
Габаритные размеры:						
длина	2410	3350	4650	7150	8000	6000
ширина	2000	2500	3760	4560	6000	4445
высота	1580	2885	4500	4590	5300	4940
Масса, кг	3250	8000	18000	26750	36500	32500

## 3.1.22. Горизонтально-расточные станки

Параметр	Размеры в мм						
	2614Ф1	2622Ф1	2В622Ф4	2А636Ф2	2А637Ф2	ИР2637ПФ4	2П637МФ4
Размеры рабочей поверхности стола	800×1000	1120×1250	1250×1250	1600×1800	1600×1800	1600×1800	1600×2000
Диаметр шпинделя	80	110	125	125	160	160	160
Перемещение шпиндельной бабки в продольном направлении	500	1000	710	1000	1000	1000	1000
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	200—1600	10—1250	6—2000	6,3—1250	5—1000	5—1000	2—1600
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	6,7	11	28	22	22	26—30	36
Габаритные размеры:							
длина	3680	5700	6050	8160	8160	8120	8300
ширина	2600	3200	4130	5622	5622	5700	7200
высота	2600	3000	3980	5135	5135	6050	4450
Масса, кг	7500	12500	17500	33945	33337	36900	41900

## 3.1.23. Многоцелевые станки с ЧПУ с вертикальной компоновкой шпинделя

Параметр	Размеры в мм						
	21104П7Ф4	ГДВ500-01	2254ВМФ4	400V	СМ213В	2С150ПМФ4	
Размеры рабочей поверхности стола	630×400	500×1000	400×630	400×900	630×1320	500×1000	
Перемещение рабочих органов стола, не более							
по оси X	630	800	500	560	1250	800	
по оси Y	400	540	500	400	800	500	
по оси Z	630	530	500	460	500	750	
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	30—3000	20—6000	40—2500	80—8000	20—800	28—3500	
Число управляемых координат: всего (одновременно)	4 (3)	4 (3)	8 (4)	3 (3)	3	—	
Тип устройства ЧПУ	2С42	2С42	2С42	—	—	—	
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	7,5	11	6,3	5,5	8	11	
Габаритные размеры:							
длина	3420	5015	3320	2330	7900	3085	
ширина	2850	3000	2475	2620	4750	2680	
высота	3190	3052	3235	2640	3800	3490	
Масса, кг	8000	9000	7850	3700	21950	5595	

3.1.24. Многоцелевые станки с ЧПУ с горизонтальной компоновкой шпинделя

Параметр	Размеры в мм				
	ИР200ПМФ4	2202ВМФ4	6902ПМФ2	ИР320ПМФ4	ГД400ПМ1Ф4
Размеры рабочей поверхности стола	200 × 200	280 × 280	320 × 250	320 × 320	400 × 400
Перемещение рабочих органов станка, не более					
по оси X	360	320	320	400	400
по оси Y	240	320	320	360	630
по оси Z	320	320	320	400	630
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	50—7100	50—3150	50—2500	13—5000	60—6000
Вместимость инструментального магазина, шт	—	30	30	36	—
Число управляемых координат всего/одновременно	—	4/2	4/2	4	—
Тип устройства ЧПУ	Комбинированное		Размер 2М	Бош Микро 5	Комбинированное
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	5,5/6,2	5,5	3	7,5	8,5
Габаритные размеры:					
длина	3840	4500	4450	3840	4410
ширина	3020	2800	4100	2300	3230
высота	2560	2770	1900	2507	3010
Масса, кг	7180	6300	4000	10000	10600
Параметр	ОП2Г04МФ4М	ИР500МФ4	2204ВМФ4	ИР800МФ4	ЛР395ПФ4М
Размеры рабочей поверхности стола	400 × 500	500 × 500	∅ 630	800 × 800	1250 × 1250
Перемещение рабочих органов станка, не более					
по оси X	630	800	500	1000	2000
по оси Y	500	500	500	710	1400
по оси Z	500	500	500	800	1000
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	10—4000	21,2—3000	40—5000	21,2—3000	8—2000
Вместимость инструментального магазина, шт	—	30	30	30	—
Число управляемых координат всего (одновременно)	5 (3)	3 (2)	8 (4)	3 (2)	5 (4)
Устройство ЧПУ	Фанук БМ-Е	Комбинированное	2С42	Комбинированное	
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	7,5	14	6,3	14	25
Габаритные размеры:					
длина	3600	4450	3470	5388	87500
ширина	2360	4655	2900	4635	7960
высота	2950	3100	2825	3445	4500
Масса, кг	17000	11370	7250	12850	35000

## 3.1.25. Многоцелевые станки с ЧПУ

Размеры в мм

Параметр	Фирма и модель											
	«Mori Seiki»	«Hitachi Seiki»	«Whali»	«Scharmann»	«Huller Hille»		«Mikron»		«Dixi»	«Schaublin»		
	MH-50	HC500	53	Solon I	nb-h90	nb-h twin	WF21D	WF51J	280CNC	32CNC	34CNC	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Размеры рабочей зоны перемещения:												
по X	800	710	700	800	630	800	450	710	800	520	700	
по Y	650	630	500	650	500	500	400	500	800	320	500	
по Z	750	560	700	650	580	630	400	460	800	320	500	
Размеры палеты (или стола)	500 × 500	500 × 500	400 × 400 500 × 400	650 × 650	400 × 500	500 × 630	350 × 700	500 × 1000	630 × 630	—	—	
Мощность главного привода, кВт	15	—	10	20	13	27	3,3/4	4,5/6	18,5	5	5	
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	6000	20—3600	7000	14—3500	25—6000	28—6000	40—4000		10—3000	30—7000	30—7000	
Рабочие минутные подачи по трем осям, мм	—	—	—	1—6000	1—10000	1—10000	2—3000		—	0—5000	0—5000	
Скорость быстрых перемещений рабочих органов, м/мин	—	—	15	12	22	15	6	6	10	10	10	
Число инструментов в магазине	60—2000	40	24—192	40, 60, 80	99—203	2 × 20	40	40	—	32	32 или 64	
Время смены инструмента (от реза до реза), с	—	—	7	—	8	10	—	—	—	8	8	

Продолжение табл. 3.1.25

Параметр	Фирма и модель										
	«Saimp»	«Werner und Kolb»	«Novat»	«Heller»	«Ixon»	«Cincinnati Milacron»	«Deckel»		«Mandelli»	«MaHo»	
	Маста 6	ТС630	КВФ1000	BEA05	BEA2	30СNC W	ТС-30	DC-30	DC55	Mandelli 7	МС505
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Размеры рабочей зоны перемещения:											
по X	820	1000	2500	500	800	600	1000—1200	500	1000	1000	600
по Y	760	800	1000	400	630	350 (400)	1000—1500	400	800	800	400
по Z	760	800	1400 (1900)	560	630	600 (700)	1000	500	800	850 (1050)	500
Размеры паллеты (или стола)	630 × 630	630 × 630, 630 × 800	3000 × 1000	400 × 400	500 × 630	—	—	400 × 400, 400 × 500	630 × 630, 630 × 800	630 × 630, 630 × 800	500 × 400
Мощность главного привода, кВт	18/22	32	18	36	36	10,8	22,5	11,8	35	30	15
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	20—4500	20—5000	10—2250	45—6000	45—4000	40—7000	20—4000	1—7000	1—6000	30—6000	20—8000
Рабочие минутные подачи по трем осям, мм	5—6000	0—10000	10—2000	0—10000	10—10000	—	1—4000	1—20000	10—18000	10—18000	1—6000
Скорость быстрых перемещений рабочих органов, м/мин	15	15	7,5	12	15	—	12	15	20	18	15
Число инструментов в магазине	50, 100	50, 60, 72	40	40	40	12 (24)	60—140	40—148	40—160	40—160	62 или 120
Время смены инструмента (от реза до реза), с	13	11,5	—	6	8	9	15	—	—	—	—

## 3.1.26. Зубофрезерные полуавтоматы для цилиндрических колес

Размеры в мм

Параметр	5303ПТ	5303П и 5303В	5304В	5К301П	53А20	53А30П	53А50	53А80
Диаметр обрабатываемой детали, не более	20	50	80	125	200	320	500	800
Модуль нарезаемых колес, не более	1	1	1,5	2,5	6	6	8	10
Длина зуба нарезаемых прямозубых колес, не более	50	50	100	100	180	220	350	350
Диаметр устанавливаемых червячных фрез, не более	32	40	80	100	125	160	200	200
Расстояние:								
от торца стола до оси фрезы (или между торцами шпинделя изделия и пиноли)	75—125	120	45—170	100—250	160—410	160—410	195—595	195—595
от оси инструмента до оси шпинделя изделия	5—45	5—45	10—88	20—135	25—200	30—250	60—350	80—500
Осевое перемещение фрезы, не более	—	—	50	50	170	75	180	180
Частота вращения шпинделя инструмента, мин <sup>-1</sup>	400-4000	400-4000	200-1600	100—500	75—500	50—400	40—405	40—405
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	1,1	1,1	1,5	2,2	7,5; 8,5	3,2; 4,2	8; 10; 12,5	8; 10; 12,5
Габаритные размеры:								
длина	810	810	1215	1320	3150	2300	2670	2897
ширина	750	750	1195	812	1815	1500	1810	1810
высота	1340	1335	1620	1820	2300	1950	2250	2250
Масса, кг	680	680	2100	1720	6800	6800	9850	10800

Примечание. Полуавтоматы 5303ПТ, 5303П и 5303В — горизонтальные; остальные полуавтоматы — вертикальные.

## 3.1.27. Зубодолбежные полуавтоматы

Параметр	Размеры в мм			
	5111	5122В	5140	5М150
Диаметр устанавливаемой детали, не более	80	200	500	800
Ширина нарезаемого венца зубчатого колеса, не более	20	50	100	160
Модуль нарезаемого колеса, не более	1	4,5	8	12
Номинальный диаметр устанавливаемого долбяка	40	100	100	200
Число двойных ходов инструмента в минуту	250—1600	200—850	65—450	33—188
Круговая подача на двойной ход, мм	0,016—0,4	0,14—0,75	0,14—0,75	0,2—1,5
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	1,1	2,1; 3,0	4,0; 4,5	4,8; 5,7; 7,5
Габаритные размеры с выносным оборудованием:				
длина	1635	2610	1900	4200
ширина	1090	1110	1450	1800
высота	1705	2145	2450	3300
Масса, кг	1770	4500	4400	10800

## 3.1.28. Зубообрабатывающие полуавтоматы для прямозубых конических колес

Параметр	Размеры в мм			
	5Т23В	5С268	5С277П	5С286П
Диаметр обрабатываемого колеса при передаточном отношении пары 10:1, не более	125	320	500	800
Модуль обрабатываемых колес, не более	1,5	8	12	16
Ширина зубчатого венца, не более	16	—	80	125
Число зубьев нарезаемых колес	12—200	8—50	10—150	10—150
Частота двойных ходов резцов в минуту	210—820	—	—	34—167
Частота вращения дисковых фрез (или инструментального шпинделя), мин <sup>-1</sup>	—	10,5—20	20—80	—
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	1,1	10	5,5	7,5
Габаритные размеры:				
длина	1620	2700	3075	3235
ширина	1050	2375	1975	2180
высота	1415	2075	2200	2470
Масса, кг	3000	9000	15000	15000

Примечание. Полуавтомат 5С277П — зубофрезерный, автомат 5С268 — зубопро-  
тяжной; остальные полуавтоматы — зубострогальные.

## 3.1.29. Фрезерные широкоуниверсальные (инструментальные) станки

Размеры в мм

Параметр	6712В и 6712П	ВМ130М	УФ-200	6Б75В и 6Б75ВФ1	676П	6Т10	ВМ-127М
Размеры рабочей поверхности основного вертикального стола	125 × 320	160 × 500	200 × 630	200 × 500	250 × 630	260 × 850	400 × 1600
Перемещения вертикального стола, не более:							
продольное	200	250	250	320	400	560	1000
вертикальное	250	300	280	320	380	355	400
шпиндельной бабки	125	200	145	200	250	—	—
гильзы вертикальной головки	40	—	—	60	60	—	80
Угол поворота вертикальной головки, °, не более	± 90	± 45	± 45	± 90	± 90	± 45	± 45
Частота вращения шпинделей, мин <sup>-1</sup> :							
горизонтального	63—3150	45—2000	95—1625	40—2240	50—1630	—	—
вертикального	63—3150	63—2800	110—1860	40—2240	63—2040	50—2240	—
Размеры рабочей поверхности углового универсального стола	125 × 400	—	200 × 500	200 × 500	200 × 630	—	—
Диаметр рабочей поверхности круглого стола	160	—	250	250	250	—	—
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	0,75	3,0	2,2	1,5	2,2	3,0	15
Габаритные размеры:							
длина	2260	1400	—	3700	1285	1505	2680
ширина	2000	1100	—	1975	1215	1900	2260
высота	1320	1720	—	1695	1780	1808	2500
Масса, кг	560	980	—	1452	910	1340	4250

## 3.1.30. Поперечно-строгальные станки

Размеры в мм

Параметр	7А311	7Е35	7307Д	7Д36	7310Д
Длина хода ползуна	10—200	500 (max)	150—710	150—710	150—1000
Размер рабочей поверхности стола	200 × 200	360 × 500	450 × 710	450 × 710	560 × 1000
Перемещение стола, не более					
горизонтальное	250	530	710	700	800
вертикальное	150	310	345	320	420
суппорта (вертикальное)	70	170	200	200	200
Частота движения ползуна, дв.ход/мин	53; 71; 106; 212	13,2—150	—	—	—
Скорость ползуна, м/мин	—	—	3—48	3—48	3—48
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	0,8—1,5	5,5	7,5	7,5	11
Габаритные размеры:					
длина	1380	2350	2850	2850	3700
ширина	800	1230	1645	1680	1835
высота	1395	1550	1890	1840	1920
Масса, кг	650	2000	3400	3400	4400

Примечание. Станки 7А311 и 7Е35 — с механическим приводом; остальные станки — с гидравлическим приводом.

## 3.1.31. Долбежные станки

Размеры в мм

Параметр	7А412	7Д430	7Д450	7410
Длина хода долбяка	10—100	120—320	120—500	1200 (max)
Расстояние от наружной плоскости резцедержателя до стойки (вылет)	320	615	710	1150
Диаметр рабочей поверхности стола	360	—	—	1250
Перемещение стола, не более:				
поперечное	350	650	800	1400
продольное	280	510	650	1000
Скорость долбяка на рабочем ходу, м/мин	—	3—38	3—38	2—30
Подача стола за один двойной ход долбяка:				
продольная	0,1—1	0,2—2,5	0,2—2,5	0,2—10
поперечная	0,1—1	0,1—2,5	0,1—2,5	0,2—10
круговая, °	0,067—0,67	0,1—1,4	0,1—1,4	0,2—10
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	0,8—1,5	10	10	55
Габаритные размеры:				
длина	1950	3030	3540	6070
ширина	980	2175	2890	4335
высота	1825	3010	3465	5300
Масса, кг	1200	5700	8200	30000

Примечание. Станки 7Д430 и 7Д450 — с гидравлическим приводом, остальные станки — с электроприводом.

### 3.1.32. Горизонтальные и вертикальные протяжные полуавтоматы для внутреннего и наружного протягивания

Размеры в мм

Параметр	7Б55	7Б56	7Б57	7Б64	7Б65	7Б68	7Б76	7Б77
Тяговая номинальная сила, кН	100	200	400	50	100	800	200	400
Длина хода салазков, не более	1250	1600	2000	1000	1250	1600	1250	1600
Размер рабочей поверхности опорной плиты	450 × 450	450 × 450	560 × 560	—	—	—	—	—
Скорость рабочего хода протяжки, м/мин	1,5—11,5	1,5—13	1,0—6,15	1,5—11,5	1,5—11,5	1,0—8	1,5—13	1,0—7,9
Скорость обратного хода протяжки, м/мин (рекомендуемая)	20—25	20—25	20—25	20	20	10	20	16
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	18,5	30	37	11	22	80	30	57
Габаритные размеры:								
длина	6340	7200	9400	2875	3292	4550	4310	4650
ширина	2090	2135	2500	1350	1333	2760	1392	2070
высота	1910	1910	1910	3640	4540	5870	3370	4350
Масса, кг	5200	7450	13500	5050	8080	22200	10785	21000

## Примечания:

1. Горизонтальные полуавтоматы 7Б55, 7Б56 и 7Б57 — для внутреннего протягивания.
2. Вертикальные полуавтоматы 7Б64, 7Б65 — для внутреннего протягивания, а полуавтоматы 7Б68, 7Б76 и 7Б77 — для наружного протягивания.

В табл. 3.1.33 — 3.1.36 приведены технические характеристики основных типов металло-режущих станков, осуществляющих обработку абразивным инструментом.

## 3.1.33. Круглошлифовальные станки

Размеры в мм

Параметр	3У10В	3А110В	3М153А	3Т153Е	3У12УА	3М163В	3У142	3М174Е	3М197
Размеры устанавливаемой детали, не более									
диаметр	100	140	140	140	200	280	400	400	800
длина	160	200	500	500	500	1400	1000	2000	6000
Высота центров над столом	80	115	90	90	125	160	240	210	615
Продольное перемещение стола, не более	200	250	500	500	500	1400	1000	2000	4300
Размеры шлифовального круга, не более									
наружный диаметр	250	250	500	500	400	750	600	750	750
высота	20	25	50	63	40	200	63	100	100
Перемещение шлифовальной бабки, не более	60	60	100	90	125	290	290	365	250
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	1,1	2,2	5,5	7,5	3	13	7,5	30	25
Габаритные размеры (с приставным оборудованием):									
длина	1360	1880	3070	4455	2300	5026	6310	6710	16075
ширина	1715	2025	2400	2700	2400	2930	2585	3100	3775
высота	1690	1750	2075	2000	1600	2170	1982	2100	2450
Масса (с приставным оборудованием), кг	1980	2000	4200	4000	3500	9220	7600	11500	43400

## 3.1.34. Внутришлифовальные станки

Размеры в мм

Параметр	3К225В	3К227В	3К228В	3К229В
Диаметр устанавливаемой детали, не более	200	400	560	800
Длина устанавливаемой детали при наибольшем диаметре отверстия, не более	50	125	200	320
Длина шлифования, не более	—	125	200	320
Диаметр шлифуемых отверстий	3—25	5—150	50—200	100—400
Ход стола, не более	320	450	630	800
Угол поворота бабки изделия, °, не более	45	45	30 (min)	30 (min)
Диаметр и высота шлифовального круга, не более	25 × 25	80 × 50	180 × 63	200 × 63
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>				
внутришлифовального шпинделя	20000—100000	9000; 12000; 18000; 22000	4500; 6000; 9000; 12000	3500; 4500; 6000
шпинделя бабки изделия	280—2000	60—120	100—600	40—240
шпинделя торцошлифовального приспособления	11500	5600	4000	4000
Мощность электродвигателя привода шлифовального круга (или бабки изделия), кВт	0,76	4	5,5	7,5
Габаритные размеры (с приставным оборудованием):				
длина	2225	2815	4005	4630
ширина	1775	1900	2305	2405
высота	—	1750	1870	2000
Масса (с приставным оборудованием), кг	2800	4300	6900	8600

## 3.1.35. Плоскошлифовальные станки с круглым столом

Размеры в мм

Параметр	ЗД740А	ЗД754	ЗД741А	ЗП756Л
Диаметр устанавливаемой детали, не более	30—400	20—400	50—800	40—1000
Высота обрабатываемой детали (при номинальном диаметре шлифовального круга), не более	160	200	200	350
Высота детали с наименьшим диаметром, шлифуемого на столе, не более	40	20	50	40
Масса обрабатываемой детали, кг, не более	100	2 50	200	200
Диаметр магнитного стола, не более	400	400	800 200	1000
Продольное перемещение стола, не более	400	380	560	555
Продольная подача на оборот стола, мм	8—30	—	12—44	—
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>				
шлифовального круга	1630	1500	1330	1000
стола	15—180	10—56	8—96	5—30
Мощность электродвигателя привода главного движения, кВт	7,5	15	11	30
Габаритные размеры (с приставным оборудованием):				
длина	2350	2030	4200	2840
ширина	2700	1880	2580	2535
высота	2300	2215	2570	2565
Масса (с приставным оборудованием), кг	5300	5000	9700	10300

## 3.1.36. Плоскошлифовальные станки с крестовым (прямоугольным) столом

Размеры в мм

Параметр	3Е710А	3Е710В-1	3Е711В-1	3Е711ВФ3-1	3Е721ВФ3-1	3Д722Ф2	3Д723	3П725	3Д732Ф1
Размеры рабочей поверхности стола	400 × 125	250 × 125	400 × 200	400 × 200	630 × 320	1250 × 320	1600 × 400	2000 × 630	800 × 320
Размер обрабатываемых деталей, не более	400×125×320	250×125×200	400×200×320	400×200×320	600×320×320	1250×320×250	1600×400×400	2000×630×630	800×320×400
Масса обрабатываемых деталей, кг, не более	150	50	150	150	300	700	1000	1500	800
Расстояние от оси шпинделя до зеркала стола, не более	420	300	445	445	550	—	625	880	—
Перемещения стола и шлифовальной бабки, не более:									
продольное	490	320	490	490	710	1260	1900	—	1550
поперечное	170	160	255	250	390	410	410	660	—
вертикальное	—	200	—	320	400	415	415	645	400
Мощность электродвигателя главного привода, кВт	4	1,5	4	7,5	7,5	15	17	30	22
Габаритные размеры (с приставным оборудованием):									
длина	2560	1310	2380	3030	3500	4450	4600	6050	4020
ширина	1980	1150	1955	2360	3500	2190	2170	2800	2130
высота	1790	1550	1915	2080	2090	2360	2130	2860	2558
Масса (с приставным оборудованием), кг	2300	1000	3380	3780	6360	8000	9000	15500	8350

В табл. 3.1.37 приведены технические характеристики ряда электроэрозионных, ультразвуковых и электрохимических копировально-прошивочных станков.

3.1.37. Электроэрозионные, ультразвуковые и электрохимические копировально-прошивочные станки

Размеры в мм

Параметр	4Г721М	4Д722АФЗ	4Е723	4Е724	4А611	4Д772Э	4422	4А423ФЦ
Размеры рабочей поверхности (или диаметр) стола	200 × 360	400 × 630	400 × 630	800 × 1120	400 × 630	320	250 × 400	400 × 630
Масса обрабатываемой детали, кг, не более	60	100	750	2500	500	100	100	450
Площадь обработки (по стали), мм <sup>2</sup> , не более	1500	3000	25000	50000	—	1200	—	30000
Перемещения, не более: стола (или головки относительно стола):								
продольное	250	400	400	800	—	160	260	—
поперечное	160	250	250	500	380	160	190	—
шпиндельной (или ультразвуковой) головки	—	280	200	300	500	200	200	—
шпинделя	100	150	200	200	100	50	—	—
Производительность (по стали), мм <sup>3</sup> /мин, не более	250	500	4000	6000	—	5000 (стекло) 300 (твердый сплав)	6000	6000
Точность отсчета координат	0,01	0,001	0,01	0,01	—	0,01	—	—
Объем бака для рабочей жидкости, л	70	110	600	1200	85	—	1000	—
Потребная мощность, кВт, не более	4,4	12,5	30,6	56,6	4	6,8	25	70,55
Габаритные размеры:								
длина	760	1875	3625	4310	984	3000	6090	5880
ширина	865	1580	3000	3600	935	2080	3000	4060
высота	1630	2600	2470	3030	1725	2150	—	2950
Масса, кг	1040	4400	4900	8300	880	2200	10000	12500

Примечания: 1. Станки 4422 и 4А423ФЦ — электрохимические; станок 4Д772Э — ультразвуковой, остальные станки — электроэрозионные. 2. Станок 4А611 — прошивочный для удаления остатков сломанного инструмента.

### 3.1.4. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКАМИ

Управление металлорежущими станками представляется как воздействие на его механизмы и устройства для выполнения требуемого технологического процесса обработки заготовки с заданными точностью, производительностью и себестоимостью обработки.

В обобщенном виде управление станком состоит из получения информации о цели управления, результатах управления (перемещения рабочих органов, срабатывании различных механизмов), анализа полученной информации, выработки решения и исполнения принятого решения.

Управление станком может выполняться оператором (вручную) или без его непосредственного участия — системой автоматического управления.

Управление вручную упрощается, а доля участия оператора в нем снижается при применении *устройств цифровой индикации и управления (УЦИУ)*.

Исходя из возможностей, УЦИУ классифицируются по следующим уровням автоматизации станков:

измерительный уровень (И), когда УЦИУ выполняет только функции отсчета перемещений;

уровень выдачи рекомендаций оператору станка (Р), когда УЦИУ имеет функцию предварительного набора перемещений. В этом случае оператор набирает требуемые величины перемещений рабочих органов, а затем перемещает их вручную до достижения нулевых показаний на цифровом табло УЦИУ;

уровень выдачи оператору рекомендаций, записанных в программе (РП), когда на цифровом табло по программе высвечиваются требуемые величины и направления перемещения и оператор вручную их обрабатывает;

управляющий уровень (У), когда УЦИУ имеет функции предварительного набора перемещений и их автоматической отработки. Оператор в этом случае только дает команду, а станок обрабатывает заданные перемещения; при этом команды позиционирования выдает УЦИУ;

управляющий программный уровень (УП), когда УЦИУ работает автоматически по программе, т.е. выполняет функции, аналогичные функциям устройства числового программного управления (УЧПУ).

Кроме режимов работы, отвечающих разным уровням автоматизации, УЦИУ может иметь также и другие режимы, например, записи программы, самодиагностирования и т.д.

По функциональным возможностям УЦИУ подразделяются на две группы:

1) УЦИУ общего назначения без ориентации их технологических функций на определенную группу станков, выполняющие только простейшие функции цифрового отсчета величин перемещений.

2) УЦИУ, функционально ориентированные на определенный тип станков.

Наряду с отечественными УЦИУ мод. Ф5071, Ф5147, Ф5290, Ф5291, Ф5095, Ф5134, Ф5246 и др. широко применяются УЦИУ, выпускаемые фирмами «Heidenhain» (Германия), «Sony Magnescale» (Япония), «RSF Elektronik» (Австрия), «Tri-onics» (США), «Bauschand Lomb» (США) и др.

В табл. 3.1.38 приведены технические характеристики некоторых отечественных и зарубежных УЦИУ.

Для обозначения отечественных металлорежущих станков с УЦИУ в наименовании модели станка добавляется индекс Ф1.

При автоматическом управлении металлорежущим станком функции его управления выполняет система автоматического управления (САУ), работающая по заранее составленной управляющей программе (УП), вводимой в систему управления с помощью соответствующего программноносителя.

Функционирование станка при автоматическом управлении определяется его структурой и алгоритмом управления, заложенным в данную систему управления. При этом структура станка определяет его состав и связь между рабочими органами, вспомогательными механизмами и устройствами. Алгоритм управления, по которому работает система управления, предписывает последовательность выполнения различных функций управления станком.

Под управляющей программой (УП) понимают совокупность команд на языке программирования, соответствующую заданному алгоритму функционирования станка по обработке конкретной заготовки. УП включает, как правило, три категории команд:

технологические, обеспечивающие управление перемещениями рабочих органов станка с заданными подачами на требуемые расстояния в процессе обработки;

цикловые — переключение скоростей, подач, выбор и смену инструментов, смену палет с заготовками, включение и отключение подачи охлаждающей жидкости, контроль точности обработки и др.;

служебные, или логические, обеспечивающие правильность отработки станком всех указанных выше задаваемых ему команд.

### 3.1.38. Технические характеристики некоторых устройств цифровой индикации и управления

Параметр	Отечественной разработки					Фирмы «Heidenhein» (Германия)			
	Ф5147	Ф5291	Ф5134	Ф5246	ЛюМО-11	VRZ316	VRZ753	VRZ965	TNC13
Уровень автоматизации	И	И	У	У	УП	И	И	РП	УП
Число координат	1; 2	1	1; 2	1	2; 3	1	3	3	3
Дискретность отсчета, мкм	1; 10	1; 10	1; 10	1; 10	2; 10	5; 10	5; 10	5; 10	5
Наличие опорной точки	—	+	—	+	+	+	+	—	—
Наличие коррекции инструмента	—	—	+	+	+	—	—	+	+
Число кадров программы	—	—	—	—	100	—	—	400	500
Тип измерительного преобразователя	Сельсин, индуктосин	Индуктосин	Сельсин, индуктосин	Сельсин	Фотоэлектрический импульсный				
Габаритные размеры:									
длина	200	325	200	325	460	262	270	289	281
ширина	80	80	80	140	230	82	221	290	274
высота	135	300	190	340	210	302	155	188	221

Примечания: 1. Знак «+» — функция предусмотрена, знак «—» — не предусмотрена.

2. Габаритные размеры УЦИУ мод. Ф5147 и Ф5134 указаны без учета размеров блока преобразования.

Носитель данных, на котором записана УП, называют программноносителем. В качестве программноносителя могут использоваться кулачки, копиры, линейки с упорами, перфоленты, магнитные ленты, а также запоминающие устройства различного типа.

*Для автоматического управления металлорежущими станками применяются:*

1. Системы управления с распределительным валом (РВ) и кулачками, где управляющая программа задается в аналоговом виде — в виде рабочих и командных кулачков, устанавливаемых на РВ в соответствии с разработанной циклограммой.

2. Копировальные системы управления, где управляющая программа также задается в аналоговом виде — в виде копира. Выпуск металлорежущих станков с данными системами управления практически прекращен в связи с расширяющимся применением станков с более эффективными системами числового программного управления.

3. Системы циклового программного управления (ЦПУ), в которых управляющая программа задается в двух частях:

размерная информация в аналоговом виде — в виде путевых упоров, устанавливаемых на сменных линейках;

цикловая информация — в цифровом виде, путем набора на пульте управления.

Отдельные металлорежущие станки с системами ЦПУ не выпускаются из-за возможности применения более эффективных систем числового программного управления. Данные системы управления применяют в основном для управления в агрегатных станках и различных автоматических линиях.

4. Системы числового программного управления (ЧПУ), в которых вся информация управляющей программы задается в цифровом виде или вводится с помощью перфоленты, или набирается на пульте непосредственно оператором и вводится в память системы управления, или подается от ЭВМ более высокого уровня управления.

Системы автоматического управления строятся на механической, гидравлической, пневматической, пневмогидравлической, электрической, электрогидравлической и электронной основах.

Наибольшее применение в современных металлорежущих станках получили системы управления с РВ и кулачками и системы ЧПУ. При этом первая группа систем управления применяется в основном для управле-

ния токарными станками: в автоматах продольного точения, в токарно-револьверных автоматах, в многошпиндельных автоматах и полуавтоматах (см. табл. 3.1.9 и 3.1.10).

Системы ЧПУ применяют для управления практически всех групп и типов металлорежущих станков.

Числовым программным управлением металлорежущим станком в соответствии с ГОСТ 20523 называют управление обработкой заготовки на станке по управляющей программе, в которой данные заданы в цифровой форме.

Под системой ЧПУ понимают совокупность функционально взаимосвязанных и взаимодействующих технических и программных средств, обеспечивающих числовое программное управление станком.

Основой системы ЧПУ является *устройство ЧПУ (УЧПУ)*, выдающее управляющие воздействия на исполнительные органы станка в соответствии с УП и информацией о состоянии управляемого станка. Для выполнения функций управления УЧПУ должно иметь в своем составе следующие взаимосвязанные и взаимодействующие составные части: технические средства; программное обеспечение, включающее системное (при необходимости), технологическое и функциональное.

*По структуре построения различают УЧПУ двух видов:*

1. Аппаратные (типа NC — Numerical Control);

2. Программируемые (типа CNC — Computerized Numerical Control)

Аппаратным УЧПУ называют устройство, алгоритмы работы которого реализуются схемным путем и не могут быть изменены после изготовления устройства. Данные устройства ЧПУ построены по принципу цифровой модели, где все операции, составляющие алгоритм работы, выполняются параллельно с помощью отдельных цепей или устройств (блоков), реализующих ту или иную функцию (агрегатно-блочное построение). Поэтому изменять структуру этих ЧПУ можно только путем перепайки схем. Дополнительные функции в таких УЧПУ должны предусматриваться заказчиком уже на стадии их проектирования. Ограничивается вмешательство оператора в обработку управляющей программы.

*Основные типы аппаратных УЧПУ:*

а) для токарных станков — "Контур-2ПТ", Н22;

б) для фрезерных станков — "Контур-ЗП", НЗЗ;

в) для координатно-расточных станков — "Размер-2М", ПЗЗ;

г) для шлифовальных станков — Ш-111М, П-111;

д) для электроэрозионных станков — «Контур-2П-67» и др.

Системы ЧПУ, построенные на основе аппаратных УЧПУ, могут быть позиционными, контурными и комбинированными.

При применении позиционной системы ЧПУ перемещение рабочих органов станка происходит в заданные точки, причем траектории перемещения не задаются. Данные системы ЧПУ применяют для сверлильных и расточных станков.

Контурные системы ЧПУ обеспечивают перемещение рабочих органов станка по заданной траектории и с заданной скоростью для получения необходимого контура обработки. Данными системами ЧПУ оснащают токарные и фрезерные станки.

Комбинированные системы ЧПУ могут работать как в режиме позиционных, так и контурных систем ЧПУ. Данные системы ЧПУ применяют для управления многоцелевыми станками.

Программируемым УЧПУ называют устройство, алгоритмы работы которого реализуются с помощью программ, вводимых в его память, и могут быть изменены после изготовления этого устройства.

Принципиальным отличием программируемых УЧПУ от аппаратных является их структура, соответствующая структуре управляющей ЭВМ и включающая аппаратные средства и программное обеспечение (ПО), в которое, в свою очередь, входят алгоритмы функционирования и реализующие их программы.

В состав программируемой системы ЧПУ входит как минимум одна микроЭВМ, основой которой является микропроцессор. Поэтому данные системы ЧПУ называют также микропроцессорными системами ЧПУ.

Наряду с однопроцессорными системами ЧПУ применяются мультипроцессорные системы, где каждый микропроцессор специализирован по своему функциональному назначению. Например, в системе ЧПУ, выполненной на четырех микропроцессорах, один микропроцессор выполняет управление ввода-вывода, включая программируемое адаптивное управление (согласующее устрой-

ство), второй рассчитывает траекторию перемещения и коррекции, третий осуществляет позиционирование и регулирование положения, четвертый работает с дисплеем и обеспечивает режимы индикации данных.

В результате этого мультипроцессорные системы ЧПУ позволяют реализовать ряд новых функций. Так, наличие отдельного микропроцессора у дисплейного блока позволяет вводить новую УП во время отработки на станке предыдущей УП, а также сделало возможным введение в УЧПУ развитых средств диалогового задания УП с графическим отображением на дисплее траектории движения режущего инструмента; значительно расширилось число управляемых осей координат станка.

Программируемые УЧПУ подразделяются по числу управляемых координат и соответственно объему интерфейса связи со станком:

не более трех управляемых координат (например, мод. 2У22, 2У32);

от четырех до шести управляемых координат (например, мод. 2С42, мод. «Миро-8С», мод. «Fanuc 6М» и др.);

более шести управляемых координат (например, мод. 2С85, мод. «Fanuc 9», мод. «Sinumerik 8М» и др.).

Первая серия отечественных УЧПУ реализована на двух специализированных микроЭВМ «Электроника НЦ-31» и «Электроника НЦ80-31». Последняя система обладает модульной структурой и позволяет увеличивать число управляемых координат наращиванием модулей, в том числе модуля программируемого командоаппарата (ПК).

Другая серия УЧПУ выпускается на базе микроЭВМ «Электроника 60» и сводится практически к трем весьма близким модификациям типов 2Р22, 2С42 и 2С85.

Программируемые УЧПУ серии 2Р, 2С и 2М имеют ряд модификаций как в стоечном исполнении, так и с выносным дисплейным пультом, устанавливаемом на станке.

Примером отечественного мультипроцессорного УЧПУ является УЧПУ серии "Электроника МС 21".

Выпуск УЧПУ за рубежом производится как специализированными, так и станкостроительными фирмами. Среди специализированных фирм необходимо отметить следующие: «Bosch», «Siemens», «Heidenhain», «IBH» (Германия), «General Electric», «Allen Bradley» (США), «Fanuc» (Япония), OSAI

(Италия), NUM SA (Франция), «Philips» (Голландия) и др., а среди станкостроительных фирм, например, такие: «Index», «Traub», «Gildemeister», «Deckel», «MaHo», «Boehringer» (ФРГ), «Okuma», «Yamazaki» (Япония), а также «Cincinnati Milacron» (США), «Matra-Manurhin» (Франция) и др.

Системы ЧПУ станками могут строиться с управлением приводами подач без обратной связи (разомкнутыми) и с обратной связью (замкнутыми).

Разомкнутые системы ЧПУ строят на основе применения силовых и несиловых шаговых электродвигателей (ШД). В последнем случае ШД используется в комплекте с гидроусилителем. В связи с отсутствием контроля действительного положения рабочего органа станка, несмотря на простоту этих систем, на точность перемещения рабочих органов в них будут влиять погрешности ШД, гидроусилителя и передаточных механизмов привода подачи (зубчатой передачи, пары винт-гайка и др.).

Кроме того, ШД не обеспечивают требуемых в современных станках скоростей перемещения рабочих органов на холостых ходах.

Замкнутые системы ЧПУ имеют обратную связь по положению управляемого рабочего органа станка, основой которой является ИП, который является средством измерений, предназначенным для преобразования линейных или круговых (угловых) перемещений в электрический сигнал, содержащий измерительную информацию о величине и направлении перемещения в форме, соответствующей действующим стандартам на системы ЧПУ и устройства цифровой индикации.

В соответствии с ГОСТ 26242 — 90 по виду входной физической величины ИП подразделяются:

на ИП линейных перемещений;

на ИП угловых (круговых) перемещений.

По физическому принципу эквивалентного преобразования ИП подразделяются на волновые, емкостные, индукционные и индуктивные, локационные, потенциометрические, фотоэлектрические и оптоэлектронные, электромагнитные.

Применяется два типа исполнения замкнутых систем ЧПУ.

В системах ЧПУ первого типа проводится косвенное измерение положения рабочего органа с помощью кругового ИП, установ-

ленного на ходовом винте. Эта схема достаточно проста и удобна с точки зрения установки ИП, но предъявляет высокие требования к точностным характеристикам передачи винт-гайка (точность изготовления, минимальные упругие смещения, отсутствие зазоров), которая в этом случае не охватывается обратной связью. Габариты применяемого кругового ИП не зависят от измеряемого перемещения.

Второй тип систем ЧПУ — с линейным ИП. Такая система обеспечивает непосредственное измерение перемещения рабочего органа станка и позволяет охватить обратной связью все передаточные механизмы привода подачи, чем достигается высокая точность перемещений. Однако линейный ИП сложнее и дороже, чем круговой ИП. Его габариты зависят от длины хода рабочего органа станка. На точность работы таких ИП могут оказывать влияние погрешность станка (например, износ направляющих, тепловые деформации и др.).

Уровень современных систем ЧПУ в значительной степени определяется их программным обеспечением. Под программным обеспечением систем ЧПУ понимают совокупность программ и документации на них для реализации целей и задач, выполняемых системой ЧПУ при управлении станком. Его объем может составлять от 8...20 Кбайт для простых систем ЧПУ и до 0,5-1,5 Мбайт для сложных многокоординатных систем ЧПУ.

Программное обеспечение в общем виде состоит из двух частей. Первая часть — системное (базовое) программное обеспечение, которое является общим для различных типов станков. Эта часть программного обеспечения разрабатывается заранее путем выделения основных задач управления различными станками и разработки законченных (стандартных) программных модулей для их решения. В его состав входят, например, программные модули интерпретатора УП, управления электроавтоматикой станка и др. Поэтому разработка этой части программного обеспечения для конкретного станка с ЧПУ сводится к выбору и использованию уже имеющихся стандартных программных модулей.

Вторая часть программного обеспечения определяется задачами управления конкретным станком с ЧПУ и является как бы его нестандартной частью. Она включает в себя технологическое программное обеспечение, ориентированное на определенную группу

станков, и функциональное программное обеспечение, относящееся к конкретному станку. Эта часть программного обеспечения является очень важной, так как при её разработке реализуются конкретные задачи получения заданной производительности и качества обработки деталей.

ГОСТ 21021 регламентирует для системного, технологического и функционального программного обеспечения технические характеристики, номенклатура и параметры которых указываются в технических условиях на УЧПУ конкретного типа.

Устройства ЧПУ относятся к обслужи-

ваемым и восстанавливаемым изделиям с циклическим режимом работы и проведением регламентационных работ. Надежность устройств ЧПУ определяется показателями безотказности, ремонтпригодности и долговечности и устанавливается в технических условиях на устройства ЧПУ конкретного типа.

Значения количественных показателей и норм надежности устанавливаются в соответствии с табл. 3.1.39, приведенной в ГОСТ 21021. Критерии отказов и способы устранения отказов устанавливаются в технических условиях на устройства ЧПУ конкретного типа.

### 3.1.39. Количественные показатели и нормы надежности

Показатель надежности	Обозначение	Норма
Наработка на отказ, не менее	$T_0$	10000 ч при работе в составе ГПС, уникальных и прецизионных станков; 5000 ч при работе в автономных станках с ЧПУ
Коэффициент технического использования	$K_{т.и}$	0,96, не менее
Среднее время восстановления	$T_в$	30 мин, не более
Срок службы	$T_{сл}$	14 лет, не менее

**П р и м е ч а н и е .** Под отказом понимают отказ устройства ЧПУ, не вызывающий срабатывание защиты. Защищенный отказ устройства ЧПУ, приводящий к срабатыванию защиты и вызывающий незапланируемый останов станка с последующим автоматическим или полуполуавтоматическим восстановлением работоспособности устройства ЧПУ, не следует учитывать при определении значений наработки на отказ. Значение наработки на защищенный отказ следует устанавливать в технических условиях на устройства ЧПУ конкретного типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Металлорежущие станки и автоматы:** Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. А.С. Проникова. М.: Машиностроение. 1981. 479 с.

2. **Проектирование автоматизированного производственного оборудования:** Учеб. пособие для вузов / М.М. Кузнецов, Б.А. Усов, В.С. Стародубов. М.: Машиностроение. 1987. 288 с.

3. **Проников А.С.** Надежность машин. М.: Машиностроение. 1978. 592 с.

4. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1985. Т. 1. 656 с; Т. 2. 496 с.

5. **Проектирование металлорежущих станочных и станочных систем:** Справочник-учебник. В 3-х т. / Под общ. ред. А.С. Проникова. Т. 1: Проектирование станков. 1994. 444 с. Т. 2: Расчет и конструирование узлов и элементов станков. 1995. Ч. 1. 371 с; Ч. 2. 320 с. М.: МГТУ им. Баумана: Машиностроение.

## Глава 3.2

СТАНОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ3.2.1. ТИПЫ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ  
И ИХ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

*Станочное приспособление* (СП) — это орудие производства для установки заготовок с целью обработки на металлорежущем (деревобработывающем) станке. В общем случае СП состоит из корпуса, опор, зажимного механизма, привода, направляющей части, вспомогательных механизмов. СП классифицируют по технологическим и конструкторским признакам, степени специализации, степени механизации. Различают СП *целевые и многоцелевые*.

Целевые применяют для оснащения станков определенной группы и соответственно именуют токарными, фрезерными и т.д. К многоцелевым, которые применяют для оснащения станков нескольких групп, относят столы, стойки, тиски, центры, некоторые планшайбы, оправки, патроны.

В зависимости от числа одновременно устанавливаемых заготовок различают СП *одно- и многоместные*. СП, заготовку в котором обрабатывают без изменения позиции на операции, называют *однопозиционным*, а с изменением — *многопозиционным*.

По степени специализации различают СП: *специальные* для установки заготовок одного типоразмера (эффективны в массовом и крупносерийном производствах), *специализированные* для установки заготовок с близкими технологическими и конструкторскими характеристиками (эффективны в крупно-, средне- и мелкосерийных производствах), *универсальные* — для установки заготовок различных конструкций в установленном диапазоне размеров (эффективны в мелкосерийном, единичном производствах).

По степени механизации различают СП *ручные, механизированные, автоматизированные*.

СП — распространенная и дорогостоящая оснастка. В конструкции СП материализуют схемы базирования и закрепления заготовок. Поэтому к СП предъявляют требования, направленные на снижение сроков и

затрат на технологическую подготовку производства, на выполнение оснащаемых операций с достижением заданных показателей производительности, точности, охраны труда. В общем случае СП должны быть удобными и экономичными в изготовлении, безопасными в работе, быстродействующими, точными, жесткими, виброустойчивыми, износостойкими, ремонтпригодными, допускать быструю и точную установку на станок, иметь конструкторско-технологическую совместимость с другими составляющими производственной системы. Снижению сроков и затрат на технологическую подготовку производства способствуют унификация, стандартизация СП, их деталей, сборочных единиц.

Основными элементами станочных приспособлений являются: опоры, зажимные механизмы, направляющие, вспомогательные механизмы и корпус.

**Опоры** (рис. 3.2.1. — 3.2.5) сопрягаются с технологическими базами устанавливаемых заготовок. Различают опоры основные, с помощью которых заготовку лишают степеней свободы, и вспомогательные, ужесточающие технологическую систему. Опоры выбирают, исходя из схемы установки, требований к оснащаемой операции, формы, состояния технологических баз, массы, материала заготовки, ожидаемых силовых реакций в опорах. Наиболее часто заготовки устанавливают: плоскими поверхностями — на опорные штыри и пластины; наружными поверхностями вращения — в призмы; цилиндрическими отверстиями — на установочные пальцы; центровыми отверстиями — в центра. Для установки заготовок деталей типа тел вращения применяют патроны и оправки.

**Зажимной механизм** (ЗМ) создает силу  $P_3$  закрепления заготовки.  $P_3$  определяют из условия равновесия заготовки под действием приложенных к ней сил резания, трения, реакций в опорах, соответствующих моментов (в ряде случаев дополнительно учитывают силы тяжести и инерции), увеличивая полученное значение в 2–2,5 раза в целях охраны труда. Предпочтительны ЗМ-усилители, компактные, с широким применением стандартизированных деталей, развивающие стабильные  $P_3$ . Быстродействие ЗМ повышают применением механизированного или автоматизированного привода, откидных планок, съемных шайб, байонетных и других устройств. Разрабатывают ЗМ с обратной связью с силовыми параметрами обработки.

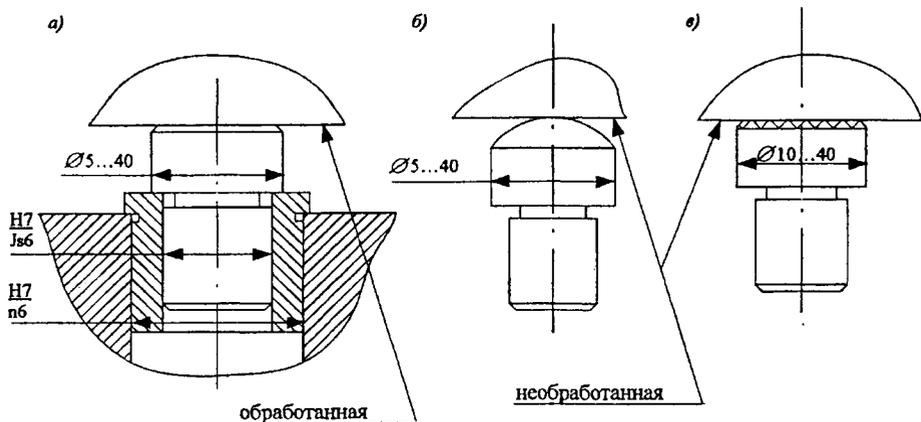


Рис. 3.2.1. Опорные штыри с головкой:

- a* — плоской (давление не более 40 МПа, база заготовки обработанная);  
*б* — сферической (нагрузка 1—30 кН, база заготовки не обработанная); *в* — насечной (то же)

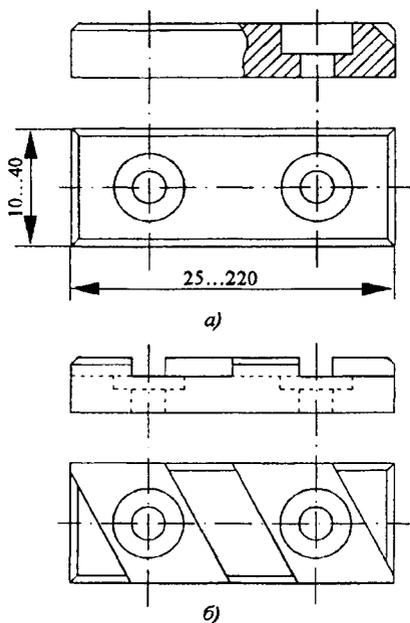


Рис. 3.2.2. Опорные пластины для установки заготовок обработанными базами:  
*a* — боковые и верхние;  
*б* — нижние (давление не более 40 МПа)

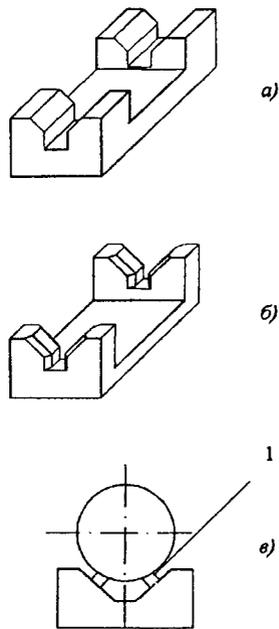
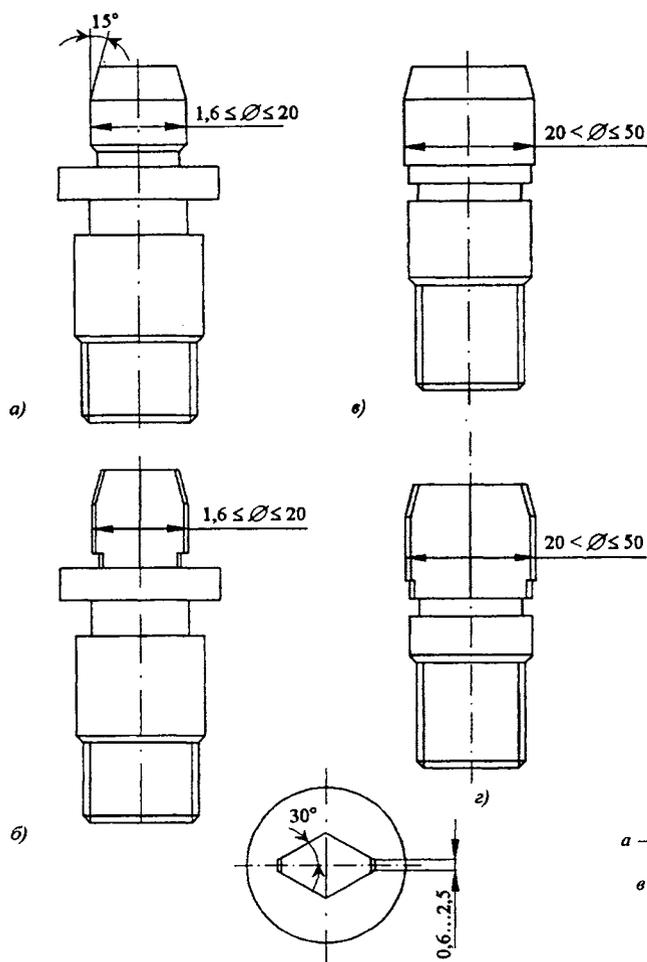
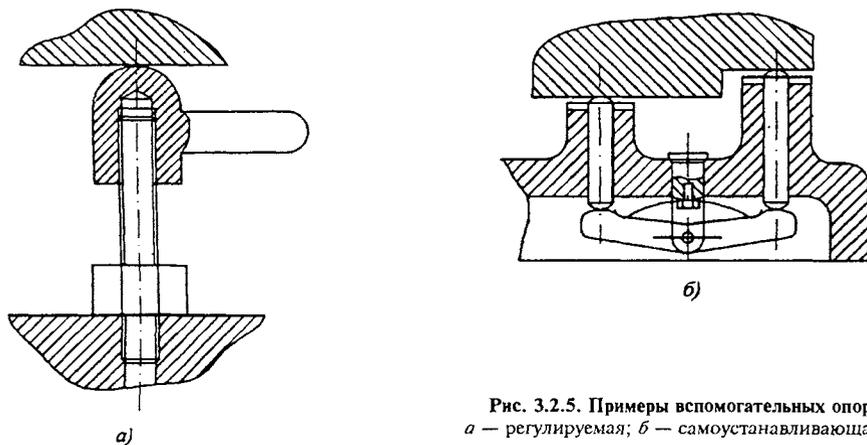


Рис. 3.2.3. Примеры призм:  
*a* — опорная ( $D_3 = 5 \dots 150$  мм); *б* — узкая для установки длинной заготовки необработанной базой;  
*в* — с запрессованными штырями — 1



**Рис. 3.2.4. Примеры установочных пальцев:**  
*a* — постоянный цилиндрический;  
*б* — то же срезанный;  
*в* — сменный цилиндрический;  
*г* — то же срезанный  
 ( $D = 1,6 \dots 50$  мм)



**Рис. 3.2.5. Примеры вспомогательных опор:**  
*a* — регулируемая; *б* — самоустанавливающаяся

Направляющая часть (рис. 3.2.6, 3.2.7) придает режущему инструменту определенное положение относительно заготовки, а также уменьшает его упругие перемещения при обработке. Кондукторные втулки применяют для повышения точности обработки отверстий

по параметрам отклонений диаметрального размера, формы, расположения оси на входе и выходе. Установы позволяют быстро и точно выставить инструмент. Копиры обеспечивают заданный закон движения.

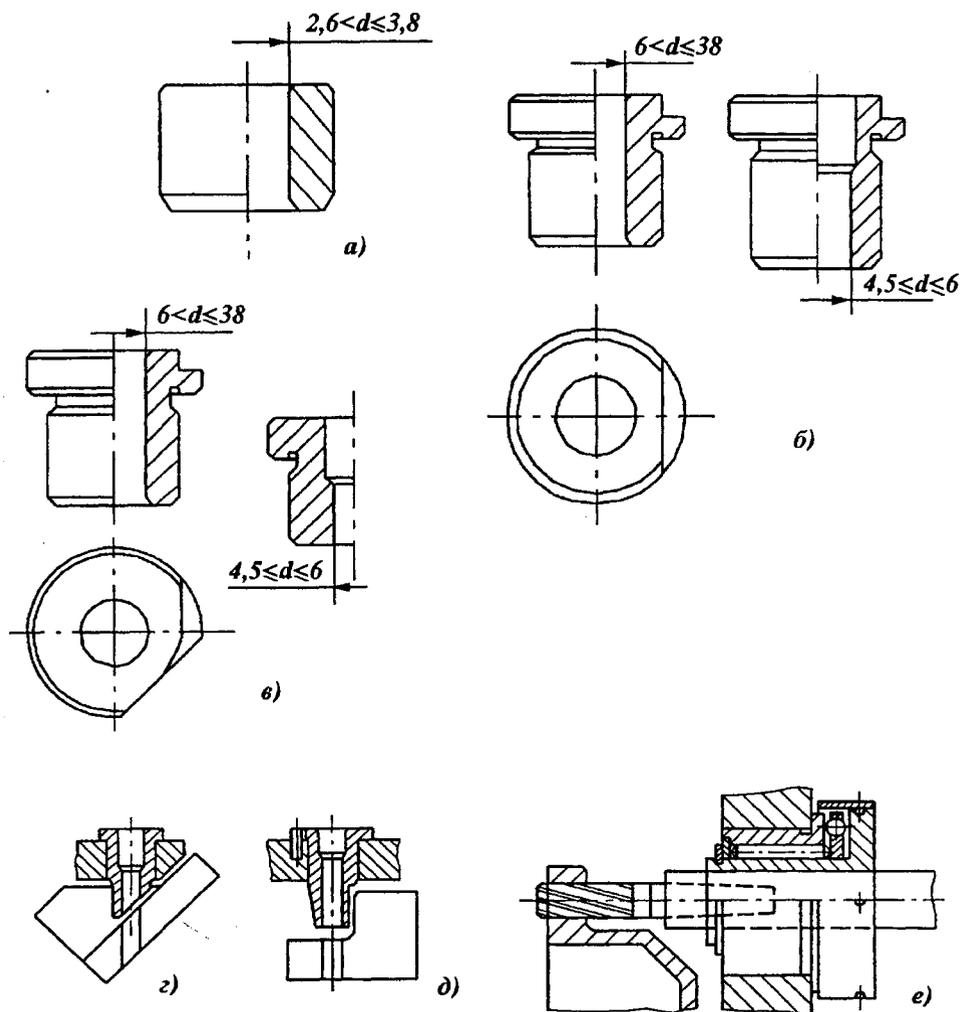


Рис. 3.2.6. Примеры кондукторных втулок:

*a* — стандартная неподвижная постоянная (для обработки отверстия одним инструментом в условиях мелкосерийного производства); *б* — то же сменная (то же в условиях крупносерийного и массового производства); *в* — то же быстросменная (для обработки отверстия несколькими инструментами); *г* — специальная неподвижная для обработки отверстия по скосу; *д* — то же в углублении; *е* — вращающаяся.

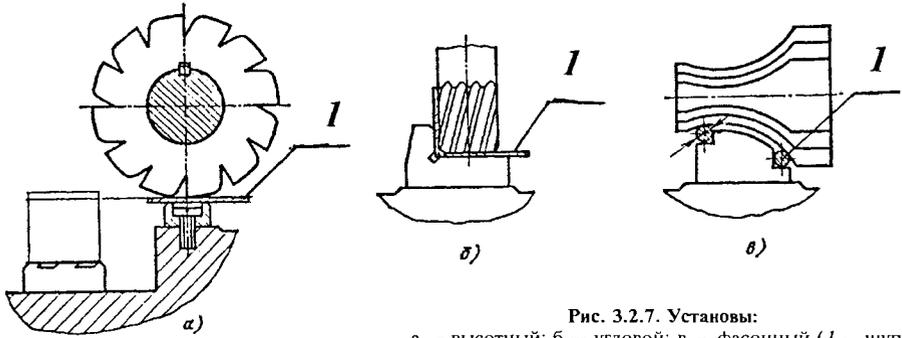


Рис. 3.2.7. Установы:  
а — высотный; б — угловой; в — фасонный (*l* — шуп).

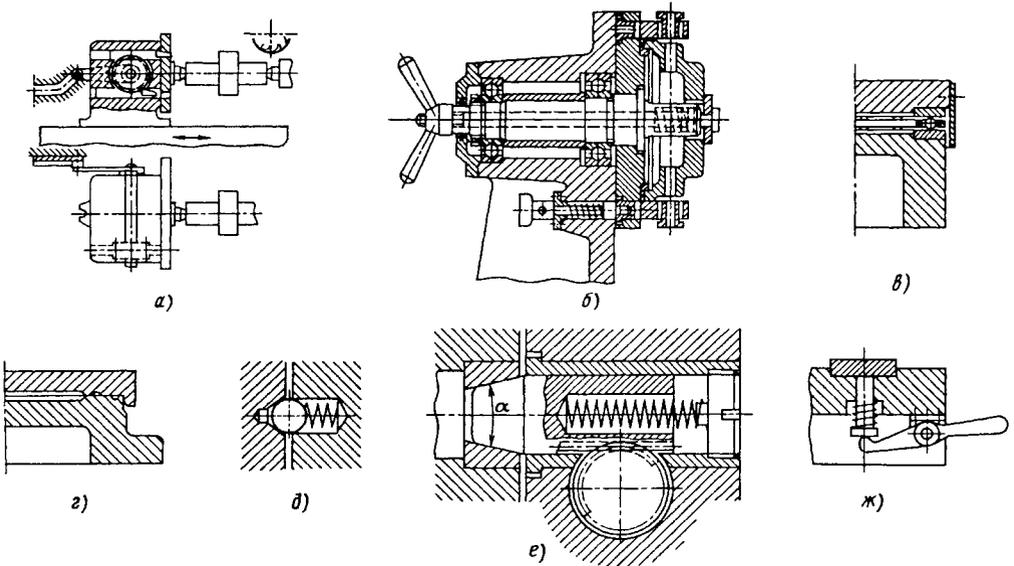


Рис. 3.2.8. Примеры вспомогательных механизмов:  
а — делительный; б — поворотный; в — круговая направляющая для тяжелых СП;  
г — то же для легких; д — шариковый фиксатор; е — то же конический; ж — выталкиватель.

**Вспомогательные механизмы** (рис. 3.2.8) облегчают работу с СП.

Поворотные и делительные механизмы многопозиционных СП придают заготовке требуемые положения относительно инструмента; направляющие служат для перемещений, а фиксаторы — для позиционирования частей СП; выталкиватели упрощают съем заготовок.

**Корпус** — базовая деталь, на которую устанавливаются все другие детали и сборочные единицы СП. Он имеет конструкторские базы для установки СП на оснащаемый станок,

воспринимает силы закрепления и обработки заготовки. Корпус должен быть прочным, жестким, износостойким, удобным для отвода СОЖ и очистки от стружки, должен обеспечивать установку СП на станке без выверки, сохранять устойчивость при различных положениях на станке. Корпусы изготавливают литьем, сваркой, ковкой, сборкой на винтах или с гарантированными натягами (рис. 3.2.9). Выбор варианта диктуется конструкцией корпуса и условиями эксплуатации СП, сроками и стоимостью изготовления. Сокращению затрат и сроков способствует стандартизация заготовок корпусов.

3.2.2. ПРИВОДЫ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Повышение производительности механической обработки заготовок в значительной степени зависит от уровня механизации и автоматизации станочных приспособлений. Анализ вспомогательного времени при обработке на универсальных металлорежущих станках показывает, что время обработки заготовок резанием на таких станках (машинное время) составляет 17-38 % штучно-калькуляционного времени, а остальное (вспомогательное) время затрачивается в основном на установку и закрепление (раскрепление и сьем) заготовок. Существенное повышение производительности механической обработки заготовок может быть достигнуто лишь при резком сокращении вспомогательного времени, затрачиваемого на закрепление — открепление заготовок за счет применения быстродействующих механизированных приводов зажима.

Механизация закрепления заготовок наряду с резким повышением производительности механической обработки обеспечивает: повышение точности обработки за счет стабильности силы зажима, снижающей погрешность закрепления; сокращение ручного труда; снижение физической нагрузки рабочих; возможность многостаночного обслуживания, поскольку рабочий освобождается от необходимости длительного присутствия у одного станка; регламентацию цикла обработки, являющуюся предпосылкой для автоматизации процесса.

В качестве средств механизации закрепления заготовок в приспособлениях используются пневматические, гидравлические, электромеханические, вакуумные, электростатические и пружинные приводы. Применение пневматических и гидравлических приводов обеспечивает возможность повышения производительности обработки также за счет автоматизации подвода-отвода или поворота прихватов, что особенно эффективно при наличии большего количества прихватов.

Приводы пневматических приспособлений используют давление сжатого воздуха 0,4-0,5 МПа цеховых пневмолиний. Такие приводы не нуждаются в специальных источниках энергии, не требуют также возвратных трубопроводов, так как отработанный воздух выпускается в окружающую среду; отсутствует необходимость смены рабочей среды, что имеет место в гидроприводах в результате загрязнения масла.

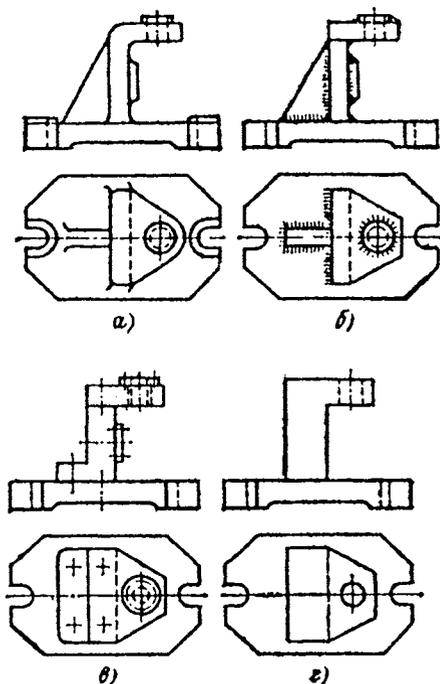


Рис. 3.2.9. Технологические варианты корпуса:  
 а — литой (сложный, жесткий, трудоемкий);  
 б — сварной (сложный, менее жесткий, менее трудоемкий);  
 в — сборный (менее сложный, менее жесткий, наименее трудоемкий, обратимый);  
 г — кованный (наименее сложный, жесткий, менее трудоемкий)

Для безопасности работы пневматических приспособлений применяют реле давления, осуществляющее блокировку привода зажима заготовок с приводом станка. При падении давления в пневмосистеме приспособлений реле давления отключает электродвигатель станка.

Основным недостатком пневмоприводов является низкое давление рабочей среды — воздуха, что ограничивает их область применения.

Для непосредственного закрепления заготовок штоком поршня или посредством простых рычажных механизмов пневмоприводы применяют лишь в тех случаях, когда требуется небольшая сила зажима, т.е. при небольших силах резания при обработке небольших заготовок с небольшим припуском или заготовок из мягких материалов. При больших силах зажима для сокращения диаметра цилиндров применяют механизмы-усилители (рычажные, шарнирно-рычажные,

клиновые, клино-рычажные и др.), что увеличивает ход поршня пневмоцилиндра, усложняет конструкцию, увеличивает габариты, массу и стоимость приспособлений, а также площадь, необходимую для их хранения. Поэтому пневматические приводы целесообразно применять лишь при отсутствии пространственных ограничений, в случаях неснимаемости приспособлений со станка, т.е. в специальных приспособлениях для крупносерийного и массового производства или в универсально-наладочных приспособлениях для мелкосерийного производства.

В качестве объемных пневмодвигателей зажимных устройств приспособлений применяют поршневые (рис. 3.2.10, а) и мембранные (рис. 3.2.10, б) пневмоцилиндры. Поршневые пневмоцилиндры подразделяют на стационарные и вращающиеся.

Поршневые цилиндры бывают одностороннего и двухстороннего действия. В цилиндрах одностороннего действия обратный ход поршня осуществляется возвратной пружиной, а двухстороннего действия — сжатым воздухом. Преимуществом цилиндров одностороннего действия является вдвое меньший расход воздуха, экономия в стоимости трубопроводов. Недостатком их является ограниченный ход поршня, так как при больших ходах из-за наличия возвратных пружин длина цилиндра значительно увеличивается. Цилиндры двухстороннего действия являются наиболее распространенным типом пневмоцилиндров, широко используемым для механизации и автоматизации приспособлений.

В мембранных пневмоцилиндрах рабочие камеры образованы рабочими поверхностями корпуса и мембраны со штоком. Они могут быть одностороннего и двухстороннего действия, а в зависимости от количества рабочих полостей — одинарные, сдвоенные или встроенные. Конструкция таких цилиндров более простая, чем поршневых цилиндров. Качество сжатого воздуха не оказывает существенного влияния на их работоспособность. Недостатком их является непостоянство силы зажима, уменьшающаяся по мере увеличения хода штока в результате прогиба мембраны, сопротивление которой будет тем больше, чем больше ход штока. Поэтому мембранные цилиндры рекомендуется применять лишь при небольших ходах штока.

Вращающиеся цилиндры используются в токарных, токарно-револьверных и других станках, где пневмоцилиндр вращается совместно со шпинделем станка, для зажимных устройств патронов, оправок и других приспособлений. В зависимости от исполнения

они подразделяются на одностороннего и двухстороннего действия. Цилиндры двухстороннего действия могут быть опоршневые и двухпоршневые (сдвоенные). Пневматические вращающиеся цилиндры (рис. 3.2.11) состоят из двух основных частей, воздухопроводящей муфты 1 и цилиндра 2, установленного на заднем конце шпинделя станка.

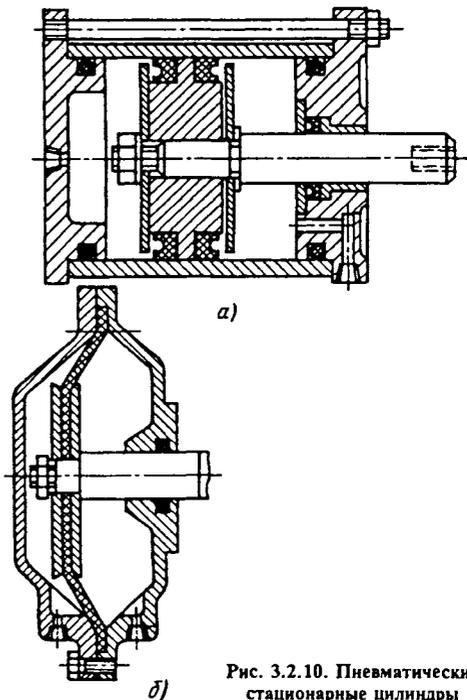


Рис. 3.2.10. Пневматические стационарные цилиндры

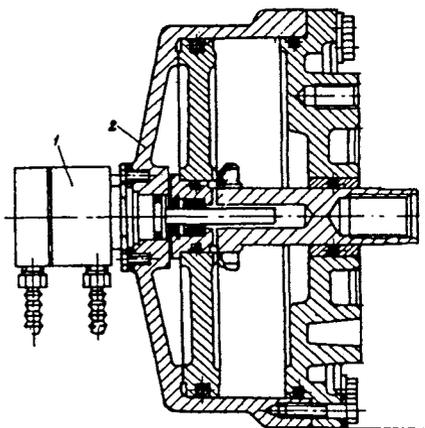


Рис. 3.2.11. Пневматический вращающийся одинарный цилиндр.

**Гидравлические приводы** имеют по сравнению с пневматическими ряд существенных преимуществ. Благодаря значительному увеличению давления рабочей жидкости в 20 раз и более (100 МПа и выше) по сравнению с давлением сжатого воздуха в получении идентичных сил зажима диаметры рабочих цилиндров значительно уменьшаются. Высокое давление рабочей жидкости в цилиндрах позволяет передавать силу зажима непосредственно штоком цилиндров зажимным элементам, исключая применение механических механизмов-усилителей и сложных механических передач, повышая КПД передачи, упрощая конструкцию и сокращая габариты приспособлений и их массу, что облегчает смену и установку приспособлений на столе станка, их транспортирование, а также значительно уменьшает площадь, необходимую для их хранения. В гидравлических приспособлениях путем применения необходимого количества цилиндров конструктивно просто осуществить многоточечные зажимы, т.е. широко применять приспособления для многоместной и многопозиционной обработки. В станочных приспособлениях применяют объемные гидроприводы, использующие энергию давления масла.

Основные особенности гидравлических приводов станочных приспособлений, определяющие их отличие от объемных гидроприводов машин, следующие.

Гидроприводы приспособлений работают по циклу: подвод зажимных элементов — зажим — отвод зажимных элементов. В этом цикле гидроприводы приспособлений работают с различными давлениями и расходом рабочей жидкости. В период подвода (отвода) зажимных элементов гидроприводы работают с максимальным расходом и минимальным давлением, обуславливаемым гидравлическими и механическими сопротивлениями. В период зажима при обработке детали на станке — с максимальным давлением и минимальным расходом, обуславливаемым пополнением утечек рабочей жидкости, причем время второго периода в большинстве случаев значительно больше первого.

Гидравлические приводы в большинстве случаев komponуются в приспособлении не полностью, а расчленяются на два агрегата — источники давления и гидродвигатели. При этом последние komponуются в приспособлениях, поочередно присоединяемых к источнику давления.

В зависимости от вида энергии источника давления (приводящего двигателя) гидравлические приводы подразделяют на гидроприводы с ручным насосом (механо-гидравлические), пневмогидравлические при-

воды и электронасосные гидроприводы (электрогидравлические).

Источником высокого давления масла **механических приводов** являются ручные насосы. Высокое давление масла создается за счет небольшого усилия рабочего (100 — 150 Н), прикладываемого к рукоятке насоса. Простые, компактные и недорогие механогидравлические приводы, не нуждающиеся во внешнем источнике энергии (за исключением усилия рабочего), являются наиболее простым средством механизации зажимов станочных приспособлений. Они обеспечивают одновременно одинаковую во всех точках, регулируемую по величине соответствующей настройкой предохранительного клапана силу закрепления обрабатываемой заготовки.

Механогидравлические насосы подразделяют на рычажные и винтовые. По количеству ступеней расхода масла и давлений механогидравлические насосы подразделяют на одноступенчатые (прямого действия) и двухступенчатые (последовательного действия). В гидроприводе с одноступенчатыми рычажными насосами при качании рычага насоса вверх и вниз масло нагнетается в гидроцилиндры одностороннего действия приспособлений. При подводе зажимных элементов к закрепляемой заготовке давление масла в гидросистеме низкое, определяемое преодолением сил трения в механизмах. После контакта зажимных элементов с заготовкой при качании рычага давление возрастает до максимального рабочего. При разжиме заготовки открывают клапан насоса и масло из гидроцилиндров под действием возвратных пружин сливается через нагнетательную линию в бак насоса. Одноступенчатый винтовой насос состоит из корпуса 1, в отверстии которого установлен поршень 2 (рис.3.2.12). При вращении винта 3 поршень перемещается, вытесняя масло из под поршневой полости в гидроцилиндры приспособления.

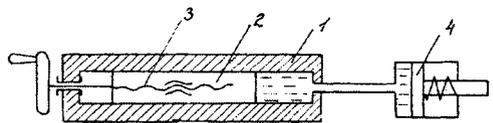


Рис. 3.2.12. Схема одноступенчатого винтового насоса

Для раскрепления заготовки винт вращают в противоположном направлении. При этом поршень перемещается назад. Масло из гидроцилиндров 4 одностороннего действия под действием возвратных пружин поршней вытесняется в подпоршневую полость насоса (гидропривод с замкнутой циркуляцией). Двухступенчатый винтовой насос (последовательного действия) имеет две ступени объема и давления масла. Вначале работает первая ступень с большим объемом масла и низким давлением. При вращении винта поршень большого диаметра вытесняет масло в гидроцилиндры приспособления, обеспечивая быстрый подвод зажимных элементов к заготовке и предварительный ее зажим. При работе второй ступени насоса плунжер малого диаметра обеспечивает создание в гидросистеме высокого давления масла. Происходит окончательный зажим заготовки.

Механогидравлические приводы эффективно применять в мелкосерийном производстве при закреплении заготовок на столе станка, а также на станках, где подвод воздуха или масла представляет значительные трудности, например на расточных станках с поворотным продольно-строгальным столом.

**Пневмогидравлические приводы** являются наиболее эффективным и перспективным типом привода станочных приспособлений, так как, используя энергию низкого давления сжатого воздуха цеховых линий, создают посредством пневмогидропреобразователя и поддерживают в гидроцилиндрах приспособлений высокое давление масла (10 МПа и выше). Приводы сочетают в себе преимущества пневмо- и гидроприводов.

В качестве источника давления масла таких приводов применяют пневмогидравлические преобразователи давления.

Преобразователи устанавливают на столах станков или около них и соединяют поочередно с гидросистемой приспособлений, размещенных на этих станках, быстроразъемными соединениями.

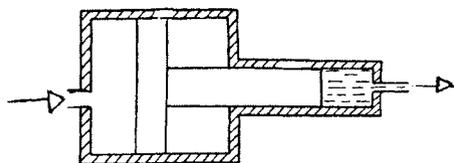


Рис. 3.2.13. Схема одноступенчатого пневмогидравлического преобразователя давления

По количеству ступеней давлений и расхода масла преобразователи подразделяют на одно- и двухступенчатые (прямого и последовательного действия). Одноступенчатые преобразователи состоят из двух цилиндров: пневматического и гидравлического, причем шток поршня пневмоцилиндра является одновременно плунжером гидроцилиндра. Давление масла, создаваемое преобразователем, увеличивается во столько раз по сравнению с давлением воздуха, во сколько раз площадь поршня преобразователя больше площади штока. Одноступенчатые преобразователи (рис. 3.2.13) применяют в качестве источника давления масла приспособлений с одним-тремя гидроцилиндрами. При больших объемах масла применяют двухступенчатые (компаундные) пневмогидравлические преобразователи (рис. 3.2.14), состоящие из пневмогидропреобразователя 1 и пневмогидротеснителя 2, т.е. устройства, предназначенного для передачи давления между двумя рабочими средами: газом и жидкостью без изменения давления. Цикл работы двухступенчатых преобразователей следующий.

1. Быстрый подвод зажимных элементов к заготовке и предварительный ее зажим. При этом работает первая ступень. Масло из вытеснителя поступает в гидроцилиндры приспособлений. Давление масла при предварительном зажиме равно давлению воздуха.

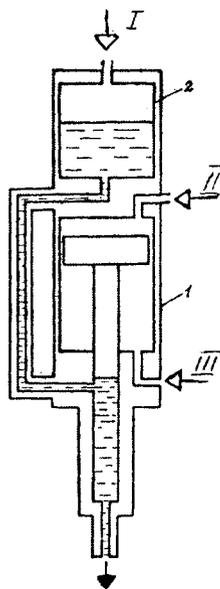


Рис. 3.2.14. Схема двухступенчатого пневмогидравлического преобразователя давления

II. Окончательный зажим. Сжатый воздух поступает под поршень преобразователя, окончательно зажимая заготовку. Давление масла увеличивается во столько раз, во сколько площадь поршня преобразователя больше площади его штока.

III. Разжим. Сжатый воздух поступает в штоковую полость пневмоцилиндра преобразователя, в результате чего поршень перемещается вверх, а масло из гидроцилиндров приспособлений под действием возвратных пружин поршня или сжатого воздуха на поршни сливается через гидроцилиндр преобразователя в вытеснитель. Пневмогидравлические преобразователи могут применяться лишь как индивидуальные источники давления масла, т.е. обслуживать приспособления, устанавливаемые только на одном станке, поскольку управление гидроцилиндрами приспособлений осуществляется в пневматической системе преобразователя.

Источником высокого давления масла (нагнетательным агрегатом) **электронасосных приводов** являются электронасосы. Электрогидравлические приводы подразделяются на индивидуальные и групповые. Индивидуальные предназначены для нагнетания масла в приспособления, устанавливаемые на одном станке. Групповые обслуживают одновременно группу станков.

Электронасосные приводы, состоящие из электродвигателя, насоса, редукционного клапана и регулятора давления, могут быть использованы лишь при наличии в зажимных устройствах самотормозящихся звеньев, обеспечивающих работу насоса только в период зажима-разжима заготовки, так как в противном случае при постоянной работе насоса происходит интенсивный нагрев масла, а, следовательно, увеличение его утечки и падение давления. При отсутствии самотормозящихся механизмов в зажимных устройствах приспособлений применяют гидроаккумуляторные установки. Гидроаккумуляторы предназначены для аккумулирования энергии рабочей жидкости, находящейся под давлением.

Аккумуляторы должны периодически подзаряжаться сжатым азотом из баллонов.

Насос включается только в период зажима-разжима заготовки. В процессе обработки давление поддерживается аккумулятором.

В станочных приспособлениях применяются объемные гидродвигатели — цилиндры — предназначенные для преобразования энергии потока рабочей среды в энергию

движения поршня. Цилиндры подразделяются на стационарные и вращающиеся. В гидроцилиндрах одностороннего действия движение поршня под действием давления масла возможно только в одном направлении, в гидроцилиндрах двухстороннего действия движение поршня под действием давления масла возможно в двух противоположных направлениях. Государственными стандартами регламентируются стационарные гидроцилиндры приспособлений с поступательными движением поршня трех типов: одностороннего действия со сплошным штоком, одностороннего действия с полым штоком и двухстороннего действия. Последние применяются в тех случаях, когда требуется большой ход поршня, например для автоматизации подвода или поворота зажимных элементов. Вращающиеся гидроцилиндры предназначены для механизации токарных патронов. Наличие отверстия в поршне и муфте позволяет устанавливать в патронах прутковые заготовки.

Для быстрого присоединения гидроцилиндров приспособлений к нагнетательным агрегатам, а также отсоединения с минимальной затратой времени применяются быстроразъемные соединительные муфты с автоматическим затвором масла. При соединении муфты подпружиненные клапаны закрывают выход масла из полумуфт. При соединении муфт открывается проход масла из одной полумуфты в другую.

Для сокращения времени, затрачиваемого на закрепление-раскрепление заготовок в приспособлениях с гидравлическими приводами, применяют зажимные устройства с автоматическим подводом-отводом или поворотом прихвата. На рис. 3.2.15, *а* показан пример автоматического подвода-отвода прихвата.

При перемещении штока 7 поршня гидроцилиндра 8 вверх подпружиненная пружиной 5 втулка 6 перемещает прихват 1 посредством рычага 2 установленного на оси 3, к заготовке. При дальнейшем перемещении поршня штырь 4 посредством прихвата закрепляет заготовку.

На рис. 3.2.15, *б* показан пример автоматического поворота Г-образного прихвата. При перемещении поршня 3 вниз прихват 1 поворачивается в рабочее положение благодаря винтовой канавке, выполненной на его цилиндрической поверхности, взаимодействующей с концом винта 2. При дальнейшем перемещении поршня прихват закрепляет заготовку 4.

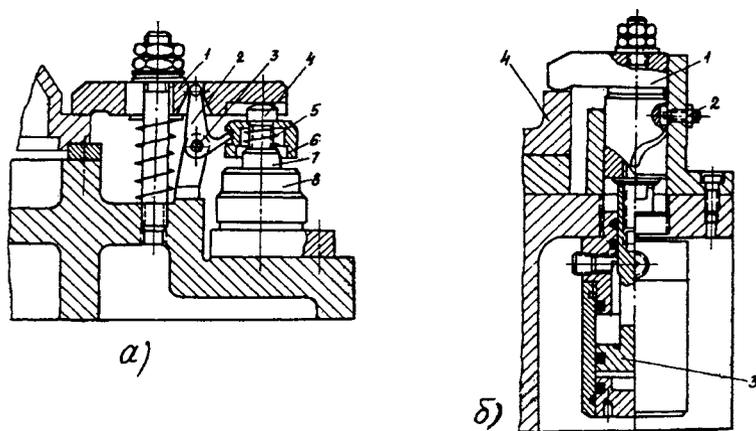


Рис. 3.2.15. Примеры автоматизированного подвода-отвода и поворота прихватов

**Электромеханические приводы** обладают рядом преимуществ: потребляют энергию только во время зажима или отжима заготовки, обеспечивают большую мощность при небольших габаритах, имеют низкую стоимость; отсутствуют источники давления рабочей среды (масла или воздуха) аппаратуры, трубопроводов; обладают возможностью подключения к электроуправлению станка без дополнительных затрат; имеют высокую надежность, нетребовательны к уходу; не имеют утечек, а также неполадок при эксплуатации из-за выхода из строя уплотнения или поломки трубопроводов. Однако при необходимости применения в приспособлениях многократных зажимов, т.е. закрепления заготовки несколькими зажимными элементами или закрепления нескольких заготовок в многоместных приспособлениях, целесообразнее применять пневматические и особенно гидравлические приводы, так как они обеспечивают возможность достаточно просто осуществить многократное закрепление заготовок, в то время как электромеханические приводы для этой цели требуют наличия сложных передаточных механизмов. Следовательно, такие приводы наиболее целесообразно применять для закрепления заготовок одним механизмом, т.е. для механизации токарных патронов, тисков, для поджима заготовок вращающимися центрами пинолей задних бабок, в качестве гайковертов гаек и винтов приспособлений, закрепления инструмента на фрезерных и расточных станках.

Схема электромеханического привода к патрону токарных станков показана на рис. 3.2.16. Привод состоит из электродвигателя 1 с редуктором 2, закрепляемых на заднем конце шпинделя станка. Выходной вал редуктора посредством муфты 3 соединен с винтом 5, при вращении которого гайка 6 перемещает тягу, передающую через рычаги 7 усилие кулачком 8 патрона, зажимающим обрабатываемую заготовку 9. Сила зажима регулируется пружиной 4. По достижении требуемой силы торцовые зубцы муфты отжимают правую полумуфту, разъединяя винт 5 с валом редуктора. При этом наблюдается характерное прощелкивание зубцов муфты, что служит акустическим сигналом для отключения электродвигателя. Правые и левые скосы зубьев муфты выполнены под различными углами  $\alpha$  и  $\beta$ , что обеспечивает наличие крутящего момента при раскреплении заготовки, большего, чем при закреплении, что обуславливает высокую надежность работы, так как для вывинчивания винта 5 с самотормозящей резьбой вследствие заклинивания резьбы требуется больший крутящий момент, чем при завинчивании.

**Электромагнитные и магнитные приспособления** не требуют наличия зажимных устройств, благодаря чему упрощается конструкция приспособлений и сокращаются их габариты, так как вся поверхность приспособлений может быть использована непосредственно для установки деталей. Закрепление заготовок осуществляется не сосредоточенной нагрузкой зажимных элементов, а равномер-

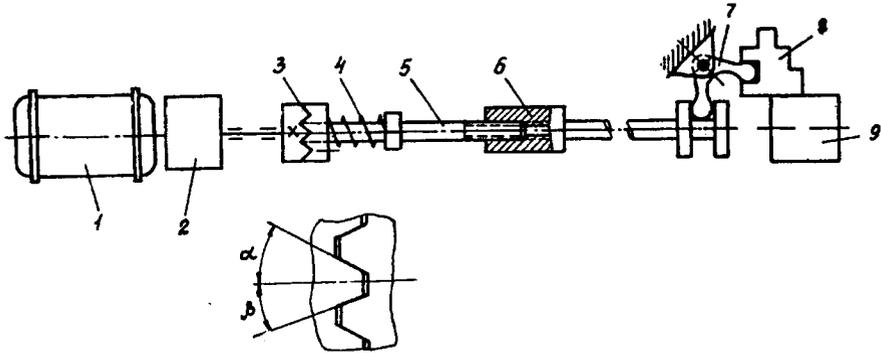


Рис. 3.2.16. Схема электромеханического привода

ным притяжением заготовки к установочной поверхности приспособления, что сводит к минимуму погрешность закрепления, повышая точность обработки. Приспособления проще и дешевле пневматических и гидравлических из-за отсутствия источников давления, аппаратуры и арматуры. Источником энергии электромагнитных и магнитных приспособлений является энергия магнитного силового поля. На рис. 3.2.17 показана схема электромагнитной плиты. Электромагнитная плита состоит из корпуса 1 и верхней плиты 4, в сквозных пазах которой установлены полюсники 5, отделенные от плиты немагнитными приставками 6. Внутри плиты находятся сердечники 2 и катушки 3. При прохождении через последние постоянного тока напряжением 24, 48 или 110 В в сердечниках возбуждается магнитный поток, замыкающийся через полюсники 5 верхней плиты заготовки 7, плиту 4 и корпус 1. При этом заготовка притягивается к плите. Для раскрепления заготовки после ее обработки ток отключается и заготовку снимают с плиты. Однако в ней имеется остаточный магнетизм, который уничтожается при помещении заготовки на демагнетизатор.

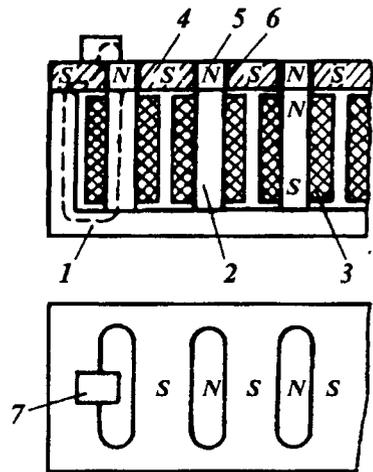


Рис. 3.2.17. Схема электромагнитной плиты

точность обработки благодаря отсутствию тепловых деформаций; сила притяжения плит одинаковых габаритов почти в 2 раза больше, чем электромагнитных.

Существуют два типа плит с постоянными магнитами: с литыми и керамическими магнитами. Материалами литых магнитов являются следующие сплавы: алюминивоникелекобальтожелезные ЮНДК15, ЮНДК18 и ЮНДК24 (типа алнико или магнико), алюминивоникележелезные ЮНД4, ЮНД12 и ЮНД8 (типа АЛНИ). Материалами керамических магнитов является окись железа  $Fe_2O_3$  и

Приспособления с постоянными магнитами имеют перед электромагнитными приспособлениями следующие преимущества: не требуется наличие источника постоянного тока для питания плиты; надежность в работе в 3-4 раза больше, чем электромагнитных; жесткость плиты почти в 2 раза больше жесткости электромагнитной; толщина плиты более чем в 2 раза больше, чем электромагнитной, следовательно, допускает гораздо большее количество перешлифовок; большая

углекислый барий  $BaCO_3$ . Такие магниты получают методом порошковой металлургии, т.е. спеканием под высоким давлением этих компонентов, откуда они и получили название «керамические».

На рис. 3.2.18 показаны схемы включения и выключения магнитных плит с литыми и керамическими магнитами. В приспособлениях с литыми магнитами (рис. 3.2.18, а) магниты 1, полюсники 2 магнитного блока, основание 3 и полюсники 5 верхней плиты 4 или сама плита образуют магнитопроводную систему, изолированную немагнитными прокладками 6. В положении "включено" магниты подвижного блока расположены под полюсниками верхней плиты, изолированными от нее немагнитными прокладками, и магнитный поток, выходящий из магнитов, обходя немагнитные прокладки, замыкается через заготовку, притягивая ее к зеркалу верхней плиты. В положении "выключено", когда подвижный магнитный блок сдвинут на половину шага между полюсами, магниты подвижного блока помещаются под верхней плитой так, что магнитный поток, выходящий из магнитов, замыкается (шунтируется) верхней плитой и ее полюсниками, освобождая обрабатываемую заготовку. При этом в заготовке остается остаточный магнетизм. Для размагничивания заготовки ее необходимо установить на демагнитизатор. В приспособлениях с керамическими магнитами (рис. 3.2.18, б) магниты 8 и 9 подвижного 5 и неподвижного 4 блоков, полюсники 7, 2 и 1 подвижного и неподвижного блоков и верхней плиты 3 образуют магнитопроводящую систему, установленную на немагнитном основании 6. В положении "включено" магниты подвижного блока расположены под магнитами неподвижного блока таким образом, что магниты обоих блоков имеют одинаковые полюсы. При этом объединенный магнитный поток, выходящий из магнитов подвижного и неподвижного блоков, через полюсники верхней плиты замыкается через обрабатываемую заготовку, притягивая ее к зеркалу плиты, обходя немагнитные вставки 10. В положении "включено", при перемещении нижнего блока на шаг между полюсами, магниты подвижного блока располагаются под магнитами неподвижного блока так, что магниты обоих блоков имеют одинаковые полюсы. При этом магнитный поток магнитов неподвижного блока нейтрализуется магнитным потоком

магнитов нижнего подвижного блока. Поскольку высота магнитов нижнего блока больше, чем верхнего, то при выключении магнитной плиты не только нейтрализуется магнитное действие верхнего блока, но и создается небольшое магнитное поле с противоположным направлением магнитного потока, что обуславливает размагничивание заготовки и стружки. Плиты с керамическими магнитами имеют ряд преимуществ перед литыми с литыми магнитами: дешевле благодаря отсутствию дорогостоящих дефицитных материалов (никеля и кобальта); выше коэрцитивная сила, следовательно, имеют большую долговечность намагничивания; выше удельные силы притяжения (1...1,4 МПа); отсутствие остаточного магнетизма, так как при выключении магнитный поток полностью компенсируется магнитным потоком блока внутри плиты; отсутствие намагничивания заготовки и инструмента; минимальное рассеяние магнитного потока, что обеспечивает концентрацию магнитного потока на небольшой высоте от зеркала плиты (до 10 мм), что обуславливает максимальное прохождение магнитного потока через заготовку, обеспечивая большую силу притяжения и отсутствие намагничивания станка и инструмента. Приспособления с постоянными керамическими магнитами применяются не только традиционно на шлифовальных, но и фрезерных, строгальных, сверлильных и др. станках, причем высокая сила притяжения таких приспособлений (плит и патронов) обеспечивает обработку с обычными режимами резания. В электропостоянных электроимпульсных магнитных плитах с рабочей площадью  $1250 \times 320$  мм сердечником катушек в отличие от электромагнитных плит являются постоянные литые магниты марок ЮНДК24 и ЮНДК24Б. Включение и отключение плиты осуществляется электромагнитной катушкой путем намагничивания постоянных магнитов вместе с установленной на плите заготовкой и их полного размагничивания. После установки заготовки на плиту включение последней осуществляется подачей в катушку кратковременных (в течение 0,5 с) импульсов тока, в результате чего магнитная система, включающая в себя постоянные магниты, магнитопроводы и заготовку, намагничивается, и в дальнейшем в процессе обработки заготовки последняя притягивается к зеркалу плиты постоянными магнитами. Для отключения плиты в катушку подаются затухающие по амплитуде импульсы тока, череду-

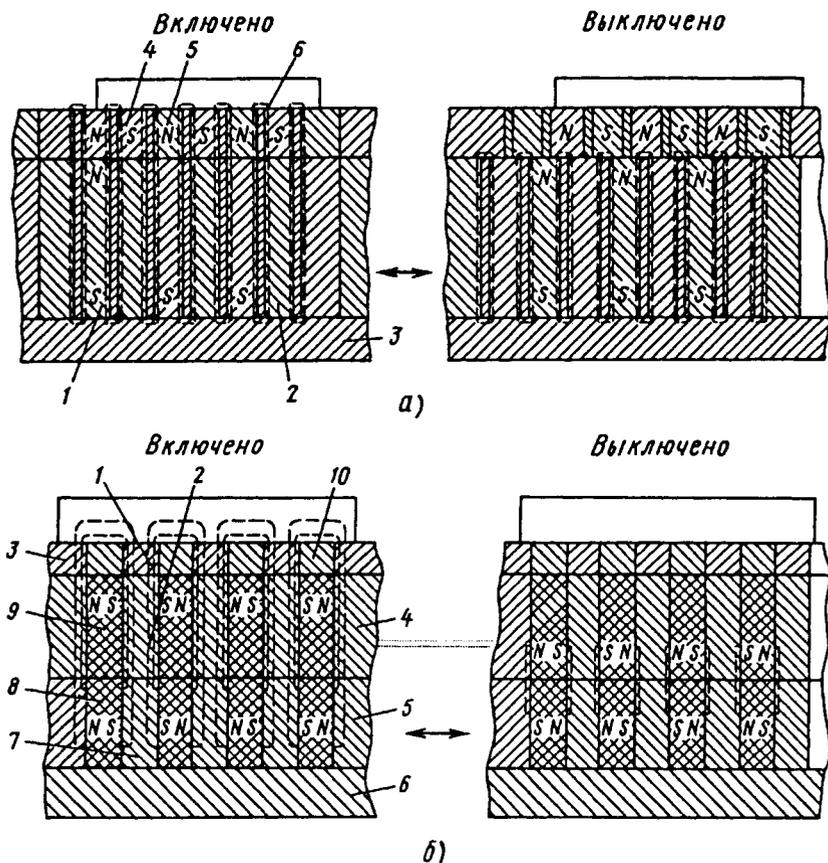


Рис. 3.2.18. Схемы включения и выключения магнитных плит:  
 а — с литыми магнитами; б — с керамическими магнитами плиты

ющие полярности, в результате чего магниты и вся система размагничиваются. Преимуществом электропостоянных магнитных плит перед плитами с постоянными магнитами является отсутствие подвижных элементов, большая жесткость, большая удельная сила притяжения, незначительный нагрев плиты, отсутствие физических усилий для переключения плиты, возможность автоматического управления включением и отключением плиты, возможность отключения плиты от управляющей установки, регулирования силы притяжения. Электропостоянные магнитные плиты могут применяться как при обдирочном шлифовании, так и при обработке на фрезерных, строгальных и др. станках. Незначительные температурные деформации позволяют рекомендовать применять их на шлифовальных станках повышенной точности. Наиболее целесообразно применять такие плиты средних и больших размеров (от 0,5 м и более), так как изготовление плит таких размеров с

постоянными магнитами технологически сложно и требует специального привода переключения (пневматического, гидравлического, электрического).

На силу притяжения заготовок на электромагнитных и магнитных плитах и патронах влияют следующие факторы: магнитная характеристика плиты; площадь контакта заготовки с полюсниками плиты; толщина заготовки; материал детали; параметры шероховатости установочной поверхности детали. Чем толще заготовка, тем меньше ее магнитное сопротивление и, следовательно, тем больший магнитный поток проходит через заготовку. Мелкие и тонкие детали плохо закрепляются на магнитных плитах. При установке мелких деталей на полюснике или немагнитной проставке магнитный поток не замыкается между двумя полюсами, поэтому для таких деталей применяются мелкополюсные плиты с шагом между ними до 1,5 мм или накладные мелкополюсные плиты, устанавливаемые на обыч-

ные плиты. Тонкие детали (до 1 мм) не могут быть закреплены на обычных магнитных плитах, так как магнитный поток не замыкается через них ввиду малого сечения, а проходит через деталь и замыкается через воздух. Детали из магнитомягкого материала (Ст3, Ст10, стали 15 и 20) притягиваются с большей силой, чем менее магнитомягкие материалы (сталь 45, чугун).

Универсальные электромагнитные и магнитные плиты и патроны обеспечивают возможность установки и закрепления лишь ограниченной номенклатуры деталей, имеющих достаточно большие плоские установочные поверхности. Для расширения технологических возможностей магнитных плит, обеспечивающих установку и закрепление деталей, не имеющих достаточных плоских установочных поверхностей (что характерно для подавляющего большинства деталей), применяются универсально-наладочные магнитные приспособления, универсальной базисной частью которых является магнитная плита, а установка и закрепление обрабатываемых деталей осуществляется посредством сменных наладок (переходников).

По способу подведения магнитного потока переходники подразделяются на два типа: многополюсные (пластинчатые) и двухполюсные (сумматоры).

Многополюсные переходники представляют собой своеобразные удлинители пути прохождения магнитного потока в системе плита-деталь. Над каждым полюсом плиты устанавливаются стальные пластины, которые соединяются в блок посредством пластин и шпилек или заклепок из немагнитных материалов. Обрабатываемая деталь соприкасается с количеством полюсов, обуславливаемых длиной детали.

Двухполюсные переходники отличаются от многополюсных тем, что обрабатываемая деталь соприкасается только с двумя полюсами (полюсниками) противоположной полярности, которые являются как бы суммирующими устройствами плиты, так как позволяют соединить все полюсы одинаковой полярности в единый полюс. Каждый из двух полюсников со стороны поверхности, установленной на плиту, представляет собой гребенку, зубья которой своими торцовыми поверхностями контактируют с полюсами плиты только одноименной полярности. При применении такого переходника через обрабатываемую деталь, так же, как и в многополюсном переходнике, проходит суммарный поток магнитной плиты, но проходит, во-первых, в одном направлении, а во-вторых, контакт заготовки с переходником осуществляется по

непрерывной поверхности. Двухполюсные переходники проще и дешевле многополюсных и обеспечивают большую силу притяжения деталей.

**В вакуумных приспособлениях** закрепление заготовок осуществляется атмосферным давлением. Атмосферное давление прижимает заготовки к установочным поверхностям приспособлений, из-под которых откачивается воздух. Такие приспособления обеспечивают возможность закрепления заготовок из любых материалов, а также нежестких тонких деталей (до 0,15 мм) больших габаритов без деформации, поскольку сила зажима распределяется равномерно по всей поверхности заготовки. Отсутствие механических зажимных устройств облегчает установку и съем заготовок, позволяя использовать всю поверхность плиты для установки заготовок. Они применяются в основном на шлифовальных и токарных станках.

Источником разрядки таких плит являются вакуумные насосы, сблокированные посредством реле с электродвигателем станка. При потере разрядки реле отключает электродвигатель станка, предотвращая вырыв обрабатываемой заготовки.

**Электростатические приспособления** применяются для закрепления немагнитных деталей, а также тонких и мелких ферромагнитных деталей, которые не могут быть закреплены на магнитных приспособлениях с обычным шагом между полюсами. На плоскошлифовальных и токарных станках применяются соответственно электростатические плиты и патроны. В электростатических плитах заготовки притягиваются к зеркалу плиты посредством статических электрических зарядов противоположной полярности. Поверхность плиты имеет полярность одного знака, а детали — противоположного. В основании стола встроен нагревательный элемент малой мощности, поддерживающий температуру на рабочей поверхности стола на несколько градусов выше, чем температура окружающей среды, что предотвращает конденсацию влаги из воздуха.

Обрабатываемые заготовки устанавливаются на поверхность стола в жидкий диэлектрик для предотвращения попадания воздуха между заготовкой и диэлектрической пленкой, вызывающего ионизацию, сокращающую количество электрических зарядов на поверхности детали. При закреплении на плите нескольких мелких деталей они обязательно должны контактировать друг с другом и по меньшей мере одна из деталей должна контактировать с токопроводящей пластиной. Особенно целесообразно применение электростатических плит для шлифования тонких деталей.

На рис. 3.2.19 показана схема электростатической плиты. Плита состоит из полупроводникового элемента 7, изолированного от чугунного корпуса 4 и основания 10 диэлектрическими прокладками 5 и 3. Полупроводниковый элемент через токопроводящий слой 2 соединен с одним полюсом, а пластина 9 через корпус 4 и основание 10 — с противоположным полюсом выпрямителя 1, к которому подводится переменный ток напряжением 110 В, преобразуемый в постоянный ток напряжением 3000 В. Зеркало полупроводникового элемента покрыто пластиком 6 из эпоксидной смолы. Обрабатываемая заготовка 8 устанавливается на зеркало плиты и доводится до контакта с пластиной 9. При замыкании электрической цепи постоянный ток небольшой силы подводится к полупроводниковому элементу и обрабатываемой заготовке, получающим заряды статического электричества противоположной полярности, вследствие чего обрабатываемая заготовка притягивается к поверхности плиты. Материал детали не является лимитирующим фактором для закрепления ее на электростатических плитах. На электростатических плитах закрепляются детали из алюминия, бронзы, меди, магния и других подобных материалов. На ней также могут быть закреплены детали из диэлектрических материалов — стекла, керамики, пластмассы, резины и т.д. Детали из таких материалов предварительно покрывают металлическим порошком или токопроводящим лаком. По сравнению с магнитными плитами электростатические создают меньшие притягивающие силы. Для надежного закрепления деталей необходимо, чтобы установочная поверхность деталей имела небольшую шероховатость.

**Пружинные приводы** обеспечивают зажим заготовок за счет силы упругости пружин, а разжим — посредством пневматики, гидравлики и электромеханического привода или механически подвижными частями станка. Такие приводы обеспечивают полную безопасность закрепления заготовок. Однако силы зажима колеблются в зависимости от изменения допуска на размер заготовки. В тисках с пружинным зажимом и гидравлическим разжимом пакет тарельчатых пружин, воздействуя на подвижную губку, закрепляет заготовку. Для раскрепления заготовки в гидроцилиндр подается масло под давлением от электро- или пневмогидравлического источника давления. Поршень гидроцилиндра, сжимая пакет пружин, раскрепляет заготовку.

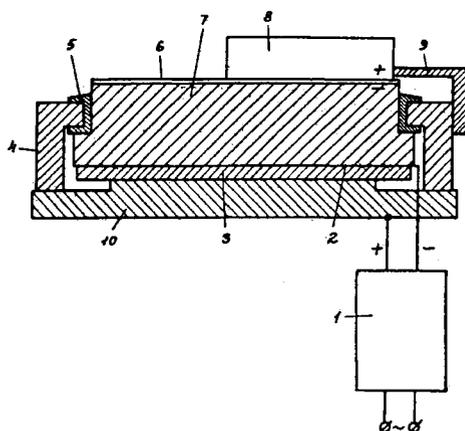


Рис. 3.2.19. Схема электростатической плиты

### 3.2.3. СТАНДАРТИЗОВАННЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ МНОГОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В условиях рыночной экономики необходимо интенсивное обновление материально-технической базы производства. Сроки выпуска изделий машиностроения сокращаются до 2-3 лет, а на заводах с мелкосерийным производством до одного года. Моральное старение машин во многих случаях наступает значительно раньше физического.

Специальные приспособления при смене объекта производства не могут быть использованы, в результате чего такие приспособления, на которые было затрачено большое количество материалов и значительные трудовые затраты для их проектирования и изготовления, хотя в условиях мелкосерийного и серийного производства еще физически не изношены, идут в лом на переплавку.

Проектирование и изготовление новых специальных приспособлений существенно увеличивает сроки и стоимость подготовки производства. Усложнение конструкций машин, повышение их быстроходности, точности и надежности требует увеличения количества приспособлений и усложнения их конструкций, что увеличивает затраты на их проектирование и изготовление.

Приспособления многократного применения могут быть использованы при смене объекта производства вплоть до их физического износа (7-10 лет) за счет переналадки или переконпоновки приспособлений. Применение таких приспособлений позволяет

значительно сократить количество приспособлений, поскольку они заменяют в условиях мелкосерийного производства, доминирующего в машиностроении, значительное количество специальных приспособлений. Стандартизованные приспособления многократного применения можно изготовлять на специализированных предприятиях, что значительно снижает их стоимость и повышает качество за счет использования прогрессивных заготовок и материалов и применения новых технологических процессов изготовления приспособлений большими сериями. К переналаживаемым приспособлениям предъявляются ряд требований. Они должны иметь высокую гибкость и мобильность, обеспечивающих быструю переналадку, должны обладать высокой прочностью, жёсткостью, виброустойчивостью, надёжностью, обеспечивать высокую повторяемость.

Стандарт предусматривает пять видов (подсистем) переналаживаемых приспособлений:

- подсистема универсальных безналадочных приспособлений (УБП);
- подсистема универсально-наладочных приспособлений (УНП);
- подсистема специализированных наладочных приспособлений (СНП);
- подсистема универсально-сборных приспособлений (УСП);
- подсистема сборно-разборных приспособлений (СРП).

Приспособления подсистемы УБП обеспечивают установку заготовок широкой номенклатуры. Конструкция УБП представляет собой законченный механизм долговременного действия с постоянными (несъемными) элементами для установки различных заготовок, предназначенный для многократного использования без доработки, который эффективно применять в условиях единичного и мелкосерийного производства. Система характеризуется применением универсальных регулируемых приспособлений, не требующих изготовления специальных деталей. К УБП относятся машинные тиски, поворотные столы, стойки и т.п.

Приспособления подсистемы УНП более универсальны, так как позволяют за счет применения сменных наладок устанавливать заготовки более широкой номенклатуры. *Под сменной наладкой* понимается элементарная сборочная единица, т.е. самостоятельная специальная часть компоновки, обеспечивающая установку определенных заготовок на базовом приспособлении, или совокупность единиц, предназначенных для базирования конкретной заготовки. УНП состоит из конструкции универсального базового агрегата (по схемам

базирования и конструктивным формам обрабатываемых заготовок) и сменных наладок. *Базовый агрегат* — неизменяемая постоянная часть приспособления, предназначенная для установки наладок в процессе компоновки конструкций наладочных станочных приспособлений — представляет собой законченный механизм долговременного действия, предназначенный для многократного использования в компоновках в условиях единичного и мелкосерийного производства. Базовая часть приспособления изготавливается заранее по соответствующему стандарту. При переходе на изготовление новых изделий базовые агрегаты используются многократно.

Проектированию и изготовлению подлежит лишь наиболее простая и недорогая часть приспособления — сменная наладка. Замена наладок осуществляется без снятия базового приспособления со станка. Для установки наладок на базовом агрегате предусматриваются поверхности для базирования наладок. Базирование наладок осуществляется по плоскости и цилиндрическим отверстиям, или П-образным пазам, а также Т-образным пазам. Для закрепления наладок используют резьбовые отверстия или Т-образные пазы. Цикл оснащения операции универсально-наладочным приспособлением состоит из проектирования, изготовления и установки наладки на базовом агрегате, на что затрачивается до 15 ч.

УНП применяют для токарных, фрезерных, сверлильных и др. операций. Для обработки заготовок на токарных станках применяют кулачковые и цанговые патроны. Сменными наладками кулачковых патронов являются кулачки, а цанговых — сменные цанговые втулки с одинаковыми размерами конусной поверхности и с разными размерами цилиндрических поверхностей центрирующих и закрепляющих заготовки разных диаметров. Для токарной обработки деталей типа корпусов подшипников, кронштейнов, рычагов применяют однокулачковые универсально-наладочные патроны со сменными установочной и зажимной наладками для установки рычага.

На фрезерных станках широко применяются универсально-наладочные тиски со сменными наладками-губками.

На сверлильных станках применяют скальчатые кондукторы со сменными наладками: кондукторными плитами и установочными наладками.

Приспособления подсистемы СНП предназначены для установки родственных по конфигурации заготовок различных габаритов с идентичными схемами базирования. СНП состоит из конструкции специализированного

(по схеме базирования и виду обработки типовых групп изготавливаемых деталей) базового агрегата и сменных наладок.

Каждый базовый агрегат рассчитан на установку заготовок одного и того же типа. Во многих случаях применяются многоместные СНП. Как правило, СНП снабжены гидравлическим или пневматическим приводом. СНП широко применяются в качестве групповых приспособлений для обработки заготовок по групповой технологии. Эффективной областью применения СНП является серийное производство. Цикл оснащения операции СНП состоит из проектирования, изготовления и установки наладки, на что в среднем затрачивается 15 ч.

На рис. 3.2.20 показано специализированное наладочное двухместное гидравлическое приспособление для фрезерования отверстий во фланцах. Заготовки устанавливаются в сменной наладке 1 по двум отверстиям на кольцо и срезанный палец и закрепляются планками 2, которые можно переустанавливать в пазах тяг 3, расстояние между которыми можно регулировать.

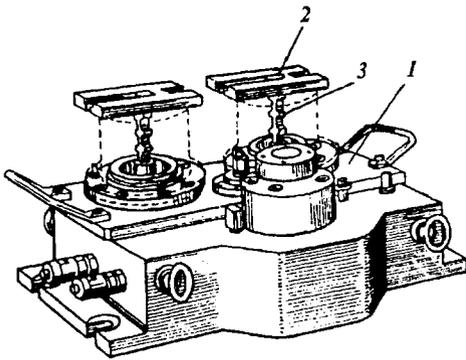


Рис. 3.2.20. Специализированное наладочное приспособление для обработки отверстий во фланцах

Приспособления подсистемы УСП собираются из заранее выполненных стандартных универсальных деталей и узлов из легированных сталей. УСП представляют собой комплексы стандартных деталей и узлов, собираемых без последующей механической обработки вследствие их высокой точности. После использования компоновок элементы УСП разбираются на составные части и в

дальнейшем многократно используются в различных сочетаниях в новых компоновках. Элементы УСП постоянно находятся в обращении в течение всего срока их службы. УСП не требуют стадии проектирования и изготовления. Цикл оснащения операции таким приспособлением состоит из сборки компоновок и её внедрения, на что затрачивается в среднем 3-4 ч. Рекомендуются для использования в мелкосерийном производстве.

Элементы УСП изготавливают из высоколегированной стали с высокой точностью. Их поверхности цементируются и подвергаются термической обработке до твердости 58...62 НRC, что обеспечивает высокую износостойкость элементов и длительный срок их службы (10-15 лет).

Номенклатура элементов УСП подразделяется на восемь групп:

1. Базовые детали: квадратные, прямоугольные и круглые плиты, оправки, угольники, т.е. детали, которые служат основанием приспособления.

2. Корпусные детали: опоры, проставки, призмы, угловые опоры, угольники, планки, т.е. все детали, которые служат для образования корпуса.

3. Установочные детали: шпонки, штыри, установочные пальцы, диски, центры и др. т.е. детали, служащие для установки и фиксации корпусных элементов или для установки заготовок.

4. Направляющие детали: переходные и кондукторные втулки, валики и колонки, т.е. детали, которые служат для направления инструментов и для настройки размеров приспособлений.

5. Прижимные детали: прихваты и планки, которые служат для закрепления заготовок в приспособлении.

6. Крепежные детали: болты, винты, шпильки, гайки, шайбы, которые служат для соединения между собой элементов приспособлений.

7. Разные детали: ушки, вилки, оси, и т.д.

8. Сборочные единицы: поворотные головки, фиксаторы, центровые бабки, подвижные призмы, кулачковые и тисочные зажимы, которые служат для ускорения сборки компоновок УСП.

Конструкции деталей и сборочных единиц УСП обеспечивают точность обработки в приспособлениях деталей до 8-го качества.

Универсально сборные накладные кондукторы (УСНК) предназначены для оснащения сверлильных операций. Кондукторы собираются из комплекта элементов УСНК (рис. 3.2.21). После обработки партии заготовок кондукторы разбирают на составные час-

ти, из которых сразу же можно собирать кондукторы для обработки заготовок других деталей, т.е. одни и те же элементы многократно применяются в одних и тех же компоновках. Все элементы УСНК взаимозаменяемы с другими элементами УСП. УСНК целесообразно применять на предприятиях с единственным и мелкосерийным характером производства, в ремонтных, инструментальных и экспериментальных цехах — независимо от характера основного производства, а также в серийном и крупносерийном производствах при освоении новых изделий. В зависимости от формы УСНК подразделяются на круглые (УСКИК) и прямоугольные (УСПНК). Круглые кондукторы предназначены для обработки отверстий, расположенных по окружности, а прямоугольные — для обработки отверстий, расположенных по прямоугольному контуру.

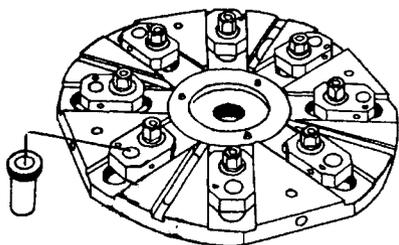


Рис. 3.2.21. Универсально-сборный круглый накладной кондуктор

Материальной базой прямоугольных кондукторов является набор планок различной длины с Т-образными пазами, которые служат для сборки каркасов кондукторов, соединительных планок и уголников, опор с отверстиями для установки кондукторных втулок и других деталей. При сборке прямоугольных кондукторов используют детали комплекта УСП. Самостоятельно комплект УСПНК использоваться не может.

Приспособления подсистемы СРП собираются из стандартных деталей и узлов как специальные приспособления долгосрочного применения. Возможно частичное использование в компоновке специальных деталей. Обрабатываемая заготовка контактирует с базами компоновок через частично обработанные базовые поверхности наладок. В отличие от деталей и узлов УСП, которые имеют универсальное назначение (точная обработка и универсальные базы на всех плоскостях), детали и узлы СРП должны иметь функциональное назначение (с соответственным разграничением баз по назначению). В компо-

новке СРП, в отличие от УСП, узлы преобладают над деталями. Компоновка СРП собирается на весь период производства изделия в отличие от компоновки УСП, которая разбирается после обработки очередной партии деталей. Стандартные детали и узлы СРП должны изготавливаться заблаговременно. Применение СРП эффективно в серийном производстве. Цикл оснащения операций СРП состоит из проектирования компоновки, изготовления специальных деталей (если требуется), сборки компоновки (и обработки баз) и внедрения, на что затрачивается в среднем 20-25 ч. Сочленение элементов осуществляется посредством соединений "палец-отверстие".

#### 3.2.4. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ И ГПС

Для обеспечения высокой точности и производительности обработки заготовок на станках с ЧПУ, применяемые на них приспособления в отличие от приспособлений, используемых на традиционных универсальных станках, должны удовлетворять ряду специфических требований, обусловленных особенностью этих станков. Несоблюдение этих требований значительно снижает преимущества, которые могут быть получены от применения станков с ЧПУ.

Станки с ЧПУ являются высокоточными станками. Следовательно, для обеспечения высокой точности обработки заготовок приспособления должны быть выполнены повышенной точности. Погрешности базирования и закрепления, возникающие при установке заготовок в приспособлениях, должны быть сведены к минимуму (по возможности к нулю).

Станки с ЧПУ имеют повышенную жесткость и мощность. Следовательно, конструкции приспособлений не должны быть наиболее податливым звеном технологической системы, чтобы обеспечить использование полной мощности станка на черновых операциях и обеспечить высокую точность на чистовых.

Относительное перемещение заготовки и инструмента на станках с ЧПУ осуществляется автоматически по программе в системе заранее заданных координат. Для этого приспособления должны обеспечивать полное базирование заготовок, т.е. лишения их всех шести степеней свободы за счет наличия шести опорных точек (опор). При этом необходимо строго определенное положение опор приспособления относительно начала координат станка (нулевой точки). Для этого необходимо полное базирование приспособле-

ний, обеспечивающее их строго определенное положение на станке.

Станки с ЧПУ обеспечивают возможность обработки максимального числа поверхностей (до четырех-пяти) с одной установки заготовки на поворотном столе. Для этого приспособления должны обеспечивать полную инструментальную доступность, т.е. возможность подхода инструмента ко всем обрабатываемым поверхностям.

Для сокращения времени простоя дорогостоящих станков с ЧПУ, затрачиваемого на смену заготовок, приспособления должны обеспечивать сокращение времени зажима-разжима заготовок, поскольку это время является доминирующим.

Возможность обработки на станках с ЧПУ максимального числа поверхностей с одной установки заготовки значительно увеличивает цикл обработки заготовки на одном станке. Следовательно, наиболее целесообразно использовать приспособления-дублиеры, что обуславливает возможность смены заготовки вне рабочей зоны станка в одном из приспособлений во время обработки заготовки, установленной в другом приспособлении.

Станки с ЧПУ выгодно отличаются от традиционных станков автоматов своей гибкостью, так как переналадка станка заключается лишь в смене программносителя. Однако, поскольку наибольшая часть подготовительно-заключительного времени затрачивается на смену или переналадку приспособлений, последние должны быть быстросменными или быстропереналаживаемыми.

Станки с ЧПУ являются основным средством автоматизации единичного, мелко- и среднесерийного производства. Следовательно, на таких станках наиболее эффективно применять переналаживаемые приспособления, обеспечивающие путем их быстрой переналадки или перекомпоновки установку заготовок деталей широкой номенклатуры.

На станках с ЧПУ токарной группы для установки заготовок деталей типа фланцев, зубчатых колес, втулок, коротких валиков применяют самоцентрирующие кулачковые патроны, к которым предъявляются ряд требований: высокая точность и местность, быстрый зажим-разжим заготовки, быстрая переналадка кулачков на требуемый диаметр, снижение влияния центробежных сил на силу зажима заготовки при высоких частотах вращения шпинделя, наличие достаточно большого отверстия для установки как прутковых заготовок, так и штучных заготовок (поковок, отливок). Осуществляется быстрая переналад-

ка патрона на установку в центрах заготовок деталей типа валов.

На станках с ЧПУ применяют быстро-переналаживаемые патроны, обеспечивающие быструю переустановку или смену кулачков. Закрепление, раскрепление кулачков после их переустановки или замены осуществляют тягой при повороте эксцентрикового валика. Для быстрой переналадки патрона с установки деталей типа "фланец" на установку деталей типа "вал" применяют патрон, конструкция которого показана на рис. 3.2.22. Быстрая переналадка осуществляется заменой сменной вставки. При установке в патрон вставки с подпружиненным центром заготовки устанавливаются в центрах. При этом, благодаря зазору между хвостовиком вставки и втулкой с наклонными пазами, кулачки будут "плавающими", т.е. они не центрируют заготовку, установленную по центровым гнездам, а только закрепляют её, передавая крутящий момент при обработке. Для снижения влияния центробежных сил применяют высокоскоростные патроны с противовесами, соединенными рычагами с основаниями кулачков.

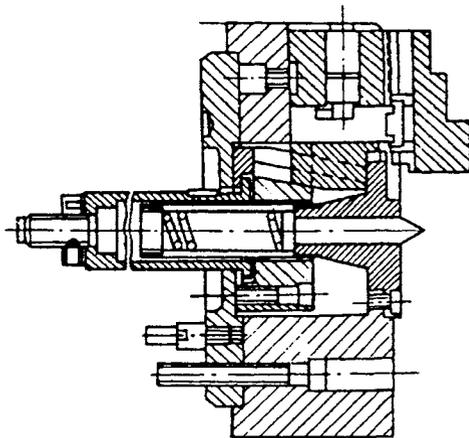


Рис. 3.2.22. Патрон с быстрой переналадкой с установки деталей типа «фланец» на деталь типа «вал»

В качестве механизированных приводов патронов применяют закрепляемые на заднем конце шпинделя станка пневмо- или гидроцилиндры с полым штоком для возможности обработки прутковых заготовок, а также электромеханические приводы. Для возможности обработки заготовок деталей типа "вал" с одной установки применяют переналаживаемые торцовые поводковые патроны зубчатые со

сменными поводками или штырьковые с переставными штырьками.

На станках с ЧПУ фрезерно-сверлильно расточной группы и многоцелевых станках применяют универсально-наладочные (модульные) приспособления, базовой частью которых являются плиты и угольники с сеткой пазов, с сеткой пазов и отверстий, с сеткой чередующихся цилиндрических и резьбовых отверстий, с сеткой ступенчатых отверстий, верхняя часть которых цилиндрическая, а нижняя — резьбовая. На плитах и угольниках устанавливаются базирующие и зажимные элементы приспособлений.

В серийном производстве применяют специализированные наладочные приспособления системы СНП-ЧПУ. В процессе обработки заготовки, установленной в одном из патронов, осуществляется смена заготовки во втором патроне.

В единичном и мелкосерийном производстве на фрезерных и сверлильных станках с ЧПУ широко применяются механизированные универсально-сборные приспособления (УСПМ-ЧПУ). Соединение элементов осуществляется посредством пазов и шпонок. Основной системы УСПМ-ЧПУ являются гидроблоки — базовые плиты со встроенными гидроцилиндрами. Используются также плиты, на которых монтируются гидравлические зажимные устройства. Источником давления масла в гидроцилиндрах (10 МПа) является пневмогидравлический преобразователь давления. Для повышения доступности инструментов и улучшения условий стружкоудаления разработана система бесшланговой универсально-сборной переналаживаемой оснастки (УСПО). В базовой плите выполнены соединенные между собой каналы, а на установочной поверхности плиты — сетка резьбовых отверстий, пересекающихся с каналами. В отверстия ввинчивают резьбовые хвостовики вертикальных или горизонтальных гидроцилиндров. Остальные отверстия заглушаются резьбовыми пробками. Все каналы плиты соединяются с отверстием для присоединения пневмогидравлического преобразователя давления.

На рис. 3.2.23 показаны примеры бесшланговых приспособлений для установки корпусных деталей: *а* — с вертикальными цилиндрами (толкающего и тянущего действия) цилиндрами; *б* — с горизонтальными (боковыми) цилиндрами.

Для увеличения точности фиксации элементов УСП и повышения жесткости компоновок разработаны системы УСПО с безззорным соединением элементов. Безззорная фиксация осуществляется посредством сетки глухих отверстий, выполненных в сопрягае-

мых элементах разрезных втулок и конусных пальцев. Для быстрого и легкого соединения элементов УСП разработана новая система УСПО-У. Сочленение элементов осуществляется посредством сетки У-образных пазов и цилиндрических шпонок, которые посредством пластмассового кольца собраны в блок, легко устанавливаемый в отверстия, выполненные на перекрестях У-образных пазов.

В серийном производстве применяют сборно-разборные приспособления системы СРП-ЧПУ. Приспособления переналаживаются путем перекомпоновки, регулирования положения установочных и зажимных элементов или замены наладок. Элементы СРП-ЧПУ фиксируются между собой посредством отверстий и пальцев. В базовые плиты приспособлений встроены гидроцилиндры. В большинстве случаев такие приспособления выполняются многоместными.

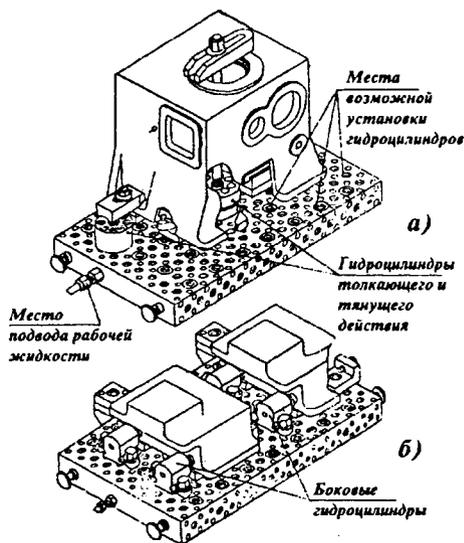


Рис. 3.2.23. Бесшланговые приспособления системы УСПО:

- а* — с вертикальными гидроцилиндрами;  
*б* — с горизонтальными гидроцилиндрами

В гибких производственных системах ГПС для производства в условиях серийного и крупносерийного производства заготовки обрабатываются большими партиями. В этом случае целесообразно применять переналаживаемые приспособления, стационарно установленные на станках. При этом приспособления переналаживаются вручную. Смена

заготовки в приспособлении осуществляется промышленным роботом. Приспособления могут также быть установлены не на станках, а на спутниках, автоматически устанавливаемых на станок из магазинов-накопителей. ГПС для производства комплектов, в которых обрабатываются различные заготовки сборочного узла или детали, применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства. В этих условиях обрабатываются свыше 80 % деталей машиностроения. В таких ГПС заготовки обрабатываются минимальными партиями вплоть до поштучной обработки. Следовательно, в таких ГПС должны применяться приспособления, автоматически переналаживаемые или заменяемые по команде ЧПУ ЭВМ, аналогично всем другим звеньям ГПС.

В ГПС для обработки деталей тел вращения применяют автоматически переналаживаемые патроны. При этом, поскольку базовыми поверхностями заготовок являются цилиндрические поверхности, автоматическая переналадка патронов осуществляется автоматической переустановкой или сменой кулачков. В ГПС применяются следующие типы патронов: 1) широкодиапазонные с автоматическим регулированием положения кулачков; 2) с автоматической переустановкой кулачков; 3) с автоматической сменой кулачков (последовательно или одновременно). Первые два типа патронов не обеспечивают возможности черновой и чистовой обработки заготовок на одном станке, поскольку не предусматривают возможности замены закаленных кулачков сырыми.

В ГПС для обработки корпусных и плоскостных деталей на многоцелевых станках заготовки имеют различные базовые поверхности (как по конфигурации, так и по размерам), следовательно, применять стационарные приспособления для установки заготовок на станке неприемлемо. Поэтому на станках проводится не смена заготовок, а смена спутников, имеющих одинаковые базовые поверхности с различными заготовками, установленными в различных приспособлениях, которые закрепляются или компонуются на спутниках. Заготовки базируются и закрепляют в приспособлениях на станции смены заготовок, откуда спутники с заготовками поступают в накопители.

Закрепление заготовок осуществляется винтовыми зажимами вручную или посредством гайковерта. Для использования гидравлических зажимных устройств необходимо наличие самотормозящихся механизмов зажи-

мов, поскольку после закрепления заготовок на спутнике он отсоединяется от источника давления масла. Применение спутников имеет ряд недостатков: для работы во вторую и третью смены по безлюдной технологии требуется большое количество дорогостоящих спутников; для возможности установки спутников на любой из станков ГПС необходима их взаимозаменяемость, что обуславливает необходимость их изготовления с очень высокой точностью; спутники не обеспечивают полной инструментальной доступности, что требует переустановки заготовок в трех-четыре приспособления для полной обработки. Поэтому перспективным является применение автоматически переналаживаемых по команде ЧПУ бесспутниковых приспособлений.

На рис. 3.2.24 показана схема такого приспособления. Приспособление состоит из нижней и верхней поворотных головок, в которых установлены по четыре револьверные головки соответственно с базирующими  $B_1$ ;  $B_2$ ;  $B_3$  и зажимными  $Z_1$ ;  $Z_2$ ;  $Z_3$  элементами. В боковой головке установлены две револьверные головки с подводимыми опорами  $Q_1$ ;  $Q_2$  и  $Q_3$ . Базирующие и зажимные элементы, а также подводимые опоры, могут занимать любое программируемое положение относительно друг друга, что обеспечивает возможность базирования и закрепления заготовок различной конфигурации и размеров.

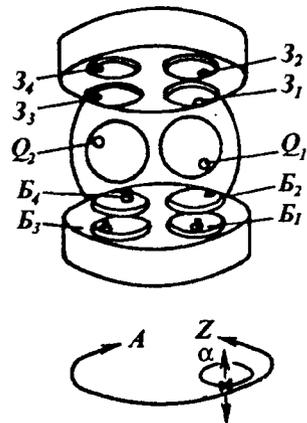


Рис. 3.2.24. Схема бесспутникового приспособления с автоматической переналадкой

### 3.2.5. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Измерения физических величин специальными методами с помощью технических средств называют *техническими измерениями*.

В машиностроении наиболее часто осуществляют измерения линейных и угловых размеров деталей и изделий, шероховатости и волнистости, отклонения расположения и формы поверхностей. Эти виды измерений в общем виде принято называть линейными и угловыми.

Технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические параметры и свойства, называют *средствами измерения*. Они подразделяются на меры, измерительные приборы, установки, системы. Достаточно часто простейшие средства измерения называют *измерительными инструментами*.

*Меры* — это тела, вещества или устройства, предназначенные для воспроизведения конкретных единиц измерения или их кратных и дольных значений (например, концевая мера длины, гиря, линейка и др.).

*Измерительные приборы* являются средствами измерения, предназначенными для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Они подразделяются на аналоговые, цифровые, показывающие, регистрирующие, самопишущие, печатающие, интегрирующие и др.

По конструкции и способу преобразования измерительной информации приборы для линейных и угловых измерений делят на следующие виды: штриховые приборы с нониусом (штангенинструмент); приборы с микрометрическими винтовыми парами (микрометрические инструменты); рычажные (миниметры); зубчатые (индикаторы часового типа); рычажно-зубчатые (индикаторы); пружинные (микаторы и микрокаторы); оптико-механические (оптиметры, оптикаторы); оптические (измерительные микроскопы, проекторы); пневматические (ротаметры); электроконтактные; индуктивные, индукционные, фотоэлектрические; радиоактивные и др.

По степени универсализации приборы подразделяются на универсальные, предназначенные для измерения одноименных величин различных изделий, специализированные, — для измерения однотипных изделий (например, ступенчатых валиков) или однотипных параметров (например, шероховатости) и специальные, — для измерения конкретной детали либо конкретного изделия.

По степени автоматизации различают ручные, механизированные, полуавтоматические и автоматические средства измерения.

Под *механизированными измерениями* понимают такие, при которых одна из операций (чаще всего подача деталей на измерительную позицию или транспортировка ее из зоны измерения) осуществляется с помощью специального механизма. При полуавтоматическом контроле процесс измерения осуществляется автоматически, а остальные операции (транспортировка, базирование и т.п.) осуществляются вручную. Автоматический контроль обеспечивает все необходимые операции без участия оператора. Все средства измерения по их целевому применению могут быть разделены на средства *пассивного* (послеоперационного) и *активного* (технологического) контроля. Первая группа средств служит либо для контроля годности изделий, либо для определения числовых значений измеряемых параметров. Как правило, эти процессы носят констатирующий характер и сводятся к браковке деталей. Ко второй группе относятся средства измерения, которые позволяют оперативно использовать результаты измерения для управления технологическим процессом. Активный контроль преимущественно осуществляют в процессе изготовления для предупреждения появления бракованных изделий.

Методология послеоперационного контроля, использующего ручные средства измерения, а также конструкции и метрологические возможности последних, широко известны и достаточно полно рассмотрены в технической литературе. Общими недостатками этих приборов и инструментов является их невысокая производительность и зависимость качества измерений от уровня квалификации оператора. Подобных недостатков лишены автоматические средства измерения.

Послеоперационный автоматический контроль осуществляется средствами измерения, которые можно разделить на три основные группы.

Средства измерения, составляющие первую группу, снабжены звуковым или световым автоматическим сигналом, выполненным чаще всего в виде светофорного устройства.

Контрольные полуавтоматы представляют собой устройства с автоматизированной контрольной операцией, но с ручной загрузкой-выгрузкой измеряемых изделий.

Контрольные автоматы в зависимости от числа измерительных позиций могут быть одно- и многопозиционными. Средства автоматического послеоперационного контроля, осуществляющие контроль (измерение) одного параметра называют *одномерными*, нескольких — *многомерными*. Последние, в свою

очередь, разделяют на комплексные, контролирующие на одной позиции несколько параметров, и групповые, когда каждый параметр контролируется на своей измерительной позиции. В массовом производстве широко используется много- и однопозиционные контрольно-сортировочные автоматы.

Особое место в автоматических средствах послеоперационного контроля занимают координатно-измерительные машины (КИМ), позволяющие автоматизировать многопараметрический контроль сложных корпусных деталей даже в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Средства *активного контроля* применяемые в металлообработке, можно разделить на устройства для прямых и косвенных методов измерения.

Все приборы, использующие первый метод, контролируют непосредственно размер детали, поверхность которой является при этом измерительной базой (двух-, трехконтактные приборы для контроля диаметров, системы с жесткими калибрами и др.).

При косвенном методе значение обрабатываемого размера оценивается по контролируемому положению режущей кромки инструмента, исполнительных органов станка, либо положению поверхности детали по отношению к базе установки прибора. Косвенный метод обладает большими погрешностями, нежели прямой.

По функциональному назначению средства *активного контроля* подразделяются на четыре группы:

устройства, осуществляющие контроль за текущим значением размера непосредственно в процессе обработки прямым или косвенным методом;

подналадчики, использующие цепи обратной связи для изменения настройки станка или управляющие им при отклонении контролируемого размера от заданного значения или выхода его за допустимые границы;

блокирующие устройства, контролирующие размеры деталей и дающие команду на прекращение обработки в случае выхода размеров за установленные границы. Существуют блокирующие устройства для исключения станка при значительном возрастании мощности резания, температуры, контролирующей правильность базирования, размеры припуска, заполнение магазинов-накопителей и др.;

устройства входного контроля для оценки размерных параметров заготовок либо для контроля положения режущего инструмента (фиксации момента касания инструмента обрабатываемой детали).

Все автоматические средства активного и пассивного контроля в качестве измерительного устройства используют первичные преобразователи (датчики), преобразующие изменения контролируемого линейного размера в выходной информативный сигнал.

Пневматические приборы для линейных измерений используют принцип регистрации расхода сжатого воздуха в зависимости от изменения площади сечения канала сопла. При постоянном давлении в камере расход будет зависеть от размеров выходного отверстия. Если рядом с соплом поместить какой-либо объект, мешающий выходу воздуха, то давление в камере возрастет. Оно будет тем больше, чем ближе к торцу сопла будет находиться этот предмет. Такое сочетание сопла и объекта получило название "сопло-заслонка". При пневматических измерениях в качестве заслонки может быть использована поверхность измеряемой детали 1 (при бесконтактном методе) или элемент прибора, который меняет свое положение относительно сопла 2 с изменением контролируемого размера (рис. 3.2.25). Измеряя манометрическим или ротаметрическим методом расход воздуха через зазор  $z$ , можно судить о размере измеряемой детали.

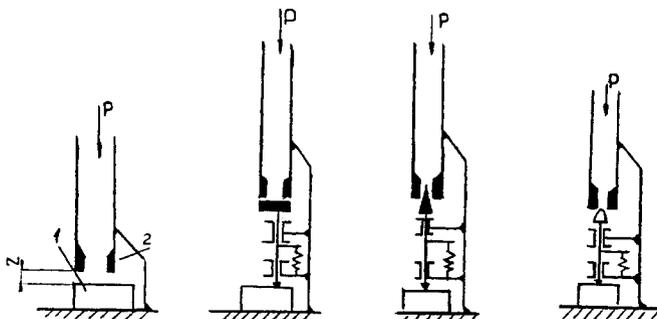


Рис. 3.2.25. Схемы пневматических преобразователей

Принципиальная схема манометрического прибора приведена на рис. 3.2.26. Сжатый воздух под постоянным давлением через входное сопло 4 поступает в измерительную камеру 3 и далее через измерительное сопло 2 выходит в атмосферу; при этом расход будет зависеть от зазора  $z$  между соплом 2 и заслонкой (поверхностью детали) 1. Изменение давления пропорциональное текущим значениям зазора  $z$  контролируется по манометру 5. Более совершенной является дифференциальная схема измерения.

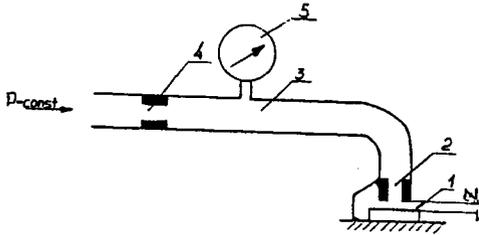


Рис. 3.2.26. Пневматический прибор манометрического типа

Дифференциальная схема измерения состоит из двух ветвей, каждая из которых построена по обычной схеме. Дифференциальная схема менее чувствительна к колебаниям рабочего давления, так как она регистрирует разницу давлений в обеих ветвях. В качестве измерителя этой разницы применяются сильфонные, мембранные, реже жидкостные манометры. Принцип работы пневматического дифференциального прибора, использующего в качестве измерителя сильфоны, поясняет рис. 3.2.27. Очищенный и стабилизированный по давлению воздух из пневмосети через входные сопла 10 поступает в полости сильфонов. Из левого сильфона он выходит через кольцевой зазор  $z$  (между измерительным соплом 2 и поверхностью измеряемой детали 1) в атмосферу. При этом в сильфоне создается измерительное давление, величина которого зависит от размера контролируемой детали 1. Из правого сильфона воздух через сопло 9 противодавления выходит в атмосферу, создавая постоянное давление в полости сильфона. Подвижные торцы сильфонов жестко связаны рамкой 3, подвешенной на плоских пружинах 8. Положение рамки 3 определяется разностью измерительного давления и некоторого постоянного противодавления. Перемещения рамки 3 регистрируются рычажно-зубчатым механизмом 4 со стрелкой и шкалой. На рамке с помощью плоских пружин 5 закреплены подвижные электрические контакты с упорами 6. Винтами 7 регистрируется момент срабатывания электрических контактов при заданном размере контролируемой детали. При дифференциальных измерениях вместо узла противодавления устанавливается второе измерительное сопло, аналогичное соплу 2. В этом случае дифференциальная схема может быть использована для измерения разности размеров двух деталей (эталонной и обрабатываемой) или разности двух размеров одной детали (измерение овальности, конусообразности, огранки).

На рис. 3.2.28 приведены некоторые варианты применения пневматических приборов для измерения линейных размеров: 1 — измерение толщины изделия; 2 — определение среднего диаметра отверстия; 3 — измерение диаметра проволоки в процессе ее изготовления или перемотки; 4 — определение отклонения от перпендикулярности оси отверстия базовому торцу; 5 — измерение торцового и радиального биений; 6 и 7 — измерение огранки; 8 — определение овальности отверстия; 9 — определение разности размеров сопрягаемых деталей; 10 — определение расстояния между осями отверстий.

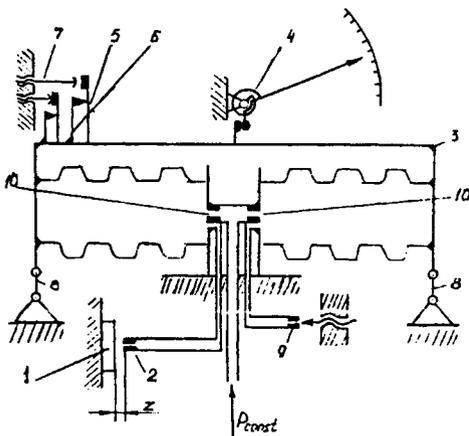


Рис. 3.2.27. Схема сильфонного дифференциального пневматического прибора

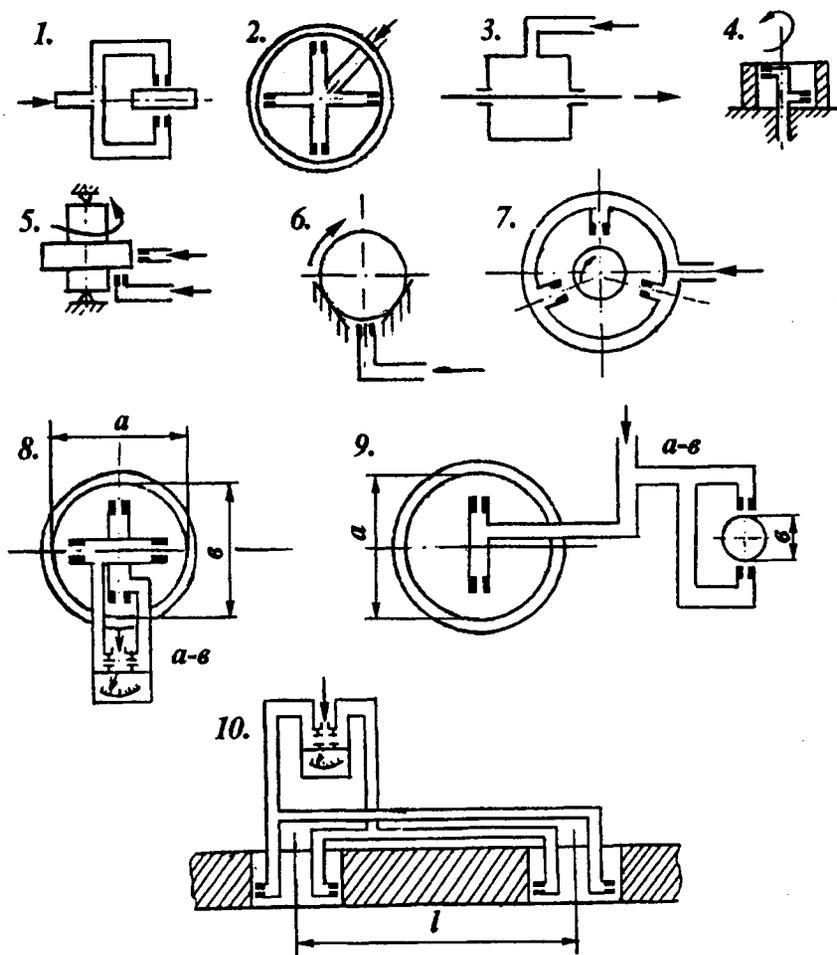


Рис. 3.2.28. Типовые схемы пневмоизмерений линейных размеров

Пневматические приборы обладают высокой надежностью и точностью. Цена деления шкалы у них может достигать значения 0,0001 мм.

*Электроконтактные преобразователи* преобразуют линейные перемещения измерительного стержня в электрические сигналы — команды посредством замыкания или размыкания электрических контактов. Электроконтактные преобразователи подразделяют на предельные и амплитудные. Первые осуществляют выдачу сигналов-команд при достижении контролируемым размером заданных предельных значений. Вторые применяют для контроля отклонения формы и срабатывают, когда величина этого отклонения достигла

допустимого значения независимо от размера самой детали.

В приборах активного контроля используют только предельные датчики; они же наиболее часто применяются в средствах автоматического контроля. На рис. 3.2.29 представлено устройство двухпредельного электроконтактного преобразователя. Измерительный стержень 8 с наконечником перемещается в направляющих втулках корпуса 4. Вилка 3 с направляющим штифтом предохраняет измерительный стержень от поворота. Измерительное усилие создается пружиной 6, которая одним концом крепится к корпусу 4, а другим — к хомутикам 7. В верхней расточке корпуса для визуального наблюдения крепят-

ся измерительная головка 9. Пластмассовая планка 11 с рычагом 12 и настроечными микровинтами 10 и 13 образует самостоятельный узел. Рычаг 12 подвешен на кресте из плоских пружин и имеет на концах два контакта. Верхний закреплен жестко, а нижний, поджатый плоской пружиной 15, может перемещаться, что позволяет рычагу поворачиваться на небольшой угол после замыкания контакта. В торцах 14 настроечных винтов запрессованы контакты. Настроечные микровинты 10 и 13 имеют барабаны с ценой деления 0,002 мм, которые используются для поднастройки. Рычаг 12 связан с измерительным стержнем 8 через хомутик 7, опирающийся твердосплавным ножом на корундовый штифт 5, образующий малое плечо рычага 12. Перемещение измерительного стержня вызывает поворот рычага и замыкание или размыкание контактов. Настройка датчика осуществляется по блокам концевых мер соответствующим предельным размерам контролируемой детали. Перемещения измерительного стержня в процессе настройки регулируется микрогайкой 2, которая по окончании этой операции отвинчивается на 1,5-2 оборота. Помещая под измерительный наконечник 1 блоки концевых мер регулировкой микровинтов 10 и 13, добиваются такого неустойчивого положения, при котором малейший выход размера за настроечные границы вызывает надежное замыкание контактов. Электроконтактные предельные датчики широко применяют в многомерных контрольных приспособлениях, контрольно-сортировочных автоматах, подналадчиках, упорах и др.

*Индуктивные и емкостные преобразователи* трансформируют линейные или угловые перемещения измерительного наконечника в электрический сигнал. В индуктивных приборах используется свойство катушки изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых ее параметров, определяющих величину индуктивности. Для увеличения индуктивности катушка, как правило, выполняется с ферромагнитным магнитопроводом, при этом один из его элементов — подвижен (якорь). Изменение индуктивности может происходить либо в результате изменения зазора между якорем и сердечником — магнитопроводом катушки (рис. 3.2.30, а), либо в результате изменения площади перекрытия якорем поверхности сердечника (рис. 3.2.30, б). Преобразователи, использующие принцип измерения зазора, обладают повы-

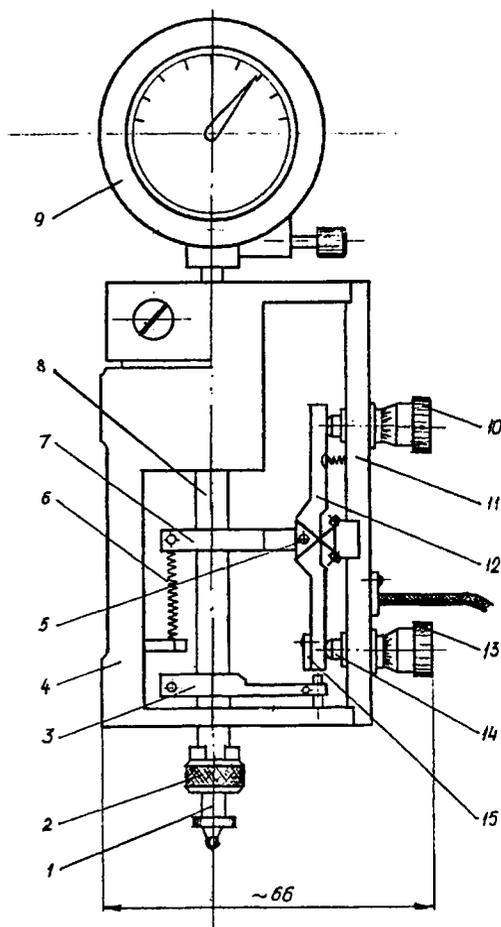


Рис. 3.2.29. Электроконтактный предельный преобразователь

шенной чувствительностью, но меньшим диапазоном измерения. Цена деления этих приборов составляет 0,00005-0,005 мм. Индуктивные преобразователи могут строиться по дифференциальной схеме (рис. 3.2.30, а, б, г, е) и по простой, — (рис. 3.2.30, в, д). В первых преобразователях перемещение якоря вызывает равные изменения индуктивности одновременно в двух одинаковых катушках, но с разными знаками. Такая конструкция менее восприимчива к колебаниям частоты и напряжения питающей сети и изменениям температуры окружающей среды, так как эти помехи приводят к одинаковым отклонениям в положительной и отрицательной цепях измерительной системы.

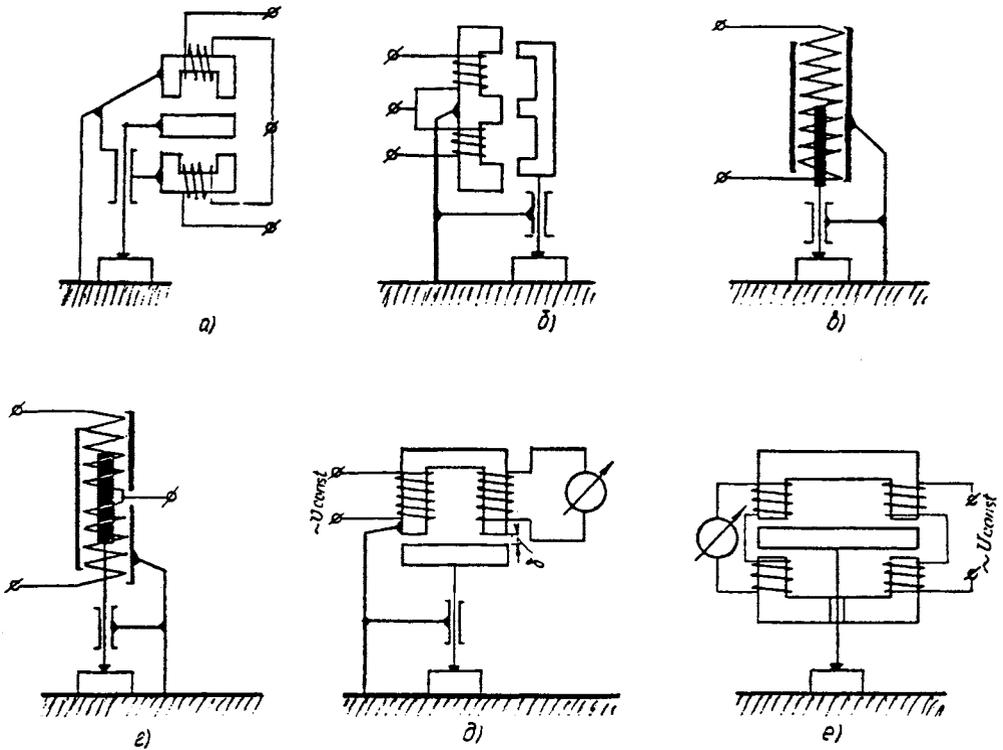


Рис. 3.2.30. Схемы индуктивных преобразователей

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкин И.М. Средства линейно-угловых измерений. М.: Машиностроение. 1987. 367 с.
2. Бломберг В.А., Ближнюк В.П. Перенастраиваемые станочные приспособления. Л.: Машиностроение. 1978. 200 с.
3. Карпов И.С., Меньшиков В.В. Системы стандартных станочных приспособлений и эксплуатации. М.: Машиностроение, 1980. 39 с.
4. Кузнецов Ю.И. Станочные приспособления с гидравлическими приводами. М.: Машиностроение. 1974. 152 с.
5. Кузнецов Ю.И. Технологическая оснастка к станкам с программным управлением. М.: Машиностроение. 1976. 224 с.
6. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: Справочник. М.: Машиностроение. 1983. 359 с.
7. Кузнецов Ю.И. Технологическая оснастка для станков с ЧПУ и промышленных роботов. М.: Машиностроение. 1986. 112 с.
8. Кузнецов Ю.И. Конструкции приспособлений для станков с ЧПУ. М.: Высшая школа. 1988. 304 с.
9. Марков Н.Н., Ганевский Г.Н. Конструкция, расчет и эксплуатация измерительных приборов и инструментов. М.: Машиностроение. 1981. 368 с.
10. Маханько А.М. Контроль станочных и слесарных работ. М.: Высшая школа. 1986. 269 с.
11. Педь Е.И. и др. Активный контроль в машиностроении. М.: Машиностроение. 1978. 352 с.
12. Станочные приспособления: Справочник. / Под ред. Б.Н. Вардашкина, А.А. Шатилова. М.: Машиностроение. 1984. т. 1. 592 с.
13. Станочные приспособления. Справочник / Под ред. Б.Н. Вардашкина, В.В. Данилевского. М.: Машиностроение. 1984. т. II. 350 с.
14. Точность и производственный контроль в машиностроении / Под ред. А.К. Кутая. Л.: Машиностроение. 1983. 978 с.

## Глава 3.3

## МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

## 3.3.1. ЛЕЗВИЙНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

По условиям резания и формообразования лезвийные инструменты можно разделить на две группы: для точения и для фрезерования (рис. 3.3.1).

При точении (строгании) траектория формообразующей точки режущей кромки или всей кромки принадлежит обрабатываемой поверхности и с учетом подачи имеет наименьшую необходимую для обработки длину.

При фрезерных процессах эта траектория либо периодически касается обрабатываемой поверхности, либо ее длина заведомо больше минимально необходимой, и во время циклов главного движения имеют место холостые пробоги режущих элементов, когда они не участвуют в процессе резания.

Производительность процесса резания единичного режущего элемента при фрезеровании в эквивалентных условиях всегда ниже, чем при точении.

Точение и фрезерование различаются условиями стружкообразования и схемой формирования остаточной шероховатости на обработанной поверхности.

Зубообрабатывающие инструменты, использующие для формообразования принцип обката, — классифицированы (рис. 3.3.2).



Рис. 3.3.1. Классификация инструментов для точения и фрезерования

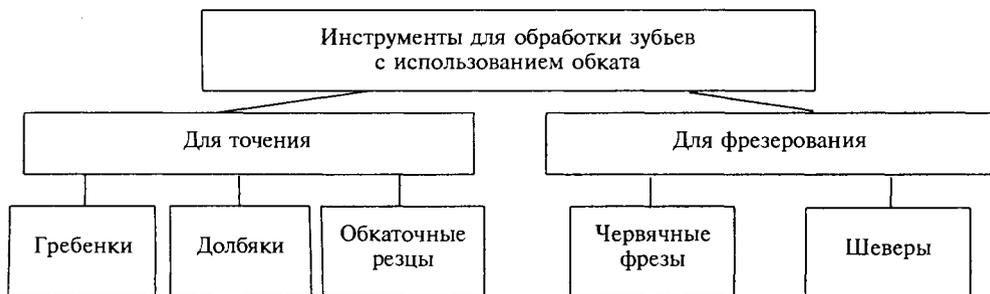


Рис. 3.3.2. Классификация инструментов для обработки зубьев с использованием обката

**Инструменты для точения.** Резцы применяют при обработке изделий на токарных, расточных, карусельных, строгальных, долбежных и специальных станках.

Универсальные резцы имеют одинаковый и минимальный по количеству набор конструктивных параметров. Инструменты имеют одну главную режущую кромку  $K$  и одну или две вспомогательные  $K_1$ . Конструктивно резцы имеют корпус (рис. 3.3.3), разделенный на режущую часть (головку) 1 и державку 2, сечение и форма которой определяется силовыми параметрами процесса резания и удобством установки и закрепления.

По форме головки различают резцы: прямые, отогнутые, изогнутые, чашечные; по сечению державки: прямоугольные, квадратные, круглые.

Резцы могут выполняться с приваренной головкой или режущей пластинкой, напаянной пластинкой, с механическим креплением пластинки и т.п.

Режущая часть характеризуется главным  $\phi$  и вспомогательным  $\phi_1$  углами в плане, передним углом  $\gamma$ , задним углом  $\alpha$ , вспомогательным  $\alpha_1$ , и углом наклона главной режущей кромки  $\lambda$ , который влияет на направление схода стружки.

Форма режущей кромки  $K$  может выбираться исходя из используемой подачи  $S$ , прочности, остаточной шероховатости  $R_z$ , формы обрабатываемой детали.

Универсальные резцы, как правило, используют затачиваемую заднюю поверхность, но при переточках, по необходимости, затачивают и переднюю поверхность.

Фасонные резцы (рис. 3.3.4) имеют линейный контакт режущей кромки и обрабатываемой поверхности, которой принадлежит и траектория главного движения. Выбирая направление подачи  $D_{S1}$  или  $D_{S2}$ , управляют процессом точения, обеспечивая производительность, виброустойчивость и работоспособность инструмента.

На режущей кромке  $K$  выбирают базовую точку  $A$ , которая располагается в осевом сечении обрабатываемой детали, и от которой назначаются величины заднего  $\alpha_A$  и переднего  $\gamma_A$  углов и угла  $\lambda_A$ . В остальных точках значения этих углов рассчитывают в сечениях, перпендикулярных к режущей кромке.

Форму режущей кромки  $K$  рассчитывают как линию пересечения обрабатываемой поверхности с передней поверхностью (плоскостью), проведенной через точку  $A$  под углами  $\gamma_A$ ,  $\lambda_A$ . Далее конструируют заднюю поверхность так, как у затылованных зубьев.

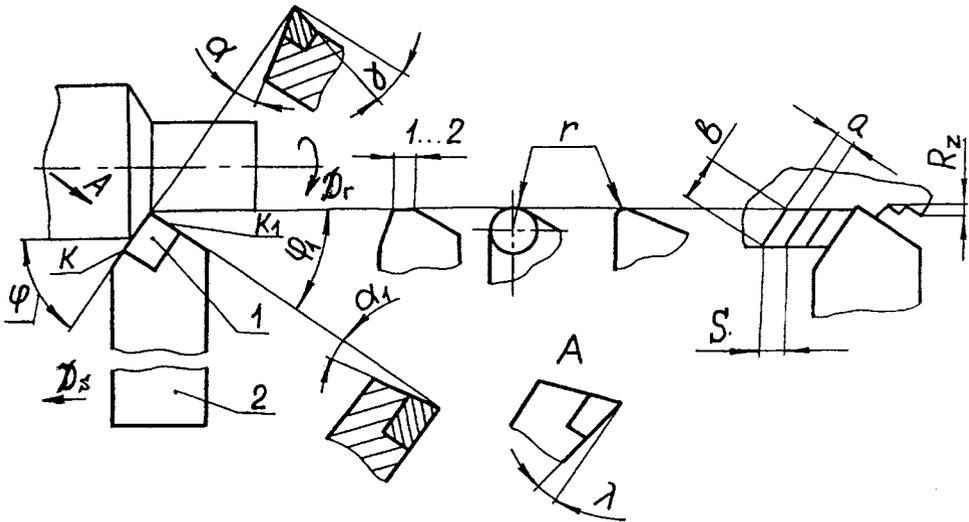


Рис. 3.3.3. Геометрические параметры универсальных резцов

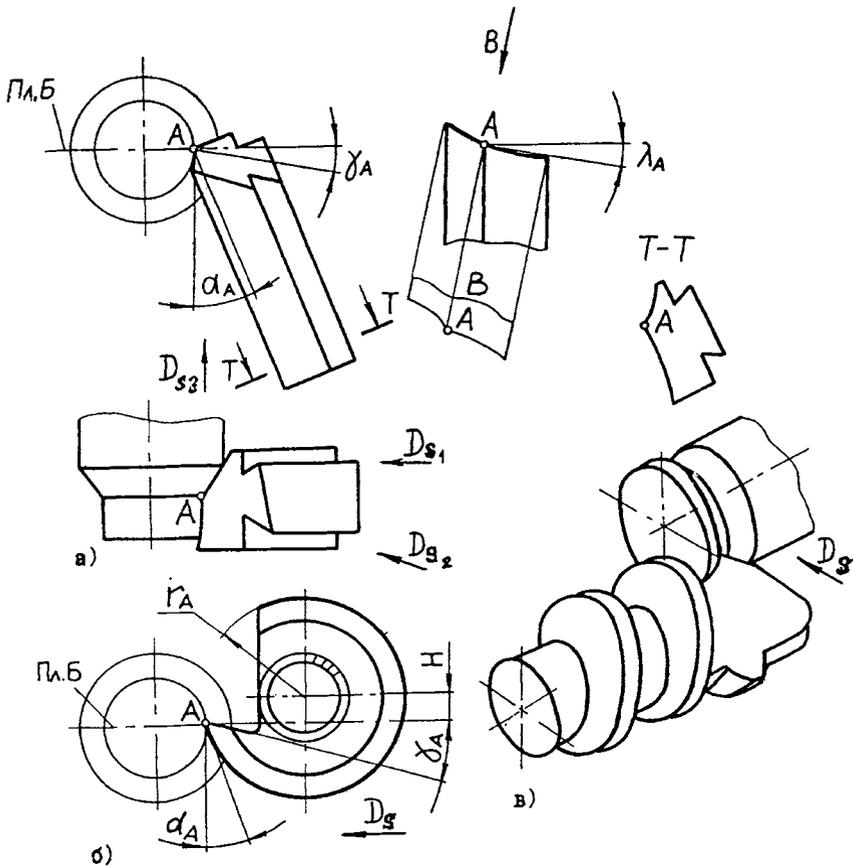


Рис. 3.3.4. Токарные фасонные резцы:  
 а — призматические; б — круглые; в — винтовые

Резцы разделяют на призматические (рис. 3.3.4, а), круглые (рис. 3.3.4, б), винтовые (рис. 3.3.4, в) и перетачивают по передней поверхности с сохранением формы режущей кромки и восстанавливая исходное положение базовой точки  $A$ , используя возможность вспомогательной оснастки.

Призматические резцы, использующие подачи  $D_{S1}$ ,  $D_{S2}$ , в осевой плоскости  $B$ , называют поперечными, а при использовании подачи  $D_{S3}$  по касательной к базовой точке  $A$  — тангенциальными. Эти резцы отличаются значительной трансформацией рабочих углов на длине рабочего хода инструмента и находят применение при неглубоких профилях и обработке дерева, пластмасс и цветных металлов.

При регламентированной эксплуатации выдерживают до 40 переточек.

У круглых и винтовых резцов параметры передней поверхности те же, что у призматических, а задние поверхности представляют собой поверхность вращения и винтовую поверхность постоянного шага. Для образования заднего угла  $\alpha_A$  ось этих резцов устанавливают выше плоскости  $B$  на величину  $H = r_A \sin \alpha_A$ .

Круглые резцы выдерживают до 120 переточек; винтовые превышают эту величину пропорционально длине их задней поверхности.

На чертежах фасонных резцов указывают размеры профиля режущей кромки  $K$  в плоскости передней поверхности (вид  $B$ ) и используют их при контроле инструментов, а также показывают профиль в сечении  $T-T$ , нормальном к задней поверхности, необходимый для ее обработки.

Сверла, зенкеры и развертки предназначены соответственно для черновой, получистовой и чистовой обработки круглых отверстий и являются мерными инструментами, ось которых совпадает с осью обрабатываемого отверстия. Главное движение обеспечивается вращением относительно оси инструментов, а подача также направлена вдоль этой оси. По назначению и конструкции сверла разделяют на перовые, спиральные, шнековые и для глубокого сверления.

Режущие элементы всех сверл оформлены как комбинация проходных расточных резцов. Посредством рабочей части режущие элементы соединяются с хвостовой частью либо цилиндрической, либо оформленной как конус Морзе.

*Перовые сверла* (рис. 3.3.5, а) представляют комбинацию двух расточных резцов, имеющих угол в плане  $2\varphi$  и вспомогательный угол  $\varphi_1 \approx 10...20^\circ$ , также перемычку под углом  $\psi$ , образованную как линия пересечения двух задних поверхностей.

*Спиральные сверла* (рис. 3.3.5, б) имеют винтовую линейчатую переднюю поверхность, которая образована движением прямой режущей кромки  $K$  по винтовой линии, которой

принадлежит базовая точка  $A$ . Задние поверхности образованы как у затылочных зубьев и, в зависимости от способа заточки, представляют коническую или винтовую поверхность или плоскость.

*Шнековые сверла* (рис. 3.3.5, в) предназначены для обработки отверстий глубиной до  $10d$ . Спиральная канавка образована винтовым движением осевого профиля  $abcd$  и имеет угол наклона  $\omega = 50...60^\circ$ . Участки  $ab$  и  $cd$  представляют собой прямые линии;  $bc$  — переходная кривая.

Задние поверхности образованы как и у спиральных сверл, а передняя поверхность обязательно затачивается, в результате образуется режущая кромка  $K$ . При обработке материалов, образующих сливную стружку, на передней поверхности затачивают стружколомающие элементы.

Диаметр сердцевин  $d_c = (0,08...0,1) d$ ; угол  $\psi = 45...55^\circ$ .

*Сверла для глубокого сверления* различают по конструктивным признакам и по способу подвода смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) в зону резания на ружейные, пушечные и эжекторные.

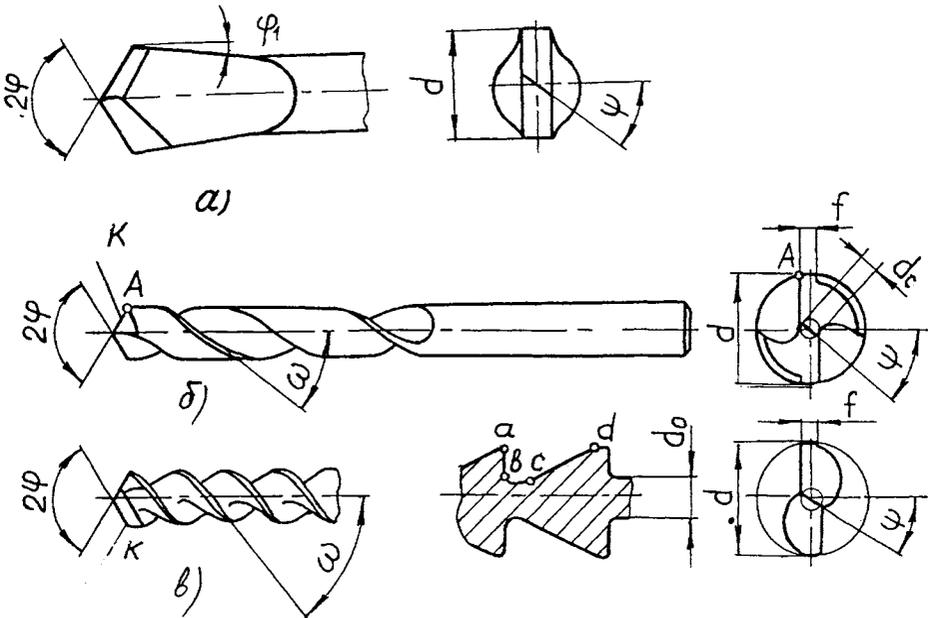


Рис. 3.3.5. Перовое (а), спиральное (б) и шнековое (в) сверла

Ружейные сверла (рис. 3.3.6) обрабатывают отверстия глубиной до  $100d$  и конструктивно разделяются на головку  $l_1$ , выполненную из инструментальной стали или оснащаемую твердосплавной пластиной, и припаянного (приваренного) к ней стебля  $l_2$ . Стебель передает крутящий момент, осевое усилие и через внутреннее отверстие подводит к некруглому отверстию головки СОТС.

Далее СОТС по участку  $ab$  попадает в зону резания и, используя канавку  $cd$ , выводит образующую стружку. Две режущие кромки  $K_1$  и  $K_2$  имеют различные углы в плане  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Нулевой стержень ( $d_c \approx 0,02d$ ) образуется в обрабатываемом отверстии за счет смещения от оси вращения передней поверхности и

способствует центрированию инструмента.

У пушечных сверл СОТС подается в направлении от стенок обрабатываемого отверстия к центральной полости сверла, через которую отводят стружку.

Эжекторные сверла для эффективного отвода стружки используют эффект разрежения потока СОТС на два, благодаря чему в зоне режущей кромки возникает область пониженного давления.

Развертки (рис. 3.3.7) обеспечивают точность 6-8 квалитетов. Рабочая часть их имеет заборный конус  $l_1$  под углом  $\varphi$ , цилиндрическую калибрующую часть  $l_2$  с диаметром  $d_0$  и обратный конус  $l_3$  под углом  $\varphi_1 = 0,5 \dots 1^\circ$ , облегчающий выход инструмента из обработанного отверстия (рис. 3.3.7, а).

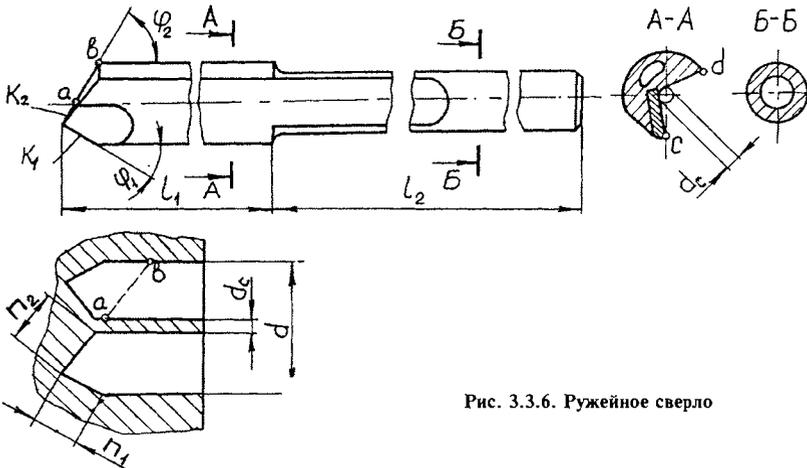


Рис. 3.3.6. Ружейное сверло

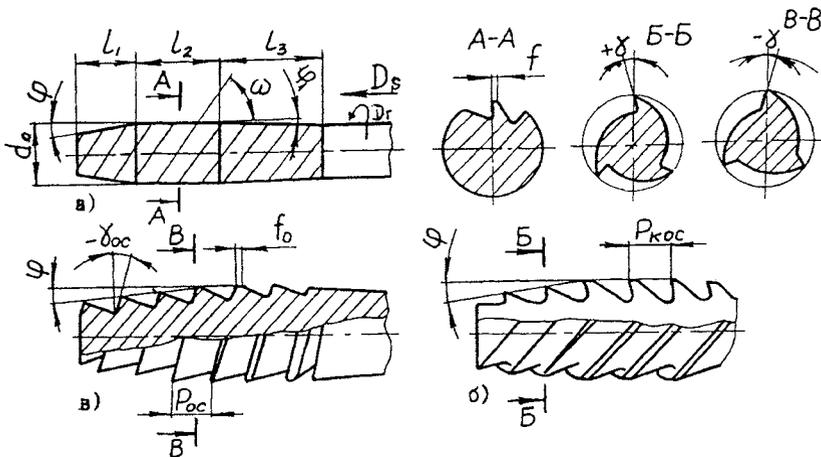


Рис. 3.3.7. Конструкция разверток

Если  $\omega = 0 \dots 30^\circ$ , канавки образуют прямолинейным или винтовым движением торцового профиля  $A-A$ , совпадающего по направлению с вращением инструмента. При увеличении  $\omega$  канавки и зубья формируют винтовым движением осевых профилей, а поскольку в этом случае инструменту легче вернуться в отверстие, чем выполнить процесс срезания припуска величиной  $0,02 \dots 0,05$  мм, направление  $\omega$  изменяют на обратное (рис. 3.3.7, б).

Зубья разверток представляют комбинацию расточных резцов с заточиваемой задней поверхностью и имеют те же конструктивные параметры, что и у сверл.

При отрицательных передних углах ( $-\gamma_{ос}$ ) винтовые зубья под углом  $\omega = 60 \dots 80^\circ$  образуют по принципу шлифования многозаходной конической резьбы под углом  $\varphi$  (рис. 3.3.7, в). На заборном конусе вершины зубьев острые; далее на них образуется фаска  $f_0$ ; если передние углы положительные  $+\gamma_{ос}$ , острые вершины зубьев на конусе  $l_1$  (рис. 3.3.5, б) образуют за счет шлифования спинки зубьев с шагом большим, чем на калибрующей части  $P_{кос}$ .

Развертки — самоцентрирующийся инструмент, поэтому их устанавливают в "плавающих" патронах, которые должны передавать только осевое усилие и крутящий момент.

*Зенкеры* конструктивно отличаются от разверток малым числом зубьев и использованием принудительного центрирования.

Протяжки являются наиболее производительными инструментами, поскольку используют единственный кинематический параметр  $D_r$  в виде поступательного, винтового или кругового движения, и максимальное число конструктивных параметров, позволяющих применять наиболее рациональные схемы срезания припуска (рис. 3.3.8). Протяжки конструктивно разделяют на внутренние (рис. 3.3.8, а) и наружные (рис. 3.3.8, б), а способы протягивания — на свободный способ протягивания, при котором инструмент направляется по предварительно обработанному отверстию, и координатный, когда протяжка принудительно базируется относительно обрабатываемой заготовки.

*Внутренние протяжки* имеют хвостовик  $l_1$  для соединения с патроном, передающим тяговое усилие станка, направляющую часть  $l_2$ , с помощью которой инструмент самоустанавливается по предварительно обработанному отверстию, режущую часть  $l_3$ , где зубья имеют конструктивные подачи  $S_z$  и калибрующую часть  $l_4$ , в пределах которой зубья не имеют конструктивных подач и сохраняют одинаковые размеры при сплошной режущей кромке  $K$ .

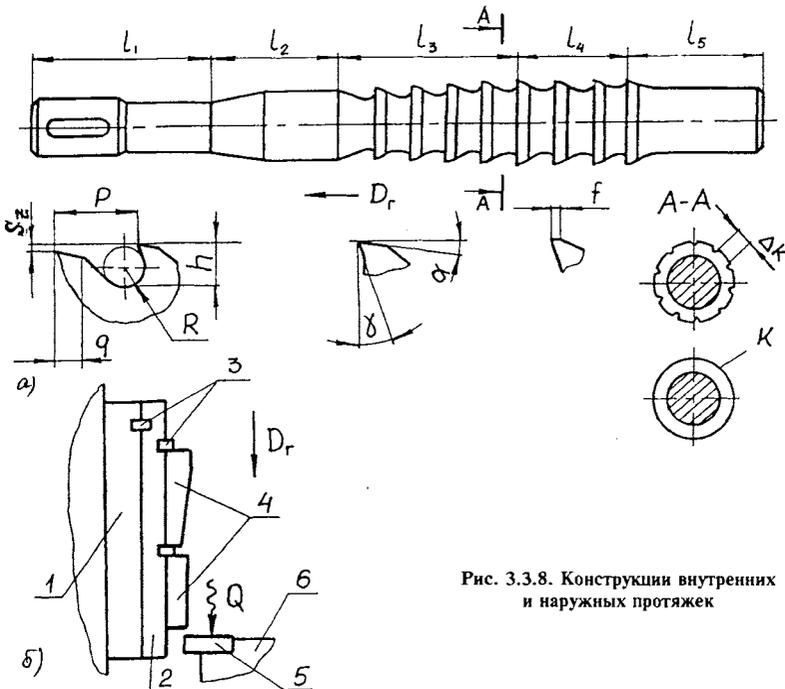


Рис. 3.3.8. Конструкции внутренних и наружных протяжек

Поддерживающая часть  $l_5$  позволяет сохранять протяжке устойчивое поступательное движение вдоль оси в процессе обработки.

Протяжки оснащают зубьями с заточиваемой задней поверхностью, которые определяются шагом  $P$ , высотой  $h$ , радиусом скругления  $R$  и шириной спинки  $q$ . Объем стружечной канавки должен обеспечивать размещение образующейся стружки. Для облегчения условий сворачивания сливной (сплошной) стружки, сплошную режущую кромку разделяют на элементы  $\Delta K$ .

Передние углы у режущих зубьев обычно положительные и зависят от свойств обрабатываемого материала; задние углы уменьшают до  $\alpha = 2...5^\circ$ , а на калибрующих зубьях выполняют фаску  $f = 0,1...0,2$  мм.

В ряде случаев используют калибрующие зубья с отрицательными углами  $\gamma$ , которые выполняют роль выглаживающих.

Форма  $K$  зависит от принятой схемы формообразования, с помощью которой при использовании конструктивных подач постепенно из исходного круглого отверстия получают заданный профиль обрабатываемой детали.

С помощью внутренних протяжек обрабатывают с точностью до качества 6-9 круглые, квадратные и многогранные отверстия, шпоночные пазы, шлицевые отверстия различной формы и т.п.

*Противки* являются разновидностью протяжек. Они проталкиваются через обрабатываемую деталь, у них отсутствует хвостовая часть  $l_1$ , а размер  $l_5$  выбирают больше длины обрабатываемого отверстия для свободного выхода инструмента.

*Наружные протяжки* (рис. 3.3.8, б) используют для обработки открытых поверхностей. На ползун 1 протяжного станка устанавливают плиту 2, на которой посредством призматических шпонок 3 и крепежных элементов устанавливают режущие секции 4. Обрабатываемая деталь 5 базируется и закрепляется в приспособлении 6.

Самую сложную по конструкции секцию (базовую) устанавливают непосредственно на плиту 2, а остальные координируют относительно нее с помощью прокладок, клиньев и других регулирующих элементов. Регулировку повторяют после каждой переточки секций.

*Метчики* (рис. 3.3.9, а) используют для обработки внутренних резьб 6-8 степеней точности. Различают режущие и деформирующие инструменты, которые используют генераторную или профильную схемы формообразования резьбы.

По совокупности конструктивных параметров и кинематике метчики являются протяжками, использующими винтовое движение  $n_n$ .

У машинных метчиков для однопроходного нарезания метрической резьбы  $l_1 \approx 6P$ , у гаечных  $l_1 \approx 12P$ ; при обработке трапецидальных резьб величину  $l_1$  рассчитывают исходя из необходимой конструктивной подачи  $S_2$ .

Как и развертки, метчики самоустанавливаются в обрабатываемом отверстии; они имеют заборный конус с углом  $\varphi$  и длиной  $l_1$ , калибрующую часть  $l_2$  и обратный конус  $l_3$  с углом  $\varphi_1$ .

Режущие метчики используют затылованные зубья, причем на заборном конусе при использовании генераторной схемы формообразования их затылуют по вершинам зубьев на глубину  $K_1 = \text{tg} \alpha \cdot \pi d_0 / Z_0$ , а по профилю на величину  $K_2 = 0,1 K_1$ .

Зубья инструментов располагаются на винтовых поверхностях, имеющих угол подъема  $\tau$ , равный углу подъема обрабатываемой резьбы по ее среднему диаметру. Метчики имеют прямые или винтовые под углом  $35...45^\circ$  стружечные канавки.

Для обработки глухих резьб и для облегчения процесса резбонарезания метчики изготавливают в виде комплектов из двух или трех инструментов и площадь срезаемого припуска разделяют в соотношении 70 и 30% или 60, 30 и 10%.

В такой же пропорции назначают длины  $l_1$  на метчиках комплекта, принимая за основу общую длину заборных конусов  $l_1 = 6P$ .

Профильная схема формообразования используется в деформирующих метчиках, имеющих прямые или винтовые поверхности для локализации очагов деформации на вершинах некруглого поперечного сечения с радиусом  $r$ .

Такие инструменты применяют при обработке пластичных и вязких материалов.

*Плашки* — также относятся к протяжным инструментам и предназначены для обработки наружных резьб (рис. 3.3.9, б). Заборные конусы плашек  $l_1$  располагают с двух сторон, а калибрующую часть  $l_2$  в середине корпуса. Стружечные канавки плашек образованы отверстиями  $d_0$ , а зубья затылуют только на заборных конусах для образования задних углов при вершинах зубьев.

Плашки для обработки мелких точных резьб (М1,6—М6) часто изготавливают односторонними и на корпусе выполняют наружный конус и радиальные пазы, что позволяет деформировать инструмент в плашкодержателе и настраивать на заданные размеры.

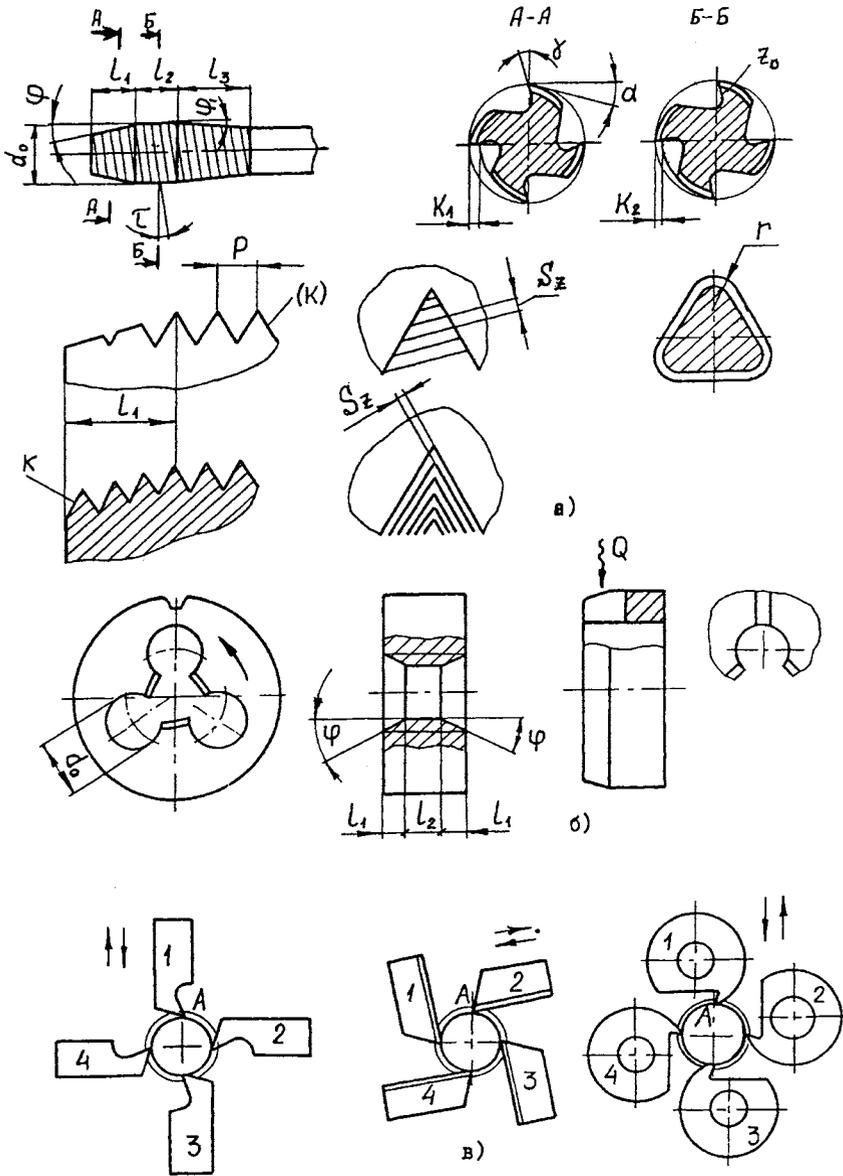


Рис. 3.3.9. Метчики, плашки и самораскрывающиеся резьбонарезные головки

Метчики и плашки используют реверс для свинчивания, что снижает их производительность. Самораскрывающиеся резьбонарезные головки (рис. 3.3.9, в) лишены этого недостатка, поскольку их режущие элементы в конце рабочего хода под воздействием специального механизма отскакивают и вновь занимают рабочее положение после ускоренного отвода.

Режущие элементы выполняют в виде радиальных, призматических или круглых резбовых резцов, являющихся затылованными инструментами, допускающими соответственно 10—12, 30—40 и 100—120 переточек и требующими после их выполнения восстановления исходного положения базовой точки А.

**Инструменты для фрезерования.** С помощью фрез обрабатывают плоскости, прямые и

криволинейные фасонные поверхности, которые могут иметь постоянный или переменный по длине профиль.

Фрезы в процессе работы совершают вращение относительно своей оси, которое используется как главное движение или как его доминирующая составляющая. При фрезеровании в зависимости от формы контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью может использоваться одна, две или три подачи одновременно или в определенной последовательности.

У всех фрез зубья и их режущие кромки  $K$  располагают на определенном расстоянии от оси инструментов и размещают в определенной последовательности, добиваясь эффективности процессов резания и формообразования.

В зависимости от используемой схемы формообразования, назначения и конструкции фрезы разделяют на осевые, торцовые и торцово-осевые.

Осевые фрезы (рис. 3.3.10) имеют только главную режущую кромку  $K$  которая может быть прямолинейной или фасонной, длина ее всегда превышает ширину обрабатываемой поверхности. В этих инструментах всегда используется профильная схема формообразования.

Цилиндрические и конические фрезы имеют удобные для заточки зубья с затачиваемой задней поверхностью. Фасонные, резьбовые, модульные инструменты оснащают затылованными зубьями, которые сохраняют профиль режущей кромки  $K$  при переточках по передней поверхности.

У фрез могут использоваться прямые, косые или винтовые стружечные канавки.

Профиль режущей кромки  $K$  определяется как линия пересечения поверхности вращения, контактирующей с обрабатываемой поверхностью и передней поверхностью фрезы, а далее принимается решение о форме задней поверхности зубьев.

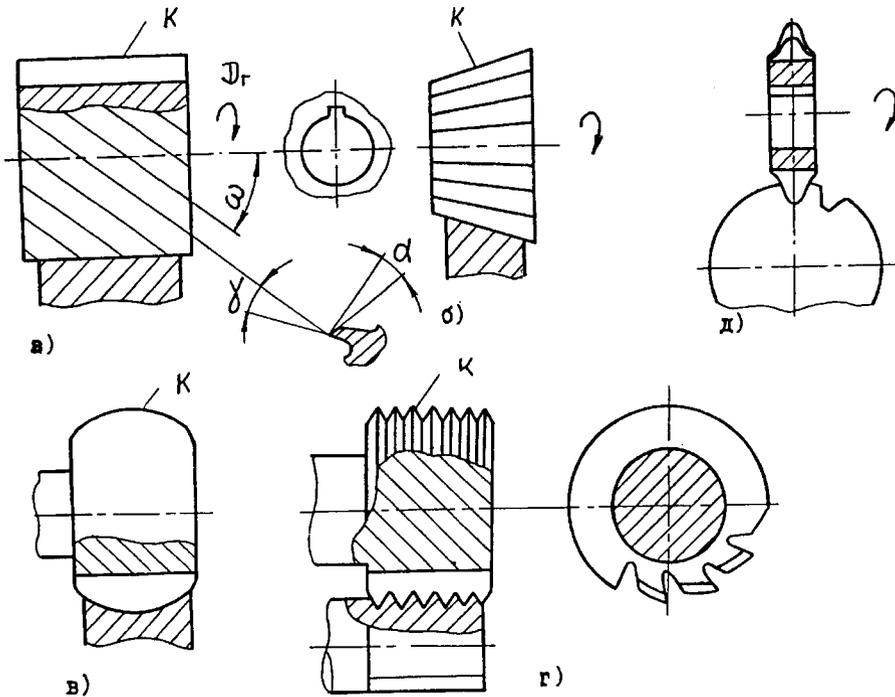


Рис. 3.3.10. Осевые фрезы:

а — цилиндрические; б — конические; в — фасонные; г — резьбовые; д — модульные

Торцовые фрезы (рис. 3.3.11) являются наиболее прогрессивными инструментами для обработки плоскостей. Конструктивно они представляют совокупность универсальных резцов с различной формой режущей кромки. Эти инструменты используют генераторную схему формообразования с использованием профилирующей точки (зоны)  $A$ . Режущие элементы этих фрез представляют собой припаянные или механически закрепленные многогранные или круглые пластины, позволяющие путем изменения их положения воздействовать на параметры процессов резания и формообразования.

Торцово-осевые фрезы и пилы (рис. 3.3.12) представляют совокупность универсальных, упорных или отрезных резцов, которые используют одновременно профильную и генераторную схемы формообразования.

С их помощью обрабатывают ступы и пазы различной формы, выполняют операции разрезки заготовок. Главная режущая кромка  $K$  формирует поверхности по профильной схеме, а точки  $A$  обрабатывают поверхности, перпендикулярные оси вращения инструментов по генераторной схеме.

Вспомогательная режущая кромка наклонена под углом  $\varphi_1$  и дополнительно затачивается по передней поверхности под углом  $\gamma_1$ , а по вспомогательной задней поверхности под углом  $\alpha_1$ . Концевые шпоночные фрезы выполняют с двумя зубьями, вспомогательные кромки которых  $K$  сходятся друг с другом на оси инструмента.

Концевые (пальцевые) фрезы имеют режущую  $l_1$  и хвостовую часть  $l_2$ , которая может быть выполнена цилиндрической или конической.

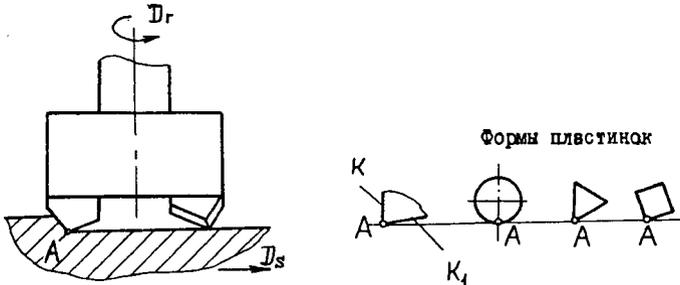


Рис. 3.3.11. Торцовые фрезы

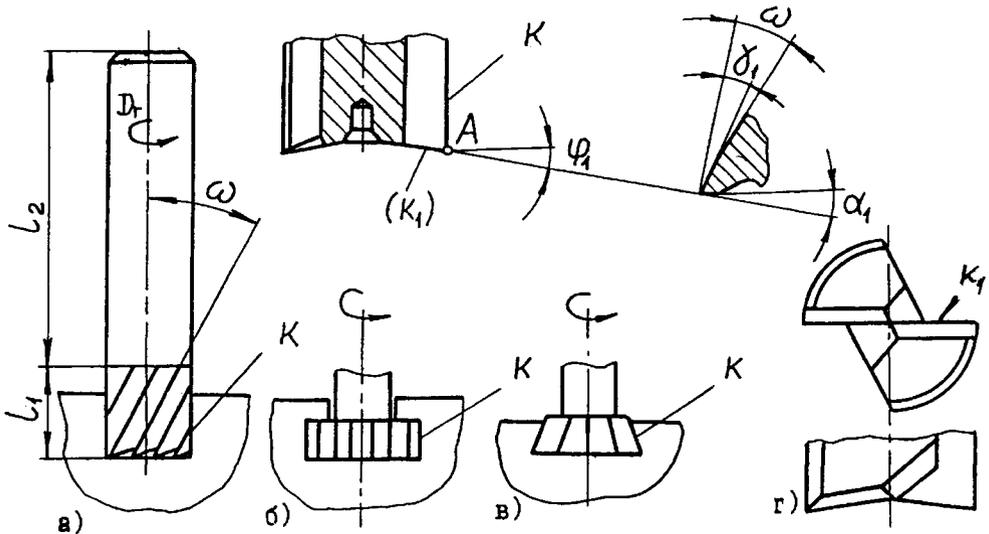


Рис. 3.3.12. Торцово-осевые фрезы:

а — концевые; б — грибовые; в — угловые; г — шпоночные

У фрез-пил (рис. 3.3.13) вспомогательные углы  $\varphi_1$  для сохранения прочности корпуса выполняют в виде уклона боковых сторон  $\approx 0,1/100$ , а у пазовых дисковых фрез  $\varphi_1 = 0,5 \dots 1^\circ$ .

Торцовые и торцово-осевые фрезы оснащают острозаточенными зубьями, которые выполняют усиленными, нормальными и мелкими (рис. 3.3.13, в-д). Мелкие зубья перетачивают по всему профилю стружечной канавки, остальные — по задней поверхности на половину исходной высоты  $h$ .

Инструменты для обработки зубьев с использованием обката используют генераторную схему формообразования, так называемый принцип обката, при котором начальные цилиндры заготовок с радиусами  $r_{w1}$  без проskalывания прокатываются по начальным цилиндрам инструментов с радиусами  $r_0$ .

Между обрабатываемой поверхностью заготовки и поверхностью, описываемой режущими кромками инструмента, всегда можно расположить вспомогательную поверхность (рейку), которая имеет нулевую толщину, и по начальной прямой которой с одной стороны совершает обкат начальный цилиндр заго-

товки, а с другой — начальный цилиндр инструмента. По этой причине рассматриваемые инструменты имеют кинематическое родство и рассчитываются по общей методике.

Для эвольвентных колес размеры рейки стандартизованы.

У реечных инструментов, к которым относятся зубострогальные гребенки, режущие кромки располагаются непосредственно на поверхности рейки и используется возвратно-поступательное главное движение. У червячных инструментов — червячных фрез, долбяков, дисковых шевров режущие кромки расположены на поверхности основного червяка, который является одно- или многозаходной винтовой поверхностью постоянного шага и совершает вращательное движение вокруг своей оси.

Начальные радиусы и углы, определяющие взаимное положение заготовки и инструмента, относят к параметрам установки и их величины определяют, обеспечивая возможность обработки заданного профиля детали. Разновидность инструмента зависит от принятых параметров установки и скорости главного движения  $n_n$ . На рис. 3.3.14 показано, каким образом различные инструменты зависят от принятых параметров установки.

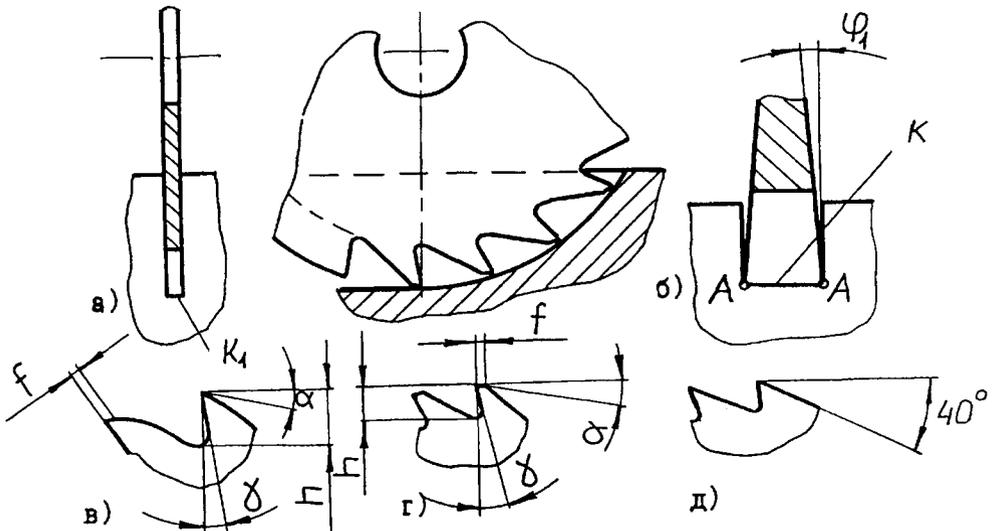


Рис. 3.3.13. Торцово-осевые фрезы:

а — фрезы-пилы; б — пазовые дисковые; в — усиленный зуб; г — нормальный зуб; д — мелкий зуб

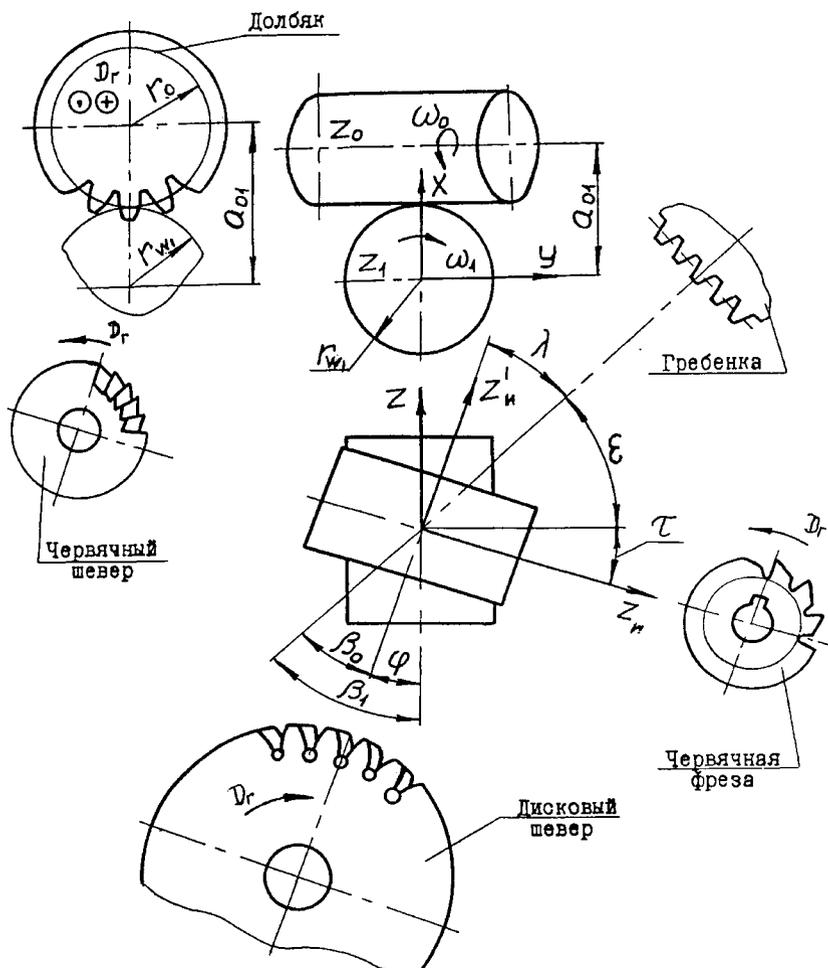


Рис. 3.3.14. Кинематические параметры обкатных инструментов

### 3.3.2. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Конструированием называется важнейший этап проектирования лезвийных инструментов (ЛИ), в котором: назначаются геометрические параметры лезвия; рассчитываются исполнительные размеры; определяются конструктивные размеры рабочей и крепежной частей; назначаются технические требования; выполняются необходимые расчеты.

ЛИ разделяются на простые (однолезвийные и многолезвийные) и сложные.

Конструирование простых ЛИ (резцы, сверла, зенкеры, развертки, фрезы и др.) производится в такой последовательности:

а) исходя из обеспечения условий стружкообразования и требуемого качества обработки назначают геометрические параметры, определяющие форму и положение лезвия в инструментальной, статической или кинематической системе координат;

б) выбирают конструктивное исполнение и параметры вершины ЛИ;

в) для сборных и составных ЛИ выбирают тип режущих пластин (для сборных инструментов и тип опорной пластины), способ ее крепления, форму и размеры паза под пластину;

г) для многолезвийных инструментов определяют число режущих зубьев  $z_0$ , форму и размеры стружечных канавок;

д) рассчитывают исполнительные размеры размерных ЛИ с учетом разбивки;

е) находят конструктивные размеры корпуса, проводят его прочерточные расчеты на прочность и жесткость;

ж) выбирают способ крепления и параметры крепежной части с проведением прочерточных расчетов надежности закрепления;

з) назначают технические требования на ЛИ;

и) разрабатывают чертёж ЛИ.

Геометрические параметры ЛИ можно разделить:

а) на определяющие остроту режущего лезвия (главные передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы, угол заострения  $\beta$ , радиус закругления  $r$ );

б) на определяющие положение лезвия (главный угол в плане  $\varphi$ , угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$ ).

Аналогичные углы ( $\alpha_1$ ,  $\gamma_1$  и  $\varphi_1$ ) имеют и вспомогательные лезвия ЛИ. Между режущим и вспомогательным лезвиями находится вершина ЛИ.

Выбор геометрических параметров ЛИ проводят исходя из обеспечения прочности лезвия и вершины, требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности с учетом свойств инструментального и обрабатываемого материалов. Главный задний угол лезвия  $\alpha$  назначается в пределах  $6...12^\circ$ , вспомогательный угол  $\alpha_1 = 3...8^\circ$ , передний угол  $\gamma$  выбирают в зависимости от обрабатываемого и инструментального материалов и вида обработки в пределах от  $-25$  до  $+25^\circ$ . Для тяжелых условий обработки с ударом угол  $\gamma$  назначают отрицательным; для чистовой и точной обработки пластичных материалов — положительным, в пределах  $10...25^\circ$ , для хрупких материалов  $0...10^\circ$ . Для некоторых точных размерных инструментов (развертки) принимают  $\gamma = 0$ . Для дробления стружки на передних поверхностях резцов выполняют лунки, усту-

пы, в соответствии с выбранной формой заточки. Углы в плане  $\varphi$  и  $\varphi_1$  назначают исходя из обеспечения заданных параметров шероховатости обработанной поверхности, группы и вида инструмента, прочности вершины ЛИ и могут иметь значения:

а) для резцов  $\varphi = 30...90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 10...45^\circ$ ;

б) для сверл  $\varphi = 90...150^\circ$ ;

в) для зенкеров  $\varphi$  равно  $60$  или  $90^\circ$ ;

г) для разверток  $\varphi = 5...15^\circ$  (иногда  $45^\circ$ ).

Угол  $\varphi_1$  у осевых ЛИ задают в виде обратной конусности в пределах  $0,03...0,12$  мм на  $100$  мм длины. Угол  $\lambda$  задают от  $-15$  до  $+45^\circ$ , когда необходимо обеспечить определенное направление стружки; в остальных случаях  $\lambda = 0$ . Вершина инструмента может быть сформирована в виде скругления радиусом  $R$  (рис. 3.3.15, а), переходной площадки (рис. 3.3.15, б) или переходной режущей кромки с углом  $\varphi'$  (рис. 3.3.15, в). Форму, вершину и значения параметров выбирают в зависимости от материала инструмента для обеспечения необходимых параметров шероховатости обработанной поверхности детали. Радиус скругления вершины  $R$  может быть в пределах  $0,5...3$  мм, угол  $\varphi'$  до  $20^\circ$ , длина переходной кромки  $b$  — до  $1/3$  активной части режущей кромки.

Перспективным является определение параметров лезвия и вершины ЛИ исходя из функционального назначения обрабатываемой поверхности. Основные схемы крепления сменных многогранных режущих пластин ЛИ показаны на рис. 3.3.16. Крепление прихватом (рис. 3.3.16, а) обеспечивает точность и надежность и применяется для пластин без отверстий на резцах, фрезах, расточных инструментах. Крепление поворотным рычагом или штифтом через отверстие в пластине (рис. 3.3.16, б) не имеет выступающих над пластиной частей, что облегчает отвод стружки.

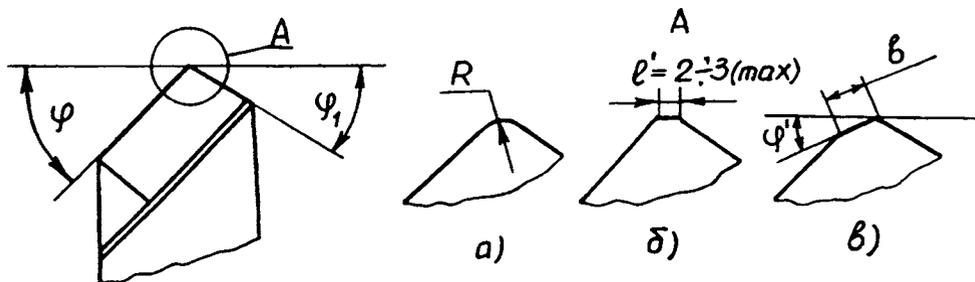


Рис. 3.3.15. Конструктивные варианты вершин инструмента в виде: а — скругления; б — площадки с  $\varphi' = 0$ ; в — двойной режущей кромки

Схема крепления винтом (рис. 3.3.16, *в*) предусматривает применение пластин с коническим отверстием. Это наиболее простой способ и распространенный. Крепление пластин клин-прихватом при ее базировании по отверстию на головке штифта (рис. 3.3.16, *г*) применяют в основном для универсальных токарных резцов, так как при этом не обеспечивается точное базирование пластины. Число зубьев ЛИ зависит от его назначения. Так, для зенкеров принято 3 или 4 зуба, для разверток — 6-14 зубьев, фрез концевых — 3, 4, 5 и 6 зубьев, для шпоночных — 2 зуба т.д. Форма зубьев — острозаточенная, спинка зуба может быть выполнена:

- а) криволинейной вогнутой (у зенкеров  $z_0 = 3$ );
- б) прямолинейной (у фрез для легких работ);
- в) ломаной (наиболее распространенная форма);
- г) криволинейной выпуклой, применяемой для зубьев, работающих в очень тяжелых условиях.

По расположению зубья и стружечные канавки осевых инструментов бывают:

- а) прямые, параллельные оси;
- б) косые с углом наклона к оси до  $20^\circ$  (например, дисковые косозубые фрезы);
- в) винтовые с углом наклона к оси  $\omega$ ,

равным  $30...60^\circ$  — для сверл спиральных и шнековых,  $30...45^\circ$  — для фрез концевых из быстрорежущей стали,  $25...60^\circ$  — для фрез цилиндрических,  $15...25^\circ$  — для зенкеров, до  $45^\circ$  — для разверток, обрабатывающих прерывистые отверстия.

Развертки и концевые фрезы имеют неравномерный окружной шаг зубьев. Зубья размерных инструментов для обработки отверстий имеют кроме режущей еще и калибрующую часть, предназначенную для улучшения качества обрабатываемой поверхности. Для сохранения диаметра при переточках на их задней поверхности предусматривается цилиндрическая ленточка шириной от нескольких миллиметров у сверл и зенкеров, до  $0,05...0,3$  мм — у разверток.

Схемы для расчета исполнительных диаметров калибрующей части этих инструментов приведены на рис. 3.3.17. Проводят проверочные расчеты корпусной части ЛИ на смятие опорной поверхности под пластину, на кручение — для осевого инструмента, на изгиб — для стержневых инструментов. Удлиненные и длинные осевые инструменты проверяют на продольный изгиб. Крепёжная часть резцов представляет стержень квадратного, прямоугольного или круглого сечения. Насадные инструменты устанавливают на оправку по цилиндрическому (фрезы) или коническому с конусностью 1:30 (зенкеры, развертки) отверстию.

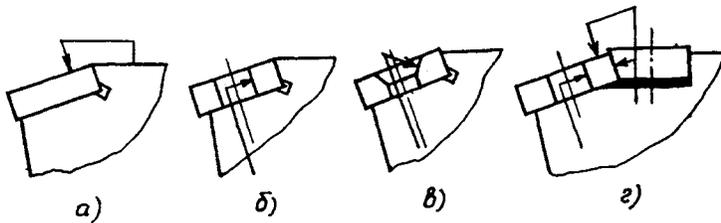


Рис. 3.3.16. Схемы способов крепления режущих пластин в сборных ЛИ:

*а* — прихватом; *б* — качающимся (поворотным) рычагом или штифтом; *в* — винтом с конической головкой; *г* — клин-прихватом и штифтом

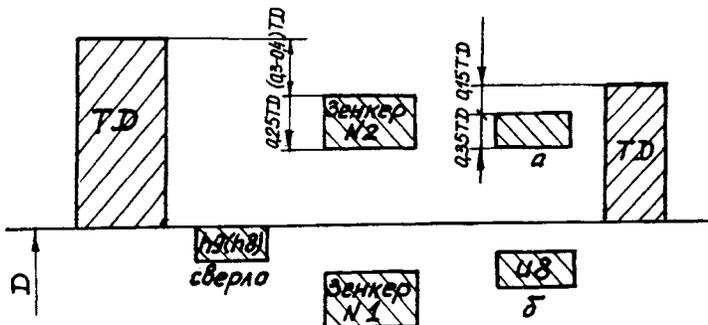


Рис. 3.3.17. Схемы расположения полей допусков осевых инструментов для обработки отверстий:

*а* — развертка чистовая; *б* — развертка черновая; № 1 — зенкер для обработки отверстия с припуском под развертывание; № 2 — чистовой зенкер

Цилиндрические посадочные отверстия выполняют с продольным (фрезы цилиндрические дисковые) или торцовым (торцовые фрезы) шпоночным пазом. Конические отверстия имеют только торцовый паз. Диаметры посадочных отверстий стандартизированы и имеют следующие значения: 8, 10, 13, 16, 19, 22, 27, 32, 42, 50, 60, 70, 80 и 100 мм; качество точности их исполнения — Н7 или Н6. Диаметр отверстия выбирают из условия обеспечения прочности, жесткости и виброустойчивости вспомогательной оправки.

Хвостовые ЛИ имеют крепежную часть в виде цилиндрического или конического хвостовика. Конец цилиндрического хвостовика может быть гладким, квадратным или плоским. Цилиндрический хвостовик имеют сверла и концевые фрезы диаметром до 20 мм, развертки диаметром до 10 мм. Конические хвостовики имеют конус Морзе 0-5 с лапкой (для сверл, зенкеров и разверток) или с торцевым резьбовым отверстием — для концевых фрез. Передача вращающего момента  $M_{вр}$  в конических хвостовых соединениях осуществляется за счет сил трения. Размер конуса Морзе можно подобрать расчетом его среднего диаметра

$$d_{ср} = \frac{6M_{вр} \sin \theta}{\mu P_o (1 - 0,04 \Delta \theta)},$$

где  $\theta$  — угол конуса;  $\mu$  — коэффициент трения;  $P_o$  — осевая сила;  $\Delta \theta$  — погрешность угла в коническом соединении.

Иногда в сборных инструментах в пазах корпуса устанавливают ножи, выполненные из быстрорежущих сталей или с напайными пластинами твердого сплава, которые крепят с помощью клиньев и рифлений (рис. 3.3.18).

Технические требования на ЛИ включают следующие основные параметры:

а) твердость рабочей части ЛИ из быстрорежущих сталей — 62-66 HRC;

б) параметр шероховатости передних и задних поверхностей  $Ra = 0,32 \dots 0,63$  мкм, ленточек по калибрующей части —  $Ra \leq 0,32$  мкм, посадочных отверстий и хвостовиков  $Ra = 0,5 \dots 0,8$  мкм, опорных торцов  $Ra = 0,8 \dots 1,25$  мкм;

в) биение режущих кромок и ленточек (для осевых инструментов) назначают в зависимости от вида инструмента и его класса точности по соответствующим стандартам. Кроме этих, для каждого инструмента имеется ряд своих требований, которые регламентируются соответствующими стандартами.

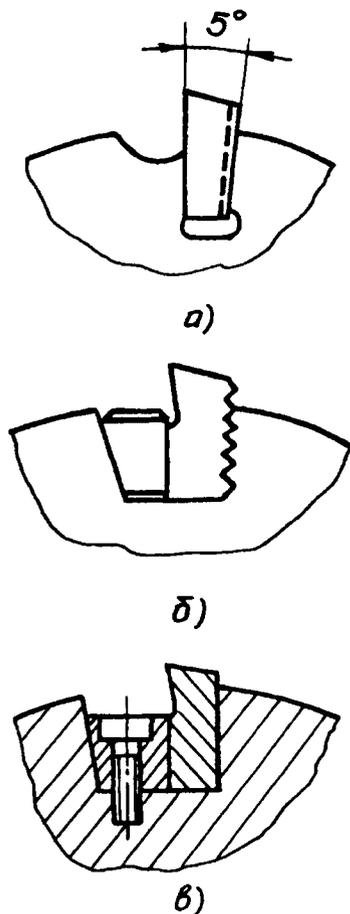


Рис. 3.3.18. Схемы крепления ножей в сборных инструментах:

- а — в клиновом пазу с помощью рифлений;  
б — с помощью клина и поперечных рифлений;  
в — с помощью клина, затягиваемого винтами

**Конструирование сложных лезвийных инструментов** (фасонные резцы и фрезы, протяжки, резьбонарезной и зуборезный инструменты) осуществляют в два этапа:

а) находят *инструментальную* (производящую) *поверхность* (ИП) на основе анализа метода формообразования и взаимодействия ЛИ с обрабатываемой поверхностью;

б) превращают ИП в ЛИ.

ИП называется *поверхность, взаимодействующая с обрабатываемой* (Д) *поверхностью*, в которой находятся все режущие кромки инструмента. ИП может совпадать с Д (протягивание, нарезание резьб метчиками,

плашками и головками, точение фасонными круглыми и призматическими резцами с радиальной подачей); тогда их номинальные размеры равны, а контакт происходит по всей поверхности. В этом случае многолезвийный ЛИ имеет большое число одновременно режущих зубьев. В другом случае, ИП касательна к  $D$ , ее размеры не зависят от размеров  $D$ , а их контакт может быть линейчатый или точечным (точение фасонным тангенциальным резцом, фрезерование фасонной и резбовой фрезой, нарезание резьб вихревыми головками, обработка обкаточными инструментами, профильное шлифование, резбонакатывание роликами и плоскими плашками, протягивание круговыми протяжками). Габаритные размеры ИП, касательных к  $D$ , рассчитывают, исходя из условий обеспечения прочности и жесткости ЛИ, возможности установки ЛИ в рабочем пространстве станка, достижения наибольшей производительности обработки. При этом выполняется проверка на отсутствие подрезов профиля. Профиль ИП может определяться аналитическими расчетами или графическими построениями с использованием методов совмещенных сечений, последовательных положений и др. Для графических построений целесообразно использовать компьютерную графику, графические системы типа AutoCAD, что делает процесс проектирования наглядным, обеспечивает высокую точность профилирования, возможность анализа точности профилирования.

Превращение ИП в режущий инструмент (РИ) может быть выполнено двумя способами:

1) непосредственным полным воспроизведением ИП на инструменте;

2) воспроизведением части ИП в виде отдельных линии или участков, количество которых определяется числом зубьев  $z_0$  инструмента.

*Первый способ* используется при конструировании РИ, у которых  $z_0 \rightarrow \infty$  (шлифовальный круг) или деформирующих инструментов (например, накатный ролик). Конструирование таких инструментов заключается в решении следующих задач:

а) профилирование, т.е. определение профиля ИП и перенос его на РИ в определенном сечении (осевом, нормальном, торцовом);

б) расчет исполнительных размеров РИ;

в) выбор крепежной части;

г) назначение технических требований.

*Второй способ* применяют для лезвийных сложных ЛИ. Последовательность конструирования таких инструментов следующая:

а) расчет числа зубьев;

б) выбор формы и положения передней поверхности зуба;

в) выбор формы и положения задней поверхности зуба;

г) профилирование с проверочными расчетами точности обработки;

д) выбор схемы срезания припуска, стружкоразделительных элементов;

е) выбор крепежной части и остальных конструктивных размеров ЛИ;

ж) назначение технических требований.

Оптимальное число зубьев определяется с учетом параметров шероховатости обработанной поверхности, габаритных размеров ЛИ, формы и размеров стружечных канавок. Некоторые инструменты протяжки имеют черновые зубья, профиль которых постепенно приближается к ИП. Передняя поверхность ЛИ может быть плоской (резцы и фрезы фасонные, метчики, протяжки шпоночные и плоские, фрезы червячные с прямыми канавками), конической (долбяки зуборезные, протяжки круглые и шлишевые) или винтовой линейчатой (фрезы червячные и метчики с винтовой стружечной канавкой). Ее расположение зависит от переднего угла на вершине зуба  $\gamma_{\text{ф}}$ , угла ее наклона к оси инструмента  $\lambda_0$  (у косозубых дисковых ЛИ  $\lambda_0 > 0$ ) или угла наклона винтовой направляющей к оси  $\omega_0$  для инструментов с винтовой стружечной канавкой (например, червячные фрезы).

Переточку сложных ЛИ выполняют, как правило, только по передней поверхности. Задняя поверхность может быть плоской (шпоночные и плоские протяжки), конической (круглые протяжки), сложной линейчатой (фасонные призматические резцы), радиально затылованной (дисковый фасонный ЛИ), винтовой затылованной (червячный инструмент), винтовой (долбяки зуборезные, шеверы). Наличие заднего угла  $\alpha_0$  приводит к уменьшению высоты зуба при переточках, что нарушает точность обработки. Для сохранения размера протяжек при переточках на их калибрующих зубьях вводят ленточки шириной 0,2...0,6 мм, на которых  $\alpha_0 = 0$ . Фасонные инструменты требуют коррекции их положения на станке после переточки. У обкаточных инструментов смещают их размеры за пределы ИП (например, смещение исходного контура долбяка). Тогда при переточках размер инструмента будет приближаться к ИП и точность его будет возрастать. Величина смещений определяется расчетом.

В дисковых и червячных ЛИ широкое применение получили затылованные зубья (рис. 3.3.19). В качестве затыловочной кривой чаще всего используют спираль Архимеда; у сборных червячных фрез зубья затылуют по окружности. Параметры зуба и стружечной канавки рассчитывают из условия обеспечения прочности зуба, достаточного пространства для размещения стружки и выхода затыловочного инструмента. Величина затылования

$$K = \frac{\pi d_{a0}}{z_0} \operatorname{tg} \alpha_{a0}$$

Для точных инструментов проводят двойное затылование: а) предварительное резцом с величиной затылования  $K_1 = (1,2 \dots 1,7) K$ ; б) окончательное затылование шлифованием примерно на  $2/3$  толщины зуба.

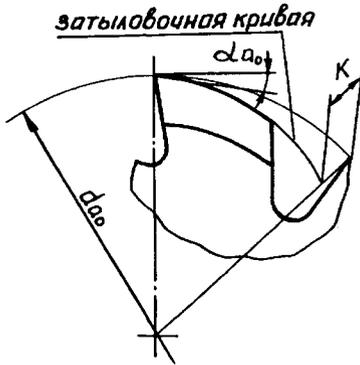


Рис. 3.3.19. Форма затылованного зуба ЛИ

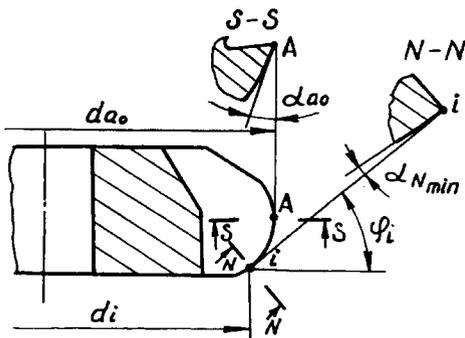


Рис. 3.3.20. Определение минимального заднего угла  $\alpha_N$  в опасных точках режущей кромки

У некоторых инструментов для увеличения боковых задних углов часть профиля зуба затылуют угловым затылованием с расположением затыловочного резца под углом  $3 \dots 6^\circ$ . Передний угол на вершине зуба  $\gamma_{a0}$  выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Задний угол рассчитывают исходя из условия обеспечения минимального допустимого значения бокового заднего угла  $\alpha_{Nmin}$  в опасной точке профиля (точка  $i$ , рис. 3.3.20), который должен быть равен  $2 \dots 3^\circ$  при обработке хрупких материалов и  $3 \dots 4^\circ$  — пластичных материалов.

$$\alpha_{a0} = \arctg \frac{d_i \operatorname{tg} \alpha_{Nmin}}{d_{a0} \sin \psi_i} = 8 \dots 15^\circ$$

Профилированием сложного ЛИ называется отыскание профиля его режущей кромки с учетом влияния геометрических параметров ( $\gamma_{a0}$ ,  $\alpha_{a0}$ ,  $\lambda_0$  или  $\omega_0$ ). Профиль режущей кромки находится сечением ИП передней поверхностью ЛИ. В ряде случаев дополнительно определяют профиль ЛИ в осевом, нормальном или торцовом сечениях, что необходимо для профилирования инструментов второго порядка.

Из технологических соображений профиль ЛИ часто упрощают (корректируют) путем замены сложной теоретической кривой более простыми линиями (прямой, дугой окружности и др.); при этом вносится определенная погрешность профиля и необходимы проверочные расчеты точности обработки данным инструментом. Рассчитывают также размеры переходных кривых, образующихся на Д при обработке. Коррекционные и проверочные расчеты сложны, громоздки (особенно сложно аналитическим способом решаются обратные задачи, когда по принятому профилю ЛИ необходимо найти профиль обрабатываемой поверхности). Для этих задач перспективным является применение компьютерной графики и графических систем типа AutoCAD, для чего разработаны специальные графические методики профилирования и программы их реализации на ЭВМ.

Последовательность удаления зубьями ЛИ слоев срезаемого материала зависит от принятой схемы резания. Известны три схемы резания: профильная (одинарная), генераторная и групповая.

Профильная схема обеспечивает более высокое качество обрабатываемой поверхности, но при этом образуется жесткая, плохо деформируемая стружка. Она применяется у протяжек небольших диаметров, фасонных фрез. На зубьях ЛИ выполняют стружкоразделительные канавки, располагаемые в шахматном порядке (рис. 3.3.21, а).

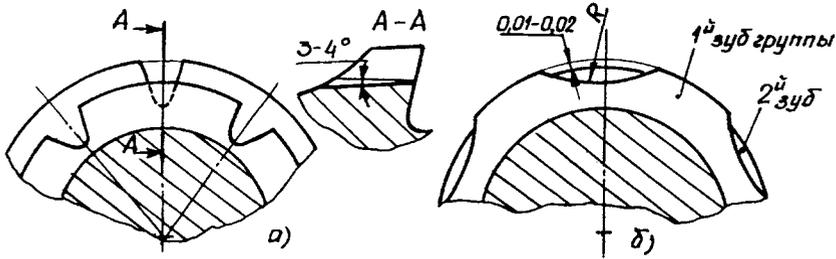


Рис. 3.3.21. Стружкоразделительные элементы

Генераторная и групповая схема обеспечивают срезание узкой, но более толстой стружки; при этом уменьшается удельная сила резания. Генераторную схему используют у метчиков; групповую — на черновых зубьях протяжек. Разделение стружки при этом обеспечивается с помощью выкружек (рис. 3.3.21, б).

Выбор крепежной части и назначение технических требований рассмотрены выше. Конструирование ЛИ выполняют ручным или автоматизированным способом на ЭВМ с помощью систем АПРИ.

### 3.3.3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА (САПР-И)

САПР-И по функциональному назначению представляет собой информационно-вычислительную систему, позволяющую выполнить синтез и анализ конструкции инструмента.

В общем случае система автоматизированного проектирования лезвийного инструмента (САПР-И) является составной частью системы автоматизированного инструментального обеспечения, которая, в свою очередь, входит в САПР технологических процессов (САПР ТП).

Однако из-за технических и организационных сложностей САПР-И чаще используют автономно.

САПР-И построена по тем же принципам, как и любая система автоматизированного проектирования. Она является человеко-машинной системой, развивающейся, открытой, единой. Эти принципы определяют и ее структуру.

Как и другие аналогичные системы, САПР-И имеет модульное иерархическое строение. Такое строение наиболее полно и просто позволяет реализовывать названные выше принципы. Модульность обеспечивает гибкость системы — она состоит из достаточно произвольного количества независимых

блоков, корректировка или замена любого из которых не влияет на работоспособность системы в целом. В свою очередь, иерархичность должна учитывать место САПР-И в комплексной системе автоматизированного проектирования. Учет иерархичности при разработке системы обеспечивает легкое встраивание как САПР-И в САПР более высокого уровня, так и встраивание в нее саму подчиненных модулей (например, САПР ТП инструмента).

Состав модулей САПР-И строго не регламентирован, поэтому у различных разработчиков может существенно отличаться. Такие колебания зависят от того, какие задачи, по мнению разработчика системы, должна решать непосредственно САПР-И, какие подчиненные ей модули, а какие не подлежат автоматизации.

Однако такие колебания структуры САПР-И лишь перераспределяют задачи между отдельными элементами комплексной автоматизированной системы проектирования и человеком, но не меняют ни их содержания, ни сути.

Целью создания САПР-И является автоматизация проектирования новых нестандартных инструментов. Существует три направления поиска новых решений в создании инструмента:

- 1) в области кинематики формообразования;
- 2) в области кинематики срезания припуска;

3) в области конструкторских решений. При этом приходится решать ряд задач, состав которых определяется степенью новизны разрабатываемой конструкции.

В любом случае, приходится решать задачи синтеза и анализа разрабатываемой конструкции. Задачи синтеза разнообразнее и их труднее формализовать. По сложности их разбивают на четыре уровня. На первом уровне структура объекта уже задана, на втором уровне структуру можно выбрать из ограниченного известного множества вариантов. На этих уровнях структурный синтез отсутствует,

а проектирование ведется фактически на уровне параметрического синтеза и анализа.

Начиная с третьего уровня необходимо решать задачи структурного синтеза, что может приводить к появлению новых конструкций инструмента (на уровне изобретений).

Хотя общая методология решения задач третьего уровня сложности разработана и в простейшем виде может быть реализована в виде программы, информации о создании хотя бы одного принципиально нового инструмента с помощью САПР не имеется. Поэтому можно сказать, что на сегодняшний момент с помощью САПР-И можно разрабатывать новые инструменты, структура которых известна заранее.

Параметры инструментов известной структуры определяются в ходе параметрического синтеза и анализа.

Таким образом, при синтезе необходимо установить тип инструмента, который нужен для данного вида обработки. Обычно эта задача не входит в состав САПР-И, а относится к САПР ТП. Поэтому задача синтеза, непосредственно представленная в САПР-И, обычно ограничивается информационно-аналитической поддержкой при выборе лучшего возможного варианта инструмента из нескольких возможных.

В ходе параметрического синтеза и анализа устанавливаются все внутренние (собственные) и внешние характеристики инструмента: размеры, технические условия, функциональные возможности, технико-экономические характеристики и др. Такая работа сопровождается решением ряда задач, таких как определение профиля инструмента, выбор материала, назначение углов резания, габаритных и присоединительных размеров, требований по точности, качеству поверхности и некоторые другие.

Инструмент, особенно на чистовых операциях, формирует поверхностный слой детали, который во многом определяет работоспособность детали. Характеристики этого слоя зависят от параметров инструмента — углов резания, радиуса при вершине и скруления, главной и вспомогательной режущих кромок, шероховатости режущей кромки и рабочих поверхностей, схемы срезания припуска и др. Задача определения оптимального комплекса этих характеристик инструмента в современных САПР-И решается недостаточно корректно и полно. Их обычно формируют в виде набора ранее апробированных требований, а часть — не регламентируют.

Заключительная часть разработки инструмента — конструирование — является плохоформализуемой, следовательно, сложной для программирования задач. Поэтому в

большинстве случаев до законченных рабочих чертежей доводятся объекты, имеющие явно выраженные типовые решения. В большинстве случаев автоматически выполняется только часть чертежей — задача профилирования, предварительная компоновка, а конструирование проводится либо в диалоговом, либо в ручном режиме.

Результатом работы САПР-И в общем случае должен быть полный комплект рабочей документации для изготовления оригинального инструмента (рабочий чертеж, описание технологического процесса изготовления) или информация о наличии стандартных решений. Решение такой задачи требует обращения к САПР ТП режущего инструмента, в задачи которой, в свою очередь, входит инструментальное обеспечение — проектирование или выбор инструмента второго порядка. Это требует от САПР-И возможности (хотя бы потенциальной) обращения к САПР ТП инструмента. При этом сложность связей этих модулей зависит от развитости программных модулей. Если эти модули достаточно сложные и универсальные, то обращение к ним может быть рекурсивным, т.е. проектирование основного инструмента, инструментов второго порядка и более осуществляется головным, единым САПР-И. Аналогично, проектирование технологии изготовления этих инструментов также должно осуществляться единым модулем САПР ТП инструмента. Однако чаще используют специализированные программы, ориентированные на решение частных задач, поэтому обращение к ним осуществляется последовательно, что отражается на структуре САПР-И.

Состав САПР-И определяется задачами, поставленными перед ней. Безусловно, «сердцевинной» любого САПР-И является модуль разработки новых нестандартных инструментов. Этот модуль настолько важен, что по нему часто называют и данную САПР-И в целом (например, САПР фасонных резцов, САПР червячных фрез и т.п.).

Эта часть САПР-И самая сложная как по задачам, так и по структуре, и может включать в себя другие подсистемы, такие как выбор материала режущей части инструмента, выбор стандартных присоединительных поверхностей.

Другим модулем, очень часто вносимым в структуру САПР-И, является модуль выбора стандартного или ранее спроектированного инструмента, хотя его могут использовать автономно вне САПР-И (под названием «информационно-поисковая система»). Этот модуль должен обеспечивать рациональное инструментальное обеспечение — исключить повторную разработку уже имеющихся конструкций.

Реже возникает вопрос о включении в состав САПР-И модулей проектирования вспомогательной оснастки (патронов, державок и т.п.), инструмента второго порядка (затыловочных резцов, профильных шлифовальных кругов и др.), а также модулей САПР ТП режущего инструмента.

Решение вопроса о выборе структуры САПР-И определяется не только на основе мнения экспертов-разработчиков, но в значительной степени зависит от степени универсальности ее центрального модуля. Для узкоспециализированных систем структура автоматически упрощается. В них, например, в большинстве случаев целесообразно включать информационно-поисковые системы режущего инструмента — ее ценность и उपयोगность не компенсируют затрат на создание такого модуля. И наоборот, чем выше уровень универсальности модуля проектирования нестандартного инструмента, тем целесообразнее создание сложной развитой структуры САПР-И.

Состав модулей САПР-И и принцип их построения в целом совпадают с общими рекомендациями по разработке САПР. Поэтому, как и в любой другой САПР, имеются все типы обеспечения — техническое, математическое, программное, информационное, лингвистическое, методическое и организационное (некоторые из названных видов обеспечения могут отсутствовать конкретно в САПР-И, так как присутствуют в вышестоящих по иерархии модулях). Особенности САПР-И проявляются в основном в математическом, информационном и, отчасти, в лингвистическом обеспечении.

Инструменты являются относительно небольшими объектами, алгоритмы проектирования которых относительно хорошо формализуются в пределах инструмента одного типа (группы). Однако распространить эти алгоритмы частных решений на разнотипные инструменты очень сложно. Этим можно объяснить наличие большого количества частных САПР инструментов различного типа — фасонных фрез, резцов, сверл и т.д., созданных еще на первых ЭВМ (типа БЭСМ, «МИНСК», «НАИРИ») и отсутствие даже сегодня универсальных программ проектирования разнотипного инструмента (имеющиеся многономенклатурные САПР-И используют не общие алгоритмы проектирования, а механическое объединение отдельных алгоритмов в головном модуле).

Поэтому характерной чертой математического обеспечения САПР-И является очень большое количество частных алгоритмов.

Другой особенностью процесса проектирования является ярко выраженное преобладание при проектировании геометрических задач. Как правило, для разработки инструмента не требуется сложных прочностных и динамических расчетов, зато объем геометрических задач резко возрастает. В большинстве случаев профилирование инструмента связано с решением задачи поиска огибающей, вопросами поиска точек и линий касания, Сглаживания ломаных линий, замены сложных кривых простыми, решением трансцендентных уравнений. В связи с этим для профилирования инструмента требуется специфический математический аппарат, в частности, начертательная, аналитическая и дифференциальная геометрии, численные методы. Учитывая сложный характер взаимодействия детали и инструмента, проектирования с использованием только аналитических методов профилирования режущих кромок зачастую недостаточно — требуется отображение процесса проектирования на дисплее. В связи с этим в САПР-И широко применяется компьютерная графика. Целесообразность использования графики обоснована еще и тем, что во многих случаях с точки зрения алгоритма проектирования можно завершить работу программы не промежуточным расчетом, а законченным рабочим чертежом.

*Важной особенностью САПР-И являются высокие требования к информационному обеспечению.* Это связано с двумя факторами. Во-первых, необходимо исключить дублирование работ — перед проектированием объекта необходимо убедиться в отсутствии стандартного или ранее выполненного аналога. Это требует связи САПР-И с внешней или внутренней информационно-поисковой системой, которая хранит и диспетчирует стандартные и вновь выполненные проекты. Во-вторых, проектируемый инструмент как часть технологической системы жестко регламентирован стандартами по габаритным и присоединительным размерам, материалу и требованиям к качеству поверхности и др. Поэтому без развитого информационного обеспечения проектирование инструмента возможно только в примитивном диалоговом режиме, когда ввод справочных данных осуществляет пользователь.

Названные особенности определяют и выбор лингвистического обеспечения. Требования к языку программирования высокие — он должен выполнять достаточно сложные и объемные вычисления, иметь доступ к базам данных (желательно стандартных форматов), работать с графикой, иметь интерфейсы с

внешними модулями. Набор требований к языку имеет конфликтный характер — специализированные языки не способны решать все названные задачи, а на универсальных языках разработка САПР-И требует чрезмерных трудозатрат. Выбор языка остается за разработчиком, но как показывает анализ, наиболее часто применяются универсальные языки (C++, Pascal) с использованием специализированных библиотек. В последнее время очень часто проектирование ведут в различных программах-оболочках. Наиболее удобными являются различные развитые векторные графические системы (типа AutoCAD, «Компас». Имея развитую систему графических функций, необходимых для проектирования, эти системы имеют интерфейсы с универсальными языками программирования. Развитие вычислительной техники и методов программирования могут привести и к созданию специализированных ЭВМ и языков программирования для разработки новых инструментов.

При разработке САПР-И необходимо учитывать необходимость работы с САПР низшего и высшего уровней, а значит, нужно выходные данные представлять в какой-то общей стандартной форме данных, и иметь дешифраторы входных данных.

Наиболее ответственным является этап проектирования специального инструмента, который начинается оформлением технического задания на проектирование, включающего требуемые исходные данные, считая, что подкласс, группа, подгруппа и вид инструмента по ОКП известны.

При проектировании инструмента решаются следующие вопросы:

- 1) выбор марки материала режущей и крепежной части инструмента;
- 2) разработка принятого варианта конструкции с оформлением рабочего чертежа;
- 3) определение основных эксплуатационных свойств инструмента;
- 4) технико-экономическая оценка проекта;
- 5) оформление технической документации.

Теоретической основой второго пункта является наука «Теория проектирования инструментов».

*Последовательность разработки варианта конструкции сложного ЛИ, исходя из разработанной методики проектирования, следующая:*

- а) нахождение исходной инструментальной поверхности;

- б) превращение ИП в инструмент как тело, режущие кромки которого находятся на ней;

- в) разработка рабочего чертежа инструмента.

Лезвийные инструменты можно разделить на две группы:

- а) простые (резцы токарные, кроме фасонных; инструменты для обработки отверстий; фрезы концевые, дисковые, цилиндрические; метчики, плашки и др.);

- б) сложные режущие (фасонные) инструменты, обкаточные инструменты, протяжки и т.д.).

Вопросы выбора простых инструментов при проектировании ТП решаются достаточно легко. В этих случаях выбирают стандартный инструмент требуемой группы и вида в соответствии с общероссийским классификатором. При отсутствии нужного типоразмера инструмента в ТП вписывается ближайший, на котором можно получить нужные размеры путем его доработки (например, перешлифовать зенкер на нужный диаметр или заточить резец с требуемыми геометрическими параметрами). Такие инструменты применяют для обработки большинства простых элементарных поверхностей деталей или комбинаций из них.

Несколько сложнее задача проектирования различных стандартных конструкций при отсутствии нужных типоразмеров или задача проектирования простого сборного инструмента.

Наибольшие трудности представляет разработка сложного лезвийного инструмента. Главной задачей при этом является профилирование инструмента — расчет его профиля в сечениях, используемых для изготовления, контроля и эксплуатации.

В большинстве случаев профиль инструмента не совпадает с профилем детали, хотя определяется им и методом формообразования. Профилирование инструмента является наиболее сложной задачей проектирования инструмента. Затруднения вызывает не только математическое описание взаимного движения инструмента и детали, но и необходимость учета особенностей процесса резания и возможности современного инструментального производства. Например, стандартной процедурой при проектировании инструмента является замена криволинейного профиля дугой или прямой, эвольвентного червяка архимедовым и т.п. Такие упрощения вызывают появление погрешностей при обработке детали. Для оценки возможной погрешности приходится решать так называемую обратную задачу — по заданному профилю инструмента определить будущий профиль детали.

Для решения задач профилирования (определение профиля инструмента по профилю детали и профиля детали по профилю инструмента — т.н. прямая и обратная задачи) существует две основные методики, основанные на алгоритмах:

в виде системы аналитических зависимостей и практических рекомендаций;

в виде графических и графоаналитических построений.

*Аналитические зависимости для расчета инструмента* могут быть созданы на базе элементарной или дифференциальной геометрии, численных методов и широко представлены в соответствующей литературе. Они обеспечивают высокую точность расчетов, легко реализуются программно, их недостатком является отсутствие наглядности, возможность возникновения грубых ошибок, сложность корректировки при упрощениях профиля.

*Графические методы* наглядны, могут явно отражать особенности формообразования, исключить грубые ошибки. Но при ручных построениях точность таких методов явно недостаточна для проектирования инструмента. С появлением ЭВМ и развитием компьютерной графики графические алгоритмы проектирования инструмента вновь стали интенсивно развиваться. Точность и скорость таких методов сравнимы с аналогичными характеристиками аналитических методик, что в сочетании с названными выше преимуществами, делают их перспективными. Они позволяют:

максимально приблизить расчетную схему профилирования к реальной, возникающей на станке в процессе обработки;

сделать процесс проектирования наглядным, понятным не только конструктору, что очень важно для обучающих систем;

обеспечить высокую точность параметров объекта (не ниже, чем при аналитических расчетах);

уменьшить (или даже исключить) возможность возникновения грубых ошибок проектирования, характерных для аналитических методов, связанных с выходом за пределы допускаемых значений входных величин (подрезы и т.п.);

повысить общность методик проектирования, так как многие аналитические зависимости разработаны для конкретных типов, а иногда и типоразмеров инструмента;

Возможности компьютерной графики позволяют непосредственно переносить методику ручных построений инструмента на ЭВМ, однако во многих случаях это нерационально, так как ручные построения основаны на начертательной геометрии, а компьютер-

ная графика — на аналитической и дифференциальной геометрии. Поэтому существующие методики должны перерабатываться с учетом возможностей мощного математического аппарата машинного графического проектирования. Из новых открывающихся направлений следует отметить методики кинематического моделирования и методики твердотельного моделирования. При кинематическом моделировании изображения инструмента и заготовки (для обратной задачи) или детали и заготовки инструмента (прямая задача) получают согласованные взаимные движения, эквивалентные движению реальных объектов проектирования. Профилирование происходит путем отсечений изображения заготовки в каждом фиксированном положении. Такие методы эффективны для проектирования обкаточного инструмента, а для двухмерной задачи к тому же их реализация несложна. Очень большими возможностями обладает твердотельное моделирование — использование трехмерных изображений объектов, причем эти изображения имеют все атрибуты реальных тел — массу, моменты инерции и т.д. Такие модели можно объединять, вычитать одну из другой, рассекать произвольными плоскостями с получением нужных сечений и т.п.

Развитие науки о резании металлов позволяет более строго формулировать технические требования к режущему клину инструмента, геометрические, микрогеометрические и физико-механические свойства которого определяют качество формируемой поверхности детали.

Дальнейшее развитие САПР-И будет идти в нескольких направлениях. В первую очередь, будет усложняться структура САПР-И за счет более глубокой интеграции ее в общую структуру САПР ТП. Проектирующие модули должны стать более универсальными, что обеспечит уменьшение их количества при усложнении схемы взаимодействия. Будет совершенствоваться используемый математический аппарат и алгоритмы с целью повышения общности проектирования, создания многоименных систем. Такие изменения основных компонентов САПР-И, а также включение в нее новых модулей (САПР ТП инструмента, САПР приспособлений и др.) должны обеспечить комплексную автоматизацию процесса разработки технологического процесса проектирования и изготовления изделий заданного качества, включая все виды инструментального, метрологического и прочего обеспечения. Должна быть расширена область задач, решаемых в автоматическом режиме, в первую очередь задач структурного синтеза, что позволит находить новые конструкторские решения.

### 3.3.4. ИЗНОС ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

Напряженное и деформированное состояние зоны стружкообразования является одним из основных физических факторов, определяющих допустимые размеры срезаемого слоя и скорости резания в связи с прочностью и износостойкостью режущего клина инструмента.

К числу основных факторов, определяющих допустимые скорости резания и размеры среза в связи с красностойкостью и износостойкостью режущего клина инструмента, относится теплота. Количество выделившегося в процессе резания тепла эквивалентно затраченной работе.

Тепловыми явлениями следует управлять так, чтобы выделяющееся тепло способствовало деформациям в зоне стружкообразования и не снижало стойкости инструмента и точности обработки. Это можно осуществить путем изменения скорости резания, параметров среза, геометрических параметров инструмента, инструментального материала, смазочно-охлаждающей жидкости.

Температурное поле режущего клина инструмента определяет характер износа и его стойкости. Наибольшее значение имеет концентрация температур в поверхностных слоях контакта. Теплота, выделяющаяся в процессе резания, изменяет состояние трущихся поверхностей, оказывает влияние на характер и силу трения на передней и задней поверхности режущего клина.

Важным фактором, влияющим на характер износа и стойкости режущего инструмента, является наростообразование. В первом приближении (рис. 3.3.22) можно различать зоны полного застоя (зона 1), где обрабатываемый материал неподвижен, и зону относительного застоя (зона 2), где скорость перемещения обрабатываемого материала изменяется практически от нуля до скорости стружки. Об изменении скоростей в зоне относительного застоя можно судить по искривлению линий текстуры стружки. Наростом нужно считать зону полного застоя. Для того, чтобы в зоне 1 исключались пластические деформации, в ее пределах должно быть такое напряженное состояние, при котором условие пластичности не выполняется, в отличие от зоны 2.

Однако зону 2 нельзя рассматривать как зону непрерывных пластических деформаций. При температурах до 600°C, пластичность обрабатываемого материала является недостаточной, чтобы выдержать без разрушения те деформации, которые имеют место в зоне относительного застоя. Поэтому в этой зоне происходят периодические разрывы зерен

металла на участках *Б* и *В*, где пластические деформации достигают наибольшей величины. Зона полного и относительного застоя на этих участках разделяется трещинами и пустотами. Градиент скоростей течения металла здесь имеет разрыв, появляются участки внешнего трения между стружкой и передней поверхностью нароста. Вследствие неровности поверхностей разрыва при их взаимном перемещении возникают очень высокие местные контактные напряжения, которые вызывают локальные пластические деформации. Вследствие разрывов на участках *Б* и *В* стабильность пластического течения металла в зоне 2 нарушается. Металл, поступающий в верхнюю часть *А* этой зоны, не вытекает через участки *Б* и *В*, вследствие чего происходит наполнение металла в области *А*. Увеличение области *А* приводит к перераспределению нагрузок, действующих на нарост, вызывая ее разрушение.

Нарост, возникающий при резании с образованием сливной стружки, защищает наиболее слабую часть режущего клина — режущую кромку, изменяет форму передней поверхности резца, увеличивает угол резания. Это приводит к улучшению условий работы кромки. Наряду с этим обработка инструментом с наростом вызывает в зоне интенсивного наростообразования значительное увеличение шероховатости обработанной поверхности и вибрации. Кроме того, в случае нестабильного наростообразования нарост может быть причиной уменьшения стойкости режущего инструмента из-за вырывов частиц инструментального материала.

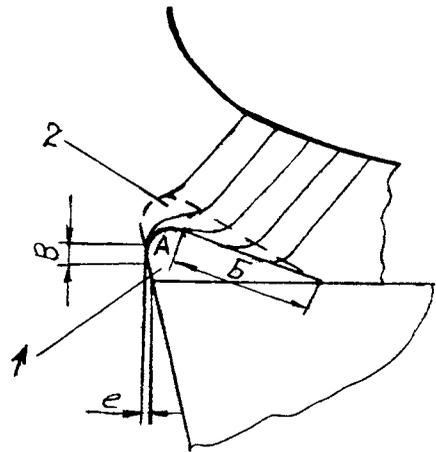


Рис. 3.3.22. Схема наростообразования при резании лезвийным инструментом

Величина, форма и устойчивость нароста в наибольшей степени определяются скоростью резания. При заданных физико-механических свойствах обрабатываемого материала в условиях резания всегда имеется зона скоростей резания наибольшего наростообразования. Наряду с этим на размеры и устойчивость нароста существенное влияние оказывают толщина среза и передний угол режущего клина.

Вследствие воздействия высоких контактных нагрузок и температур инструмент утрачивает свои режущие свойства из-за износа режущего клина. Время работы инструмента между периодами восстановления его режущих свойств определяет период стойкости инструмента. Критерием затупления является количественное выражение допустимого износа инструмента.

Период стойкости инструмента определяется нагрузкой режущего клина и его способностью воспринимать эти нагрузки. Нагрузка, действующая на рабочие поверхности, определяется трением стружки и поверхностей заготовки о переднюю и заднюю поверхности режущего клина, температурой и давлением, которое обусловлено процессом резания. Это ведет к износу режущего клина и вызывает сложное объемное напряженное состояние режущей кромки. Поэтому период стойкости зависит от двух тесно взаимосвязанных факторов — износа при трении стружки и обрабатываемой поверхности заготовки о переднюю и заднюю поверхности режущего клина и разрушения режущего клина под действием нагрузок, возникающих в процессе резания. Эти факторы вызывают два вида износа: износ истирания и износ выкрашивания, существующие одновременно и сопутствующие один другому.

Под истирающим обычно понимают постепенно нарастающий износ по времени. Под износом выкрашивания понимают износ, неравномерный по времени его образования, обусловленный отделением относительно больших частиц инструментального материала. Соотношение между этими видами износа определяется конкретными условиями обработки (вид обработки, характеристика инструментальных материалов по износоустойчивости, прочности, термоциклическости и т.д.).

Износ рабочих поверхностей режущего клина инструмента, работающего при низких скоростях резания (в основном инструмент из быстрорежущей стали — резцы, сверла, фрезы и т.д.), когда температура в контактных слоях мала, можно рассматривать как один из видов механического износа. Его величина определяется отношением контактных твердостей

инструментального материала и обрабатываемого материала и интенсивность протекания адгезии. Характеристикой инструментального материала, представляющей износоустойчивость при адгезионном и абразивном износе, служит прочность и твердость контактных слоев инструмента при температурах, сопровождающих процесс резания. При этом соотношение между этими типами износа определяется условиями резания (вид обработки, скорость резания, характеристика инструментального материала и т.д.).

Сущность адгезионного износа заключается в том, что обрабатываемый материал периодически в различных точках контакта под действием адгезионных сил как бы приваривается к инструментальному материалу при взаимном перемещении места сварки либо по поверхности контакта, либо под его поверхностью. Разрушение по поверхности контакта происходит в том случае, когда силы адгезии относительно малы, а контактирующие материалы прочны. Ослабление адгезионных сил возможно при наличии пленок окислов химических соединений, адсорбированных газов на поверхности контакта, а также при резко отличающихся свойствах контактируемых пар. Разрушение под поверхностью контакта может происходить как внутри обрабатываемого материала, так и внутри инструментального материала. В большинстве случаев эти разрушения происходят внутри обрабатываемого материала, так как его прочность ниже прочности инструментального материала. Однако периодическое повторение циклов приваривания и разрушения обрабатываемого материала приводит к циклическому нагружению поверхностных слоев инструментального материала, которое вызывает их местное усталостное разрушение, имеющее характер выкрашивания.

Поверхностные усталостные разрушения инструментального материала протекают тем более интенсивнее, чем меньшей циклической прочностью он обладает. Так, например, при точении молибденового сплава ВМ1 твердый сплав ВК8 в диапазоне скорости резания 10..30 м/мин подвергается более интенсивному адгезионному износу, чем быстрорежущая сталь Р18, которая лучше сопротивляется циклическим нагрузкам. При увеличении скорости резания возрастает температура, что приводит к снижению хрупкости, повышению пластичности и сопротивлению контактным циклическим нагрузкам твердого сплава. В результате интенсивность адгезионного изнашивания резцов из твердого сплава уменьшается.

Интенсивность изнашивания режущих инструментов, работающих при высоких ско-

ростях резания, когда температура контактных слоев высока (более  $900^{\circ}\text{C}$ ; в основном это свойственно твердосплавному инструменту), определяется обычно взаимным диффузионным растворением инструментального и обрабатываемого материалов. С физической точки зрения такой износ можно рассматривать как один из видов химического износа, а его величина определяется скоростью взаимного растворения инструментального и обрабатываемого материала.

При химическом износе характеристикой инструментального материала, определяющей его износоустойчивость, является инертность инструментального материала по отношению к обрабатываемому материалу. Она определяется из температурных зависимостей коэффициентов диффузии и диаграммы состояния реагирующих пар.

Наряду с видами износа, характеризующимися относительно плавным нарастанием износа во времени до достижения допустимой его величины, существуют и другие причины потери работоспособности режущего инструмента. Например, если действующие напряжения на режущем клине превосходят предел прочности на отрыв инструментального материала, то происходит хрупкое разрушение, при котором режущая кромка скалывается; особенно это свойственно безвольфрамовым твердым сплавам, керамике, обладающих недостаточной прочностью, а также возможным наличием в них внутренних напряжений и трещин.

Хрупкому разрушению режущего клина способствует возникновение термических трещин, которые возникают в режущем клине в направлении, перпендикулярном режущей кромке (рис. 3.3.23, б). Наиболее это характерно для прерывистого резания.

Если напряжения на режущем клине превосходят предел текучести инструментального материала, то наступает вязкое разрушение, сопровождающееся изменением формы режущего клина. Такое разрушение характерно для инструментов из инструментальных сталей, а также из безвольфрамовых и низковольфрамовых твердых сплавов в случае высоких скоростей резания с относительно большими толщинами среза (рис. 3.3.23, в).

Таким образом, в зависимости от условий обработки (вида обработки, режимов резания, инструментального материала и т.д.) существуют различные виды износа режущего клина, физическая природа которых различна. При этом во многих случаях разные виды износа режущего клина, физическая природа возникновения которых различна, присутствуют в процессе резания одновременно

(например, абразивный-адгезионный-окисный). Однако их доля в потере работоспособности режущего инструмента в зависимости от условий резания различна.

При оценке работоспособности режущего инструмента наиболее распространенным критерием затупления служит ширина, изношенной контактной площадки  $h_2$  по задней поверхности. Износ инструмента характеризуется также размерами лунки, образующейся на передней поверхности (ширина, глубина лунки, её положение относительно режущей кромки). Данные параметры износа легко измеряются и в то же время отражают состояние режущего клина с точки зрения работоспособности инструмента без учета физики износа.

В зависимости от условий резания износ режущего клина инструмента может быть:

по задней поверхности в виде площадки износа, при толщине среза менее  $0,1...0,15$  мм и использовании СОЖ (этот износ характерен для чистовых операций);

по передней и задней поверхностям при толщине среза  $0,15...0,5$  мм и средних скоростях резания с использованием СОЖ (этот износ наиболее характерен для резцов, фрез, сверл, зенкеров, машинных метчиков, плашек);

по передней поверхности в виде лунки, у резцов и фрез, если толщина среза превышает  $0,5$  мм при высокой скорости резания без охлаждения.

На рис. 3.3.23 представлена схема износа лезвия, которая наиболее полно отражает возможные варианты износа режущего клина.

С целью измерения износа главная режущая кромка разбивается на четыре зоны (рис. 3.3.23, б):

зона *С* — это криволинейная часть режущей кромки у вершины инструмента;

зона *В* — оставшаяся прямолинейная часть режущей кромки, расположенная между зонами *С* и *А*;

зона *А* —  $1/4$  часть изношенной режущей кромки длиной *b*, наиболее удаленная от вершины;

зона *Н* — начинается за зоной непосредственного контакта режущей кромки с обрабатываемой поверхностью и распространяется вдоль режущей кромки приблизительно на  $0,5...1$  мм.

Измерение износа по главной задней поверхности проводится в плоскости главной режущей кромки и вектора скорости главного движения перпендикулярно к главной режущей кромке. Ширина ленточки износа измеряется от положения главной режущей кромки до начала резания.

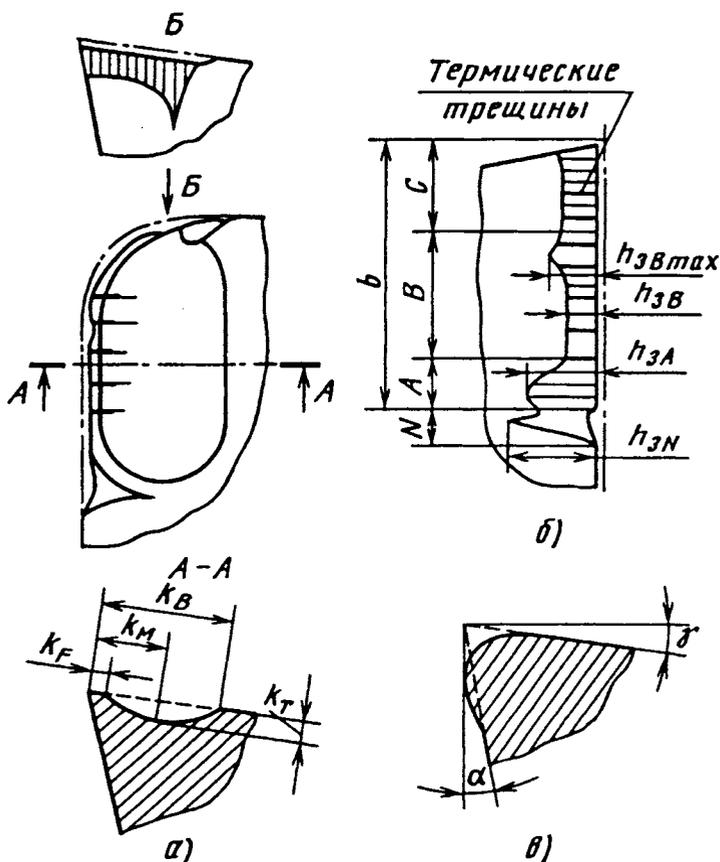


Рис. 3.3.23. Виды износа лезвия

Типовая кривая износа задней поверхности инструмента имеет форму, близкую к параболе (рис. 3.3.24). Наибольший износ протекает в начале работы инструмента (период приработки  $t_1$ ). По мере роста размеров контактной нагрузки интенсивность износа падает и наступает период нормального износа  $t_2$ . Величину износа, соответствующую точке  $M$  перелома на кривой износа в сторону его резкого возрастания, т.е. катастрофического износа  $t_3$ , называют оптимальным износом  $h_{3опт}$ , по которому определяют величину критерия затупления с учетом разброса его значений.

Ширина ленточки износа по задней поверхности  $h_3$  в зоне  $B$  (см. рис. 3.3.23, б) является мерой износа инструмента и обычно задается как критерий затупления максимальной величиной ленточки износа  $h_{3Bmax}$  в случае неравномерного износа (имеются глубокие проточки, выкрашивания) и средней величиной ленточки износа  $h_{3ср}$  в случае равномерного износа.

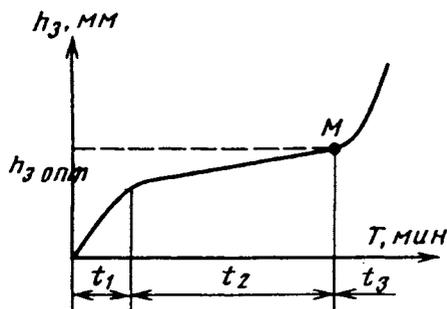


Рис. 3.3.24. Типовая кривая износа задней поверхности лезвия

Выкрашивания небольших участков режущей кромки, а также термические трещины (что особенно свойственно износоустойчивым материалам, не обладающих достаточной прочностью), учитываются через максимальный износ  $h_{3Bmax}$ .

Пластические деформации режущего клина (см. рис. 3.3.23, *в*) (что особенно свойственно инструментальным материалам, склонным к разупрочнению при высоких температурах), также учитываются через максимальный или средний износ в зависимости от его равномерности.

Износ в виде лунки (см. рис. 3.3.23, *а*) является наиболее распространенным типом износа передней поверхности. Глубина лунки  $k_T$  может быть мерой износа инструмента и задана как критерий затупления инструмента (в основном это характерно при работе твердосплавным инструментом в случае непрерывного резания с большими скоростями резания и толщинами среза). Положение лунки относительно режущей кромки также важно, так как глубокая и широкая лунка, расположенная далеко от кромки, может быть менее опасной для режущего клина, чем менее глубокая и узкая, но расположенная вблизи кромки. Расстояние  $k_F$  от передней кромки лунки до режущей кромки иногда является полезным критерием, который в результате ограничения может исключить катастрофический износ. Это является одной из причин, почему допустимая глубина лунки  $k_T$  задается в зависимости от подачи.

Для некоторых случаев обработки расстояние от центра лунки до режущей кромки  $k_M$ , а также ширина лунки  $k_B$  могут быть использованы в качестве дополнительной информации, так как эти параметры влияют на термодинамическую нагруженность режущего клина (в частности, это важно при выборе размеров стружколомающих канавок на передней поверхности резцов). Расстояние центра лунки  $k_M$  — расстояние между режущей кромкой в её первоначальном положении до начала резания и наиболее глубокой точкой лунки (измеряется в зоне *B* параллельно передней поверхности в направлении, перпендикулярном режущей кромке). Ширина лунки  $k_B$  — расстояние между режущей кромкой в её первоначальном положении до начала резания и задней стороной лунки (измеряется параллельно передней поверхности в направлении, перпендикулярном режущей кромке).

Так как расстояние  $k_M$  зависит не только от подачи (толщины среза), но и от инструментального и обрабатываемого материалов, то иногда задаются отношением лунки  $K = k_T/k_M$  (приблизительно  $K = 0,1$ ).

Износ  $h_{3A}$  в зоне *A* носит ярко выраженный стохастический характер и в зависимости от конкретных условий резания его интенсивность может быть обусловлена нестабильностью наростообразования в области контакта режущей кромки с обрабатываемой поверхностью, наклепом обработанной поверх-

ности при многопроходной обработке и т.п. Аналогичный характер с точки зрения стабильности имеет комбинированный износ  $h_{3N}$  передней и задней поверхностей в зоне *N*, обусловленный воздействием на режущий клин сходящей стружки (особенно в случае большой толщины среза). В соответствии с этим износ в зоне *A* или *N* не может служить в качестве критерия затупления инструмента. Однако в некоторых случаях обработки, когда интенсивность износа в зоне *A* или *N* очень высокая (что может привести к катастрофическому износу), данные типы износа могут быть использованы в качестве критерия затупления инструмента.

Если при определенном критерии затупления скорости резания соответствует стойкостям  $T_1, T_2, T_3, \dots$ , то

$$v_1 T_1^m = v_2 T_2^m = v_3 T_3^m = \dots = \text{const},$$

$$\text{или } v = C_v / T^m,$$

где  $C_v$  — коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала, подачи, глубины резания, геометрических параметров режущего клина, инструментального материала, СОЖ и т.п.;  $m$  — показатель относительной стойкости, зависящий от тех же факторов, что и характер износа инструмента.

Приведенные зависимости  $T = f(v)$  справедливы только для относительно узкого диапазона скоростей резания. Для широкого диапазона режимов резания (скорости, подачи) эти зависимости выражаются рядами Фурье. Это обусловлено изменениями процесса стружкообразования (в частности, зависимость среднего коэффициента трения стружки с передней поверхностью от скорости резания не является монотонной), изменением физической природы износа и их перераспределением доминирующей роли различных видов износа в процессе затупления инструмента.

Для различных видов режущего инструмента (резцы, фрезы, сверла, метчики и т.д.) установлены эмпирические зависимости их стойкости от условий обработки, которые отражены в общемашиностроительных нормах режимов резания материалов.

На современном этапе указанные зависимости, полученные эмпирическим путем, являются наиболее достоверными. Однако метод их получения является очень трудоемким и дорогостоящим. Поэтому в ряде случаев (особенно при сертификации режущего инструмента) используются ускоренные эмпирические методы. В частности, на основе интенсивности износа, установленной за не-

большой промежуток времени работы инструмента, соответствующий зоне нормального износа (зона 2, рис. 3.3.22) путем экстраполяции определяется период стойкости инструмента при заданном критерии его затупления.

Используется ускоренный метод, основанный на выработке энергетического ресурса режущего инструмента, т.е.

$$\sum_{i=1}^k \frac{\tau_i}{T(\epsilon_i)} = 1,$$

где  $T(\epsilon_i)$  — период стойкости инструмента при его работе на режимах резания  $\epsilon_i$ ;  $\tau_i$  — время работы инструмента на режимах резания  $\epsilon_i$ ;  $k$  — число вариантов режимов резания.

В данном случае при сохранении автоматичности процесса резания при изменении режимов резания, (т.е. сохранении доминирующей роли того или иного вида износа, геометрических параметров режущего клина в процессе резания и т.п.) можно одним инструментом без восстановления его режущих свойств определить период стойкости инструмента при различных режимах резания.

Ускоренные методы эффективны только при линейном характере изменения износа режущего клина во времени. В реальных процессах резания интенсивность износа режущего клина до достижения критерия его затупления может существенно изменяться (особенно при малых промежутках времени), вследствие чего ускоренные методы имеют ограниченное применение.

При проведении однофакторных экспериментов, т.е. когда изменяется один фактор при прочих постоянных факторах (например, изменяется скорость резания при постоянных толщине и ширине среза), не учитывается взаимовлияние исследуемых факторов. Для устранения этого недостатка используются планированные методы испытаний. Если число уровней (число значений исследуемого фактора) равно 2, то это полный факторный эксперимент типа  $2^k$ . Условия эксперимента представляются в виде таблицы-матрицы планирования, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы — значениям факторов.

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{k-1,k} x_{k-1} x_k,$$

где  $y$  — определяемое значение периода стойкости инструмента;  $x_1, x_2, \dots, x_k$  — кодированное значение исследуемых факторов;

$b_0, b_1, b_2, b_k$  — коэффициенты, определяемые условиями резания;  $k$  — число исследуемых факторов.

Коэффициенты, вычисленные по результатам эксперимента, указывают на силу влияния факторов. В тех случаях, когда эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор, говорят о наличии эффекта взаимодействия двух факторов.

Так как изнашивание инструмента происходит под действием адгезионных, диффузионных, окислительных и других явлений, протекающих на его контактных площадках, точное его математическое описание на данном этапе развития науки о резании металлов, является затруднительным. Однако в последние годы проведены исследования, целью которых является оптимизация процессов механической обработки на основе аналитического метода определения параметров обрабатываемости материалов. Аналитический метод определения режимов резания основан на использовании современных достижений в области изучения физико-химических явлений, протекающих в зоне резания, одновременном исследовании механических и тепловых явлений и установлении их взаимосвязи с процессами изнашивания инструмента методами теории подобия. Но и в этом случае используются элементы ускоренных методов испытаний, а именно — определение интенсивности износа за небольшой промежуток времени работы инструмента в зоне 2 (рис. 3.3.24).

Это существенно снижает эффективность данного решения. Наиболее оно эффективно в случаях получения быстрой информации по обрабатываемости материалов с принципиально новыми физико-механическими свойствами.

Перспективным методом расчета прочности режущего клина, нагруженного контактными нагрузками с различной эпюрой и подвергающегося действию неравномерного температурного поля, является метод конечных элементов.

При автоматизации обработки и на числовых операциях применяют технологические критерии затупления, т.е. величины износа инструмента, при превышении которых точность получаемых размеров изделия или шероховатость обработанной поверхности не отвечают техническим требованиям. Так, например, при чистовом точении с малыми подачами на вспомогательной задней поверхности может образоваться одна или несколько проточин (рис. 3.3.23, а; вид Б), которые вызывают увеличение параметров шероховатости обработанной поверхности. Влияние износа резцов этого типа на работоспособность инст-

румента можно оценить измерениями параметров шероховатости обработанной поверхности. Определенное значение шероховатости обработанной поверхности может быть использовано как критерий затупления реза.

При эксплуатации инструмента без подналадки на станках-автоматах и автоматических линиях время непосредственной работы инструмента до снятия его для перетачивания определяется размерной стойкостью инструмента, т.е. временем, в течение которого инструмент обеспечивает обработку деталей в пределах заданного допуска. Размерный износ инструмента измеряют как износ режущей кромки в направлении нормали к обработанной поверхности.

Величину размерного износа определяют износом по задней поверхности на участке, прилегающем к вершине реза, с учетом тангенса заднего угла. Поэтому для увеличения размерной стойкости на вершине реза со стороны задней поверхности выполняют фаску с нулевым задним углом.

Для увеличения размерной стойкости инструмента до оптимального износа станки оборудуют специальными приспособлениями, позволяющими автоматически контролировать детали во время обработки и по установленным размерам автоматически поднастраивать технологическую систему, т.е. создано оборудование с адаптивным управлением.

Наряду с непосредственным измерением износа инструмента или размеров обрабатываемой детали существуют различные методы контроля степени износа инструмента, эффективность которых определяется конкретными условиями их применения. Эти методы контроля основаны на измерениях:

сил резания в зависимости от износа инструмента (наиболее эффективен в случае резкого изменения сил резания в процессе износа инструмента);

температур с помощью термопары в процессе износа инструмента (применение ограничивается влиянием на термоэлектродвижущую силу неоднородности обрабатываемого материала, смазочно-охлаждающей жидкости, сходящей стружки);

интенсивности вибрации в процессе износа инструмента (наиболее эффективен в случае большой площади контакта нежесткого инструмента с заготовкой, например, при сверлении);

радиоактивности режущего клина в процессе его износа (наиболее эффективен при очень малом изменении износа в процессе резания до достижения критерия затупления, а также в сложных условиях обработки: наличие смазочно-охлаждающей жидкости, наростообразование на режущей кромке, вращающийся инструмент, загрязнения и т.п.);

электросопротивления в контакте инструмент-заготовка в процессе изнашивания инструмента (ограниченное применение из-за влияния на электросопротивление высоких температур и пластических деформаций в зоне износа);

расстояния инструмента от обработанной поверхности с помощью фиксированного давления воздуха, проходящего через сопло в инструменте при заданном износе инструмента (в основном лабораторное применение из-за влияния на давление воздуха температур, шероховатости обработанной поверхности, колебания давления в системе);

на анализе виброакустической эмиссии зоны резания (наиболее перспективный метод).

В условиях автоматизированного производства указанные методы контроля износа режущего инструмента позволяют существенно снизить затраты на его эксплуатацию за счет обеспечения возможности полного использования режущих свойств инструмента (т.е. время работы инструмента определяется временем его работы до достижения заданного критерия затупления).

### 3.3.5. ЗАТАЧИВАНИЕ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

Затачивание лезвийного инструмента в условиях инструментальных заводов выполняется на специальных автоматах и полуавтоматах, а на предприятиях, потребителях инструмента, затачивание проводится на универсально-заточных станках. Перспективными являются станки с ЧПУ. Универсально-заточные станки оснащают рядом приспособлений. К ним относится универсальная головка (рис. 3.3.23, а), тиски, которые позволяют поворачивать затачиваемый инструмент при его установке вокруг трех взаимно перпендикулярных осей. Большая универсальная головка имеет механизм для деления на 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12 и 24 части. Имеются также двух- и одноповоротные приспособления. Простейшим приспособлением являются центровые бабки, которые служат для затачивания инструмента в центрах и позволяют при установке поворачивать затачиваемый инструмент вокруг своей оси. Ряд приспособлений к универсально-заточным станкам сообщают инструменту в процессе его затачивания дополнительные движения. К ним относятся приспособления для наружного и внутреннего круглого шлифования, для затачивания зенкеров по винтовой поверхности, для затылования метчиков и т.п.

Ориентировочные, рекомендуемые характеристики шлифовальных кругов и режимов затачивания приведены в табл. 3.3.1.

### 3.3.1. Шлифовальные круги и режимы затачивания инструмента торцом круга

Характеристика круга и режим затачивания	Затачивание предварительное				Твердый сплав и керамика	Сверхтвердые материалы	Затачивание чистовое		Доводка			Твердый сплав, керамика
	Быстрорежущая сталь		Твердый сплав				Быстрорежущая сталь	Твердый сплав, керамика	Быстрорежущая сталь			
	P18, P12, P6M5 и др.	P9K5, P12Ф3, P6M5K5 и др.	T5K10, BK6, BK8 и др.	T15K6, T14K8, BK3 и др.					Эльбор	Алмаз	Эльбор	
Абразивный материал	Электрокорунд 24А, 25А	Электрокорунд 33А монокорунд 44А, 45А	Карбид кремния зеленый: 63С, 64С	Т15К6, Т14К8, ВК3 и др.	Алмаз АС6, АС4, АС2	Алмаз АС6, АС4, АС2	Эльбор ЛО	Алмаз АС2	Эльбор ЛО	Карбид кремния 63С	Алмаз АСМ	Алмаз АСМ
Зернистость	40—25	40—25	40—25	40—20	125/100, 80/63	125/100, 80/63	100/80, 80/63	80/63, 50/40	50/40, 40/28	6—5	40/28, 28/20	40/28, 28/20
Связка	Керамическая		Керамическая		Металлическая		Бакелитовая					
Номер структуры или концентрация	6—7	7—8	5—6	6—7	100%, 50%	100%	100%	100%	50%	5—6	—	50%
Окружная скорость шлифовального круга, мм/с	20—30	16—18	12—18	10—15	15—20	16—18	20—30	25—30	18—20	25—30	25—30	25—30
Продольная подача, м/мин	3—6	3—6	5—8	5—8	1—3	1—2	1—4	1—2	0,1—0,3	0,1—0,3	0,1—0,3	0,1—0,3
Подача на глубину, мм/дв.ход	0,03-0,08	0,02-0,04	0,05-0,12	0,04-0,08	0,02-0,04	0,01-0,03	0,01-0,03	0,01-0,02	0,005-0,01	0,01-0,02	0,005-0,01	0,005-0,01
Охлаждающая жидкость	Составы 1 и 2 6—8 л/мин		Составы 3 и 4 не менее 8 л/мин				Состав 5 не менее 5 л/мин	Составы 3 и 6 не менее 5 л/мин	Без охлаждения			

Примечания: 1. Состав 1: аквол 14 6%, вода 95,4%;

Состав 2: ИГЛ-205 5%, вода — 95%;

Состав 3: сода кальцинированная 0,25%, тринатрийфосфат 0,25%, нитрат натрия 0,25%, бура 0,25%, вазелиновое масло 0,5%, вода 98,5%;

Состав 4: тринатрийфосфат 1%, нитрит натрия 0,25%, вода 98,75%;

Состав 5: триэтаноламин или тринатрийфосфат 0,6%, ализариновое масло 0,5%, азотистокислый натрий 0,25%, бура 0,25%, вода 98,4%;

Состав 6: триэтаноламин 1%, нитрит натрия 0,4%, глицерин 0,6%, вода 98%.

2. При затачивании периферийной круга или при замене круга с керамической связкой кругом с бакелитовой связкой необходимо увеличить твердость круга на одну ступень, а скорость круга — на 25%.

С целью придания шлифовальному кругу правильной геометрической формы, восстановления режущих свойств, получения требуемых параметров шероховатости и точности обработанной поверхности производят периодически правку круга. Наиболее часто абразивные круги правят алмазными карандашами, которые представляют собой цилиндрические оправки с вмонтированными вставки с алмазными зернами. Правку режущей поверхности алмазных и эльборовых кругов осуществляют obtачиванием абразивным бруском, шлифованием абразивными инструментами, электроэрозионными и электрохимическими методами. При правке obtачиванием применяют абразивные бруски из карбида кремния зеленого на керамической связке. Круг вращается с рабочей скоростью, а брусок совершает продольную подачу, равную, 1,0...2,0 м/мин и поперечную подачу, равную 0,01...0,02 мм/дв.ход стола. Правка шлифованием кругом из карбида кремния зеленого используется для алмазных и эльборовых кругов на металлической и бакелитовой связках. Алмазный или эльборовый круг вращается с рабочей скоростью, а правящий круг с окружной скоростью  $v = 12...16$  м/с.

Продольная подача колеблется в пределах 1,0...1,5 м/мин, а поперечная — 0,05...0,08 мм/дв.ход.

*Электроэрозионный метод* применяют для правки алмазных и эльборовых кругов на металлической связке. Правящим инструментом служит чугунный, графитовый или латунный фасонный диск или стержень, являющийся катодом. Анодом является алмазный или эльборовый круг. В процессе правки в рабочую зону подается электролит. Правка проводится при напряжении 12...30 В, силе тока 8...12 А, рабочей скорости алмазного кру-

га, скорости дискового электрода-инструмента  $v = 20$  м/с. Эльборовые круги на органической и керамической связках правят алмазами в оправках, алмазными иглами и алмазными карандашами. Это наиболее простой метод, но требующий большого расхода алмаза.

Режущие инструменты, такие как резцы, фрезы, сверла и другие, затачиваются по плоским поверхностям. Плоские поверхности на режущей части могут занимать разнообразное положение. При затачивании инструментов удобно задавать положение затачиваемой поверхности двумя прямыми, расположенными в двух взаимоперпендикулярных плоскостях. Одна из них принимается за продольное, а вторая — за поперечное сечение. Для резцов, торцовых фрез и других инструментов продольные и поперечные углы определяются по табл. 3.3.2.

При затачивании необходимо совместить затачиваемую плоскую поверхность  $A$  с рабочей плоскостью шлифовального круга. Углы установки трехповоротного приспособления (рис. 3.3.25,  $a$ ) при затачивании плоской поверхности, положение которой определяется углами  $\epsilon_{np}$  и  $\epsilon_{п}$ , рассчитываются по формулам:

$$\cos\theta_B(-\cos\theta_B + ctg\epsilon_{п} \sin\theta_B) + ctg\epsilon_{np} \sin\theta_B = 0;$$

$$\cos\theta_A(-ctg\epsilon_{п} \cos\theta_B - \sin\theta_B) + \sin\theta_A[ctg\epsilon_{np} \cos\theta_B - \sin\theta_B(-\cos\theta_B + ctg\epsilon_{п} \sin\theta_B)] = 0.$$

Эта система двух уравнений с тремя неизвестными неопределенна, то есть существует множество сочетаний углов  $\theta_B$ ,  $\theta_A$  и  $\theta_A$ , при которых можно заточить плоскую поверхность  $A$ . Варианты частных установок приведены в табл. 3.3.3.

### 3.3.2. Продольные и поперечные углы инструмента

Затачиваемая плоская поверхность	Продольные углы	Поперечные углы
Передняя	$tg\gamma_{np} = tg\gamma \cos\varphi - tg\lambda \sin\varphi$	$tg\gamma_{п} = tg\gamma \sin\varphi + tg\lambda \cos\varphi$
Главная задняя	$ctg\alpha_{np} = ctg\alpha \cos\varphi - tg\lambda \sin\varphi$	$ctg\alpha_{п} = ctg\alpha \sin\varphi + tg\lambda \cos\varphi$
Вспомогательная задняя	$ctg\alpha_{np1} = ctg\alpha_1 \cos\varphi_1 + tg\lambda_1 \sin\varphi_1$	$ctg\alpha_{п} = ctg\alpha_1 \sin\varphi_1 - tg\lambda_1 \cos\varphi_1$

**П р и м е ч а н и е:** При плоской передней поверхности  $tg\lambda_1 = tg\gamma \sin(\varphi + \varphi_1) + tg\lambda \cos(\varphi + \varphi_1)$ , где  $\gamma$ ,  $\alpha$  — передний и задний углы в секущей плоскости;  $\lambda$  — угол наклона главной режущей кромки;  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  — углы в плане на главной и вспомогательной режущих кромках.

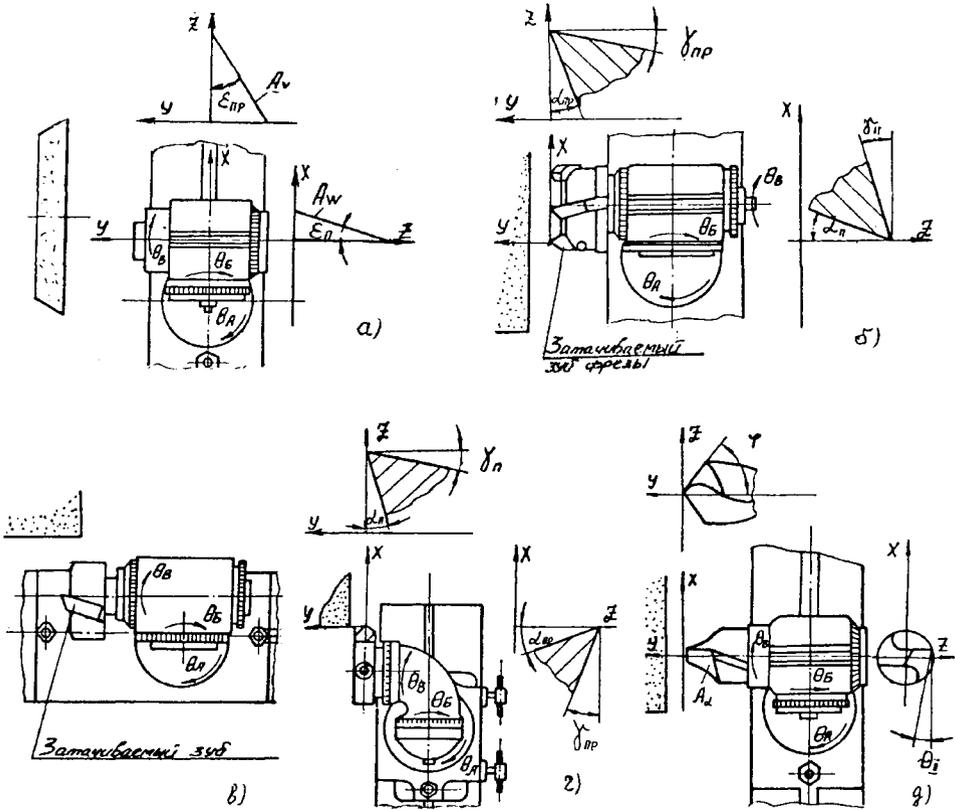


Рис. 3.3.25. Схемы затачивания инструментов по плоским поверхностям с помощью трехповоротных приспособлений

3.3.3. Углы установки приспособления при затачивании плоской поверхности торцом круга

$\theta_B$	$\theta_B$	$\theta_A$
$\theta_B = 0$	$\theta_B = \epsilon_{пп}$	$\text{tg}\theta_A = \text{ctg}\epsilon_{пп} \sin \epsilon_{пп}$
$\theta_B = \epsilon_{пп}$	$\theta_B = 0$	$\text{ctg}\theta_A = \text{ctg}\epsilon_{пп} \sin \epsilon_{пп}$
$\text{tg}\theta_B = -\text{ctg}\epsilon_{пп}$	$\text{ctg}\theta_B = \text{ctg}\epsilon_{пп} \sin \epsilon_{пп}$	$\theta_A = 0$

Затачивание плоской поверхности  $A$  может проводиться также периферией круга. В этом случае углы установки приспособления  $\theta_B, \theta_B$  и  $\theta_A$ , приводящие поверхность  $A$  в горизонтальное положение, параллельное плоскости  $xу$ , рассчитывают по формулам:

$$\operatorname{tg} \theta_B = -\operatorname{ctg} \varepsilon_{\Pi}; \operatorname{tg} \theta_B = -\operatorname{ctg} \varepsilon_{\Pi} \sin \varepsilon_{\Pi}.$$

Угол  $\theta_A$  можно выбирать произвольной величины. Начальное положение зуба торцовой фрезы при ее затачивании изображено на рис. 3.3.25, б. В этом случае углы  $\varepsilon_{\Pi}$  и  $\varepsilon_{\Pi}$  определяются по табл. 3.3.4.

Углы установки универсально-заточной головки при затачивании торцовой фрезы торцом круга, определенные в соответствии с табл. 3.3.4., приведены в табл. 3.3.5.

Углы установки универсально-заточной головки при затачивании передней плоской поверхности торцовой фрезы периферией круга, рассчитывают по формулам:  $\theta_A$  — произвольное значение;  $\theta_B = -\gamma_{\Pi}$ ;  $\operatorname{tg} \theta_B = -\operatorname{tg} \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}$ .

Если исходное положение фрезы будет соответствовать изображенному на рис. 3.3.25, а, то возможные варианты углов установки головки при затачивании передней плоской поверхности могут быть следующие:

1.  $\theta_B = 0$ ;  $\operatorname{tg} \theta_B = -\frac{\operatorname{tg} \gamma_{\Pi}}{\operatorname{tg} \gamma_{\Pi}}$ ;  $\operatorname{tg} \theta_A = \frac{\operatorname{tg} \gamma_{\Pi}}{\sin \theta_B}$ ;
2.  $\theta_B = 0$   $\theta_B = -\gamma_{\Pi}$ ;  $\operatorname{tg} \theta_A = -\operatorname{tg} \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}$ .

### 3.3.4. Углы при затачивании торцовой фрезы

Затачиваемая плоская поверхность	$\varepsilon_{\Pi}$	$\varepsilon_{\Pi}$
Главная задняя	$\alpha_{\Pi}$	$\alpha_{\Pi}$
Вспомогательная задняя	$\alpha_{\Pi 1}$	$-\alpha_{\Pi 1}$
Передняя	$90^\circ - \gamma_{\Pi}$	$90^\circ - \gamma_{\Pi}$

### 3.3.5. Углы установки головки при затачивании торцовой фрезы

Главная задняя плоская поверхность	Вспомогательная задняя плоская поверхность	Передняя плоская поверхность
$\theta_B = 0$ ; $\theta_B = \alpha_{\Pi}$ ; $\operatorname{tg} \theta_A = \operatorname{ctg} \alpha_{\Pi} \sin \alpha_{\Pi}$	$\theta_B = 0$ ; $\theta_B = \alpha_{\Pi 1}$ ; $\operatorname{tg} \theta_A = -\operatorname{ctg} \alpha_{\Pi 1} \sin \alpha_{\Pi 1}$	$\theta_B = 0$ ; $\theta_B = 90^\circ - \gamma_{\Pi}$ ; $\operatorname{tg} \theta_A = \operatorname{tg} \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}$
$\theta_B = 0$ ; $\theta_B = \alpha_{\Pi}$ ; $\operatorname{ctg} \theta_A = \operatorname{ctg} \alpha_{\Pi} \sin \alpha_{\Pi}$	$\theta_B = 0$ ; $\theta_B = \alpha_{\Pi 1}$ ; $\operatorname{ctg} \theta_A = -\operatorname{ctg} \alpha_{\Pi 1} \sin \alpha_{\Pi 1}$	$\theta_B = 0$ ; $\theta_B = 90^\circ - \gamma_{\Pi}$ ; $\operatorname{ctg} \theta_A = \operatorname{tg} \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}$
$\theta_A = 0$ ; $\operatorname{tg} \theta_B = -\operatorname{ctg} \alpha_{\Pi}$ ; $\operatorname{ctg} \theta_B = \operatorname{ctg} \alpha_{\Pi} \sin \alpha_{\Pi}$	$\theta_A = 0$ ; $\operatorname{tg} \theta_B = \operatorname{ctg} \alpha_{\Pi 1}$ ; $\operatorname{ctg} \theta_B = -\operatorname{ctg} \alpha_{\Pi 1} \sin \alpha_{\Pi 1}$	$\theta_A = 0$ ; $\theta_B = -\gamma_{\Pi}$ ; $\operatorname{ctg} \theta_B = \operatorname{tg} \gamma_{\Pi} \cos \gamma_{\Pi}$

Исходное положение проходного реза при его затачивании торцом круга с помощью трехповоротных тисков приведено на рис. 3.3.26, з. В этом случае углы  $\epsilon_{пр}$  и  $\epsilon_{п}$  определяют по табл. 3.3.6.

Углы установки элементов трехповоротных тисков при затачивании проходного реза торцом круга, определенные в соответствии с табл. 3.3.2, приведены в табл. 3.3.7.

При затачивании передней плоской поверхности реза периферией круга углы установки рассчитывают по формулам:

$\theta_A$  — произвольное значение;

$$\theta_B = -\gamma_{пр},$$

$$\text{tg}\theta_B = \text{tg}\gamma_{п} \cos\gamma_{пр}.$$

Исходное положение спирального сверла при двухплоскостном затачивании торцом круга приведено на рис. 3.3.26, д.

Для задней плоской поверхности  $A_\alpha$ , примыкающей к режущей кромке, угол  $\epsilon_{п} = -(90^\circ - \theta_{II})$ , а угол  $\epsilon_{пр} = -(90^\circ - \varphi)$ , где

$$\text{tg}\theta_{II} = \frac{\text{tg}\alpha \text{tg}\varphi}{\cos\mu} - \text{tg}\mu; \sin\mu = \frac{d}{D}; D — диаметр$$

сверла;  $d$  — диаметр сердцевины сверла;  $\alpha$  — задний угол на периферии при измерении в цилиндрическом сечении, концентричном оси сверла;  $\varphi$  — угол при вершине.

Для второй, затылочной плоской поверхности, когда линия пересечения задних плоских поверхностей одного зуба расположена параллельно режущей кромке,

$$\epsilon_{пр} = -(90^\circ - \varphi) \quad \text{и} \quad \epsilon_{п} = -(90^\circ - \theta), \quad \text{где}$$

$$\text{tg}\theta = 2 \text{ctg}\psi - \text{tg}\theta_{II}; \quad \psi — \text{угол наклона поперечной кромки.}$$

Если линия пересечения задних плоских поверхностей одного зуба расположена под углом  $\theta_{II}$  к режущей кромке, то угол  $\theta$  определяется по формуле

$$\text{ctg}(\theta - \theta_{II}) = \frac{\text{tg}(\psi + \theta_{II})}{2}.$$

Углы установки головки при затачивании задних плоских поверхностей спирального сверла торцом круга, определенные в соответствии с табл. 3.3.2, приведены в табл. 3.3.8.

**3.3.6. Углы при затачивании реза торцом круга**

Затачиваемая плоская поверхность	$\epsilon_{пр}$	$\epsilon_{п}$
Главная задняя	$\alpha_{п}$	$\alpha_{пр}$
Вспомогательная задняя	$-\alpha_{п1}$	$-\alpha_{пр1}$
Передняя	$90^\circ - \gamma_{п}$	$-(90^\circ - \gamma_{пр})$

**3.3.7. Углы установки тисков при затачивании проходного реза торцом круга**

Главная задняя плоская поверхность	Вспомогательная задняя плоская поверхность	Передняя плоская поверхность
$\theta_B = 0;$ $\theta_B = \alpha_{п};$ $\text{tg}\theta_A = -\text{ctg}\alpha_{пр} \sin\alpha_{п}$	$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -\alpha_{п1};$ $\text{tg}\theta_A = \text{ctg}\alpha_{п1} \sin\alpha_{п1}$	$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -\gamma_{п};$ $\text{tg}\theta_A = \text{tg}\gamma_{пр} \cos\gamma_{п}$
$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -\alpha_{пр};$ $\text{ctg}\theta_A = -\text{ctg}\alpha_{п} \sin\alpha_{пр}$	$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -\alpha_{пр1};$ $\text{ctg}\theta_A = \text{ctg}\alpha_{п1} \sin\alpha_{пр1}$	$\theta_B = 0;$ $\text{tg}\theta_B = -\frac{\text{tg}\gamma_{п};}{\text{tg}\gamma_{пр}};$ $\text{ctg}\theta_A = -\text{ctg}\gamma_{п} \sin\theta_B$
$\theta_A = 0;$ $\theta_B = 90^\circ - \alpha_{пр};$ $\text{ctg}\theta_A = -\text{ctg}\alpha_{п} \sin\alpha_{пр}$	$\theta_A = 0;$ $\theta_B = 90^\circ - \alpha_{пр1};$ $\text{ctg}\theta_B = \text{ctg}\alpha_{п1} \sin\alpha_{пр1}$	$\theta_A = 0;$ $\text{tg}\theta_B = \frac{\text{tg}\gamma_{пр};}{\text{tg}\gamma_{п}};$ $\text{ctg}\theta_B = \text{ctg}\gamma_{п} \cos\theta_B$

## 3.3.8. Углы установки головки при затачивании торцом круга спирального сверла

Плоская поверхность, примыкающая к режущей кромке	Вторая затылочная плоская поверхность
$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -(90^\circ - \varphi);$ $\operatorname{tg} \theta_A = \operatorname{tg} \theta_{II} \cos \varphi$	$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -(90^\circ - \varphi);$ $\operatorname{tg} \theta_A = \operatorname{tg} \theta \cos \varphi$
$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -(90^\circ - \theta_{II});$ $\operatorname{ctg} \theta_A = \operatorname{tg} \varphi \cos \theta_{II}$	$\theta_B = 0;$ $\theta_B = -(90^\circ - \theta);$ $\operatorname{ctg} \theta_A = \operatorname{tg} \varphi \cos \theta$
$\theta_A = 0;$ $\operatorname{tg} \theta_B = \operatorname{tg} \theta_{II}; \theta_B = \theta_{II};$ $\operatorname{ctg} \theta_B = \operatorname{tg} \varphi \cos \theta_{II}$	$\theta_A = 0;$ $\theta_B = \theta;$ $\operatorname{ctg} \theta_B = \operatorname{tg} \varphi \cos \theta$

С целью повышения производительности сверла можно затачивать одновременно двумя кругами на специальных станках или приспособлениях. На рис. 3.3.26, *a* показана схема затачивания сверл по плоским поверхностям двумя коническими поверхностями кругов, установленных на одной оси, на рис. 3.3.26, *б* — двумя цилиндрическими поверхностями кругов, на рис. 3.3.26, *в* — торцами двух кругов.

Плоские поверхности на режущей части инструмента могут занимать частные положения. Так, для инструментов с прямыми зубьями продольный передний угол будет равен нулю, а продольный задний угол  $\alpha_{пр} = 90^\circ$ . В этом случае, затачивая переднюю плоскую поверхность, инструмент при его установке необходимо повернуть вокруг своей оси на передний угол  $\gamma_n$ , измеренный в сечении, перпендикулярном оси (рис. 3.3.27, *a*). Расстояние между торцом круга и осью затачиваемого инструмента  $h = R \sin \gamma_n$  ( $R$  — радиус инструмента). Аналогично торцом круга затачивается задняя плоская поверхность (рис. 3.3.27, *б*). Заднюю поверхность прямоугольного инструмента можно затачивать по круглой цилиндрической поверхности (рис. 3.3.27, *в*). При затачивании ось круга располагается выше оси фрезы и смещается на величину  $H = R_x \sin \alpha$ , где  $R_x$  — радиус круга;  $\alpha$  — задний угол в торцовом сечении.

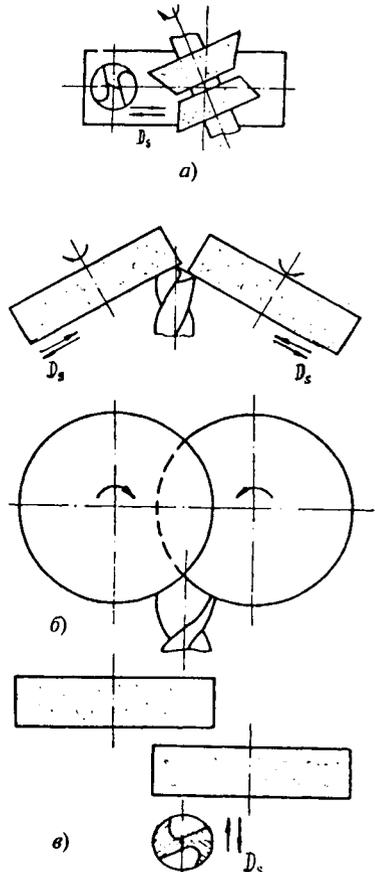


Рис. 3.3.26. Схемы затачивания сверл двумя кругами

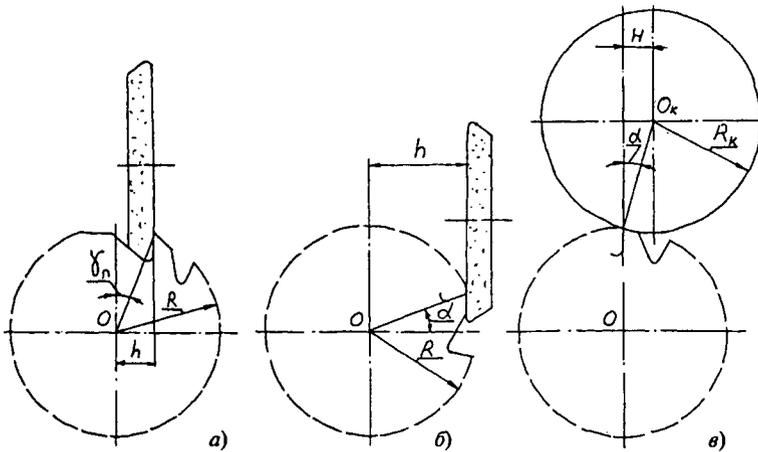


Рис. 3.3.27. Схемы затачивания инструментов с прямыми зубьями

При затачивании инструмента торцом круга необходимо развернуть ось шпинделя станка (шлифовальную головку) на  $1...1,5^\circ$  относительно начального положения, чем обеспечивается работа одной стороной круга, уменьшается поверхность соприкосновения круга с затачиваемым зубом, устраняется завал по задней поверхности и пучок искр направляется от рабочего. Затачиваемый зуб фиксируется упором. Вместо упора применяют также делительную головку, что обеспечивает более высокую точность шага зубьев.

С целью уменьшения зоны соприкосновения круга и затачиваемого инструмента, облегчения процесса удаления стружки, устранения возможности местного перегрева, на торце круга выполняют коническую выточку или торец закругляют. Один и тот же инструмент можно затачивать по различным поверхностям, включающим его режущую кромку. Так, например, спиральные сверла наряду с затачиванием по плоским поверхностям можно затачивать по коническим поверхностям (рис. 3.3.28). Различные значения геометрических параметров режущей части сверла создаются изменением взаимного расположения конической поверхности и сверла, которое характеризуется величинами  $k$  и  $l$ . Величины  $k$  и  $l$  определяются из отношений:

$$k = Cl + \frac{C}{2} D + d; \quad k = Bl,$$

где  $C = \sin \theta_N / \sin \varphi \sqrt{\operatorname{ctg} 2\rho - \sin^2 \theta_N}$ ;

$$\operatorname{tg} \theta_N = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi - \sin \mu \cos \varphi / \cos \mu;$$

$$\sin \mu = d / D;$$

$d$  — диаметр сердцевины сверла;  $D$  — диаметр сверла;

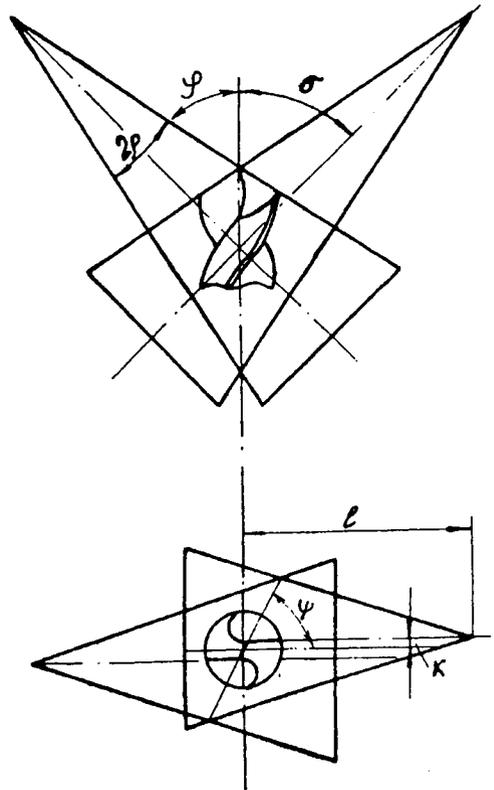


Рис. 3.3.28. Схема затачивания сверла по коническим поверхностям

$$B = \frac{C_2 C_1 \operatorname{ctg} \psi}{\sqrt{1 + C_2 \operatorname{ctg} \psi}};$$

$$C_1 = \frac{\sin 2\rho}{2 \cos(\varphi - \rho) \sin \varphi}$$

$$C_2 = 1 - \left[ \frac{\sin(\varphi - \rho)}{\cos \rho} \right]^2;$$

$\psi$  — угол наклона поперечной кромки;  $\alpha$  — задний угол на периферии сверла.

Угол при вершине сверла  $\varphi = \sigma + \rho$ . По коническим поверхностям затачивают также зуборезные долбяки (рис. 3.3.29), протяжки (рис. 3.3.30) и другие инструменты. При затачивании долбяка диаметр шлифовального круга

$$D_k \leq d / \sin \gamma_B,$$

где  $d$  — минимальный диаметр окружности затачиваемой зоны долбяка;  $\gamma_B$  — передний угол при вершине.

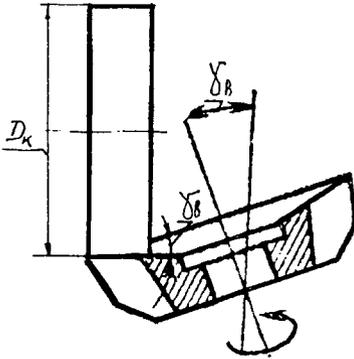


Рис. 3.3.29. Схема затачивания зуборезного долбяка

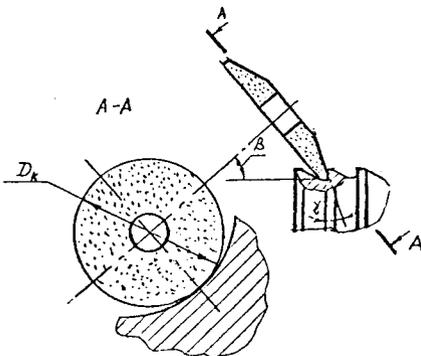


Рис. 3.3.30. Схема затачивания протяжки

При затачивании протяжки диаметр круга

$$D_k \leq 0,85 D_1 \frac{\sin(\beta - \gamma)}{\sin \gamma},$$

где  $D_1$  — диаметр первого зуба протяжки;  $\gamma$  — передний угол;  $\beta$  — угол между осями круга и протяжки.

Такие инструменты как сверла, зенкеры, метчики с винтовыми канавками, фрезы с винтовыми зубьями, червячные фрезы затачивают по винтовой поверхности. В процессе затачивания по винтовой поверхности инструмент должен совершать относительно шлифовального круга винтовое движение, параметр которого равен параметру затачиваемой поверхности. При небольшом шаге  $P$  затачиваемой винтовой поверхности винтовое движение может создаваться с помощью кулачка. Этот принцип осуществлен на ряде станков и приспособлений для затачивания осевых инструментов. Создающиеся в этом случае задние углы  $\alpha$  при их изменении в цилиндрическом сечении, концентричном оси инструмента, определяются по соотношению:

$$\operatorname{tg} \alpha = P / (2\pi R_x),$$

где  $R_x$  — радиус рассматриваемой точки режущей кромки;  $P$  — шаг винтовой задней поверхности.

Затачивание по передней винтовой поверхности таких сложных и точных инструментов как червячные фрезы выполняют на специализированных полуавтоматах или на универсально-заточных станках, оснащенных специальными приспособлениями, на которых винтовое движение создается с помощью синусной линейки или зубчатой рейки, расположенной параллельно оси фрезы, и сопряженного с ней зубчатого колеса. Последнее через систему зубчатых колес связано с оправкой изделия. Передаточное отношение сменных передач этой цепи

$$\frac{a c}{b d} = \frac{P_{zo}}{u \pi m z},$$

где  $P_{zo}$  — шаг винтовой канавки;  $m$  — модуль реечной шестерни;  $z$  — число зубьев реечной шестерни;  $u$  — передаточное отношение постоянных зубчатых передач рассматриваемой цепи.

При использовании синусной линейки, по направляющим которой движутся ролики, связанные с рейкой, угол поворота синусной линейки

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{пов}} = \frac{\pi z m u}{P_{zo}},$$

где  $m$ ,  $z$  — соответственно модуль и число зубьев реечной шестерни;  $u$  — передаточное отношение передач, связывающих шпиндель изделия с реечной шестерней.

Роль рейки может выполнять червяк с сопряженным с ним червячным колесом.

Затачивание осуществляют конической стороной шлифовального круга с углом профиля, превышающим  $15^\circ$ . Такой профиль круга дает практически удовлетворительные результаты при затачивании червячных фрез с углом наклона винтовой канавки меньшим  $5...7^\circ$ . При больших углах наклона канавок конический круг не придает прямолинейного профиля передней поверхности и затачивание необходимо вести кругом с криволинейным профилем. При окончании затачивания проводится контроль инструмента с помощью специальных приборов, либо универсальными средствами. Качество поверхностного слоя заточенного быстрорежущего инструмента определяется отсутствием прижогов, завалов, заусенцев, выявляемых визуально, методами металлографического и рентгеноструктурного анализа, выполнения контроля микротвердости. Отсутствие трещин у заточенного твердосплавного инструмента определяется методом цветной дефектоскопии. Контроль геометрических параметров проводится с помощью всевозможных угломеров, проверка биения режущих кромок выполняется в центрах индикатором.

### 3.3.6. АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

**Абразивный инструмент** — это режущий инструмент, изготовленный из синтетических или природных абразивных материалов высокой твердости. Инструмент применяют для абразивной обработки других менее твердых материалов, осуществляемой в результате резания поверхности обрабатываемого материала множеством зерен абразивного материала, из которого изготовлен инструмент.

Все данные о конкретном инструменте закодированы в виде условных обозначений в его характеристике. *Характеристика абразивного инструмента включает следующие основные элементы:*

- типоразмер инструмента;
- вид, марку и зернистость абразивного материала;
- степень твердости инструмента;
- номер структуры инструмента;
- вид и марку связки;
- рабочую скорость применения инструмента;
- класс точности.

Кроме этого, в характеристике могут указываться:

- звуковой индекс инструмента;
- основной размер и процентное содержание пор в высокопористых кругах;
- вид пропитки инструмента.

Характеристика инструмента в виде условных обозначений используется для маркировки инструмента и в различных видах нормативно-технической документации.

Абразивный инструмент применяют для обработки практически всех известных материалов (сталь, чугун, цветные металлы, дерево, стекло, пластмасса, резина и др.), которая ведется на различных видах оборудования в широком диапазоне скоростей резания и других параметров процесса.

В зависимости от типа оборудования, требуемой степени точности и шероховатости поверхности виды абразивной обработки подразделяются на следующие: шлифование, доводку, полирование, отрезку, отделочную обработку. Для этих целей применяют абразивный инструмент различных типов и конструкций.

#### **Типы абразивного инструмента:**

- шлифовальные круги, в том числе шлифовальные головки, отрезные круги;
- шлифовальные сегменты, являющиеся частью сборного или составного шлифовального круга;
- абразивные бруски;
- абразивные шеверы;
- абразивные галтовочные тела;
- абразивный инструмент на гибкой основе с нанесенным на нее слоем или несколькими слоями шлифовального материала, закрепленного связкой (шлифовальная шкурка и изделия из нее);
- абразивные пасты;
- полировальные круги.

Наиболее широко в технологии машиностроения применяются шлифовальные круги общего применения из электрокорунда и карбида кремния, типы и размеры которых определены ГОСТ 2424 и в частности обозначения полностью соответствуют международному стандарту ИСО 525—86.

#### *Основные типы абразивного инструмента:*

- тип 1 (ранее применяемое обозначение ПП) — круги прямого профиля;
- тип 2 (К) — кольцевые круги;
- тип 3 (ЗП) — круги с коническими профилем;
- тип 4 (2П) — круги с двусторонним коническим профилем;
- тип 5 (ПВ) — круги с односторонней выточкой;
- тип 6 (ЧК) — чашечные конические круги;

тип 7 (ПВД) — круги с двусторонней выточкой;

тип 10 (С) — круги с двусторонней выточкой и втулкой;

тип 11 (ЧЦ) — круги чашечные цилиндрические;

типы 12 и 14 (Т) — тарельчатые круги;

тип 23 (ПВК) — круги с конической выточкой;

тип 26 (ПВДК) — круги с двусторонней конической выточкой;

тип 36 (ПН) — круги с запрессованными крепежными элементами.

*Основные размеры шлифовальных кругов:*

наружный диаметр  $D = 3...1060$  мм;

высота  $T = 1...250$  мм;

диаметр посадочного отверстия  $1...305$  мм.

Кроме типоразмеров кругов широкого применения, промышленность выпускает большую номенклатуру специальных абразивных кругов, к которым относят угловые и фасонные круги, комплект кругов для шлифования шеек распределительных и коленчатых валов и др.

Типы и размеры шлифовальных головок из электрокорунда и карбида кремния также соответствуют международным стандартам и обозначаются: *AW* (ранее применяемое обозначение ГЦ) — головки цилиндрические, *DW* (ГУ) — угловые, *EW* (ГК) — конические, *F-1W* (ГСв) — сводчатые, *KW* (ГКЗ) — конические с закругленной вершиной, *F-2W* (ГШ) — головки шаровые, *FW* — головки шаровые с цилиндрической боковой поверхностью.

*Основные размеры шлифовальных головок:*

наружный диаметр  $D = 3...40$  мм;

высота  $H = 6...60$  мм;

диаметр посадочного отверстия  $d = 1...13$  мм.

Типы и размеры шлифовальных кругов из эльбора регламентированы ГОСТ 17123 и ГОСТ 24106. Круги состоят из корпуса и режущего (рабочего) эльборсодержащего слоя.

Исключение составляют малогабаритные круги прямого профиля типа А8 с наружным диаметром  $1...22$  мм, выполненные полностью из эльборсодержащей массы. Режущий слой, как правило, расположен на наружных участках поверхности инструмента и в зависимости от конструкции инструмента имеет разную высоту, толщину или ширину.

*К основным типоразмерам шлифовальных кругов из эльбора относятся:*

круги шлифовальные плоские прямого профиля условно обозначаемые 1A1 (наружный диаметр  $D = 125...500$  мм, посадочное отверстие  $d = 6...305$  мм); круги пря-

мого профиля без корпуса — А8 ( $D = 1...22$  мм,  $d = 0,5...8$  мм);

круги плоские с выточкой — 6A2 ( $D = 75...250$  мм,  $d = 20...76$  мм);

круги плоские с двусторонней выточкой — 9A3 ( $D = 100...250$  мм,  $d = 32...76$  мм);

круги чашечные конические — 11A2 ( $D = 75...150$  мм,  $d = 20...32$  мм);

круги чашечные конические — 12V5-45° ( $D = 125...150$  мм,  $d = 32$  мм);

круги тарельчатые — 12A2-20° ( $D = 50...200$  мм,  $d = 10...51$  мм);

круги тарельчатые — 12R4 ( $D = 75...200$  мм,  $d = 20...32$  мм);

круги тарельчатые 12V5-20° ( $D = 50...125$  мм,  $d = 16...32$  мм);

круги тарельчатые — 12R9 ( $D = 100...150$  мм,  $d = 20...32$  мм);

круги тарельчатые — 12V9 ( $D = 220...275$  мм,  $d = 40...90$  мм);

круги плоские с двусторонним коническим профилем 1D1 ( $D = 60...500$  мм,  $d = 13...305$  мм) и 1E6Q ( $D = 75...500$  мм,  $d = 20...305$  мм);

круги плоские с односторонним коническим профилем 1V1 ( $D = 100...250$  мм,  $d = 32...76$  мм);

круги плоские с полукругловыпуклым профилем 1FX ( $D = 35...135$  мм,  $d = 10...32$  мм);

Отрезные круги из электрокорунда и карбида кремния (ГОСТ 21963) изготавливаются с упрочняющим элементом (У) и без упрочнения с наружным диаметром  $D = 100...1500$  мм.

*Сегменты шлифовальные* (ГОСТ 2464) используют в составных шлифовальных кругах; они могут быть следующих типов:

СП — прямоугольные;

1С — выпукло-вогнутые;

2С — вогнуто-выпуклые;

3С — выпукло-плоские;

4С — плоско-выпуклые;

5С — трапецевидные;

группа специальных сегментов с условным обозначением от 6С до 10С.

*Абразивные бруски* — инструмент в виде твердого тела для обработки без вращения вокруг своей оси. Бруски согласно ГОСТ 2456 изготавливают на керамической и бакелитовой связках следующих типов: БК<sub>в</sub> — квадратные, БП — прямоугольные, БТ — треугольные, БК<sub>р</sub> — круглые, БП<sub>кр</sub> — полукруглые.

Для окончательной обработки стальных закаленных цилиндрических зубчатых колес с некорректированным профилем применяют абразивные шеверы, которые представляют собой абразивный инструмент в виде твердого тела, имеющего форму зубчатого колеса и изготовленного методом литья.

*Шкурка абразивная тканевая* (ГОСТ 5009) выпускается двух типов:

1 — для машинной обработки неметаллических материалов, металлов и сплавов низкой твердости и для ручной обработки различных материалов;

2 — для машинной и ручной обработки твердых и прочно-вязких материалов.

Для изготовления шлифовальной шкурки в качестве основы применяют хлопчатобумажные ткани, имеющие соответствующее условное обозначение по ГОСТ 3357: ЛОГ — саржа легкая гладкая; Л1 — саржа легкая № 1 суровая; Л2Г — саржа легкая № 2 гладкая; С2 — саржа средняя № 2 суровая и т.д.

Шлифовальный материал связывается с основой мездровым клеем (М), комбинированной связкой (К) или другими связующими. Шкурка выпускается в рулонах шириной 725; 740; 770; 800 и 830 мм и длиной 30 и 50 м. В зависимости от дефектов на поверхности шкурки она маркируется классом А, Б и В.

Пример условного обозначения тканевой шлифовальной шкурки типа 2, шириной 830 мм, длиной 50 м, на сарже средней № 2 суровой, из белого электрокорунда марки 24А, зернистостью 40-Н, на мездровом клее, класса А:

*2 830 × 50 С2 24А 40-Н М А ГОСТ 5009—82.*

Шкурку шлифовальную тканевую водостойкую (ГОСТ 13344) также выпускают двух типов; она может быть однослойной (О) и двухслойной (Д). Шкурку поставляют в рулонах. В качестве основы применяют саржу утяжеленную № 1 и № 2 гладкокрашенную (условное обозначение У1Г; У2Г), среднюю № 1 и № 2 гладкокрашенную (С1Г; С2Г), саржу специальную прочную (СП) и полудвунитку гладкокрашенную (П). В качестве связующего используются фенолоформальдегидные смолы СФЖ-3038 и СФЖ-3039 и лак ЯН-153.

Пример условного обозначения водостойкой тканевой двухслойной шлифовальной шкурки типа 2 в рулоне:

*Д2 820 × 20 У1Г 63С 40-Н СФЖ А  
ГОСТ 13344—79.*

*Шкурка шлифовальная бумажная* (ГОСТ 6456) выпускается двух типов:

1 — для машинной и ручной обработки неметаллических материалов (дерева, кожи, резины, пластмассы и т.п.);

2 — для машинной и ручной обработки металлов, сплавов.

Шлифовальная шкурка выпускается в рулонах со следующими видами рабочего слоя: С — сплошной, Р — рельефный. В качестве основы применяют бумагу по ГОСТ 18277 с условным обозначением П1, П2, ..., П11.

Пример условного обозначения бумажной шлифовальной шкурки типа 1, со сплошным рабочим слоем С, шириной 1000 мм, длиной 50 м, на бумаге П1, из нормального электрокорунда марки 15А, зернистости 25-Н, на мездровом клее, класса А:

*1С 1000 × 50 П2 15А 25-Н М А ГОСТ 6456—82.*

*Шкурка шлифовальная бумажная водостойкая* (ГОСТ 10054) предназначена для абразивной обработки различных материалов с применением и без применения СОЖ. Выпускается в рулонах и листах. В качестве основы применяется влагопрочная бумага (условное обозначение М) и влагопрочная с полимерным латексным покрытием (Л1; Л2). Шлифматериал связывается с основой лаками марок ЯН-153, ПФ-587 и другими водостойкими связками.

Пример условного обозначения водостойкой шлифовальной шкурки в рулоне шириной 750 мм, длиной 50 м, на влагопрочной бумаге:

*750 × 50 М 64С 16-П ЯН А ГОСТ 10054—82.*

То же для шлифовального листа шириной 230 мм, длиной 280 мм:

*Л 230 × 280 М 64С 16-П ЯН А  
ГОСТ 10054—82.*

К изделиям из шлифовальной шкурки относятся: бесконечные (склеенные) шлифовальные ленты, шлифовальные ленты-бобины, конуса, кольца, диски, лепестковые круги.

Бесконечные шлифовальные ленты (ЛБ) выпускают двух исполнений:

1 — шириной, равной или менее ширины рулонной шлифовальной шкурки, со швом под углом  $\alpha = 45...65^\circ$ ;

2 — шириной более ширины рулонной шлифовальной шкурки со швом или швами под углом  $\alpha = 5...65^\circ$ .

Пример условного обозначения бесконечной шлифовальной ленты исполнения 1, шириной В=100 мм, длиной L=3500 мм, из электрокорунда 15А, зернистости 25-Н, на

сарже утяжеленной № 2 гладкокрашенной, класса Б:

*ЛБ1 100×3600 15А 25-Н У2Г Б*  
*ГОСТ 12439—79.*

Шлифовальные бобины изготовляют трех типов: Б — для ручной обработки, БМ — для машинной, БМП — для машинной обработки с прорезями.

Конусы (К) и трубки (Т) шлифовальные используют на ручных машинах для зачистки и исправления других дефектов; представляют собой заготовку из шлифовальной шкурки, склеенную внахлест или встык и подклеенную внутри тканью для придания необходимой жесткости. ГОСТ 22774 предусматривает конусы двух типов: К — полные, КУ — усеченные. Этим же стандартом регламентированы размеры конусов и трубок.

Из шлифовальной шкурки производят диски: Д — сплошные, ДО — с отверстиями, ДП — с прорезями. Согласно ГОСТ 22773, диски типа Д и ДО имеют наружный диаметр 80...340 мм, внутренний — 8...40 мм. Диски типа ДП должны изготавливаться с наружным диаметром 100, 125, 140, 150, 160 и 170 мм и иметь 16 равномерно расположенных по окружности прорезей глубиной 20 мм.

Лепестковые шлифовальные круги, состоящие из радиально расположенных и жестко закрепленных одной из торцовых сторон листов шлифовальной шкурки, согласно ГОСТ 22775 выпускаются двух типов: КЛ — без оправки (диаметром 120...500 мм и высотой 25...140 мм), КЛО — с оправкой (диаметром 40...140 мм и высотой 10...40 мм).

Для предварительного и окончательного полирования изделий сложного профиля из стали, меди, мельхиора и других материалов применяют полировальные круги из хлопчатобумажных и сизалевых тканей, а также сизалевого корда. Круги выпускают следующих типов:

свободноскладчатые 1С, 2, 3С и 4С диаметром 70...600 мм, высотой 10...20 мм;  
кордовые круги 1К, 2К, 3К и 4К диаметром 75...110 мм, состоящие из набора сизалевого корда, закрепленного в ступицу.

**Абразивные материалы** характеризуются комплексом физико-механических свойств, которые зависят от их химического и минералогического состава, а также кристаллического строения. Абразивные материалы разделяются на два класса: природные и синтетические. К природным материалам, имеющим промышленное значение, относят корунд, наждак, кремьен, гранат, техническое стекло.

Природные материалы применяют в ограниченном количестве, как правило, в виде зерна для свободного шлифования, изготовления шлифовальной шкурки.

Синтетические абразивные материалы, к которым относятся электрокорунд, карбид кремния, карбид бора и материалы на основе кубического нитрида бора, обладая большей стабильностью физико-механических свойств, чем природные, резко ограничили применение последних, а в ряде случаев вытеснили их.

*Электрокорунд* — синтетический абразивный материал, получаемый из высокоглиноземистого сырья в процессе его плавки в электрических печах. В зависимости от исходного сырья (боксит, глинозем), легирующих добавок, которые вводятся в процессе плавки для придания корунду специальных физико-механических свойств, а также способов плавки в электрических печах, промышленность выпускает ряд видов и марок электрокорундов:

белый (марок 25А, 24А и 23А);  
нормальный (марок 18А, 15А, 14А и 13А);  
хромистый (марок 34А и 33А);  
хромотитанистый на основе белого электрокорунда (марок 92А и 91А) и на основе нормального (марок 94А и 93А);  
магниево-кремниевый электрокорунд (марки 96А);  
циркониевый (марки 38А6);  
монокорунд (марок 45А, 44А и 43А).

По химическому составу электрокорунды состоят в основном из окиси алюминия в виде ее кристаллической  $\alpha$ -модификации (минерал корунд). Взаимоплотная упаковка ионов кислорода и алюминия обеспечивает значительную прочность корунда и связанные с этим высокие значения твердости, механической прочности и температуры плавления. Содержание корунда в зависимости от марки материала составляет в белом электрокорунде 96...99%, нормальном 93...96%, легированном 91...98%. В циркониевом корунде содержание  $\alpha$ - $Al_2O_3$  может быть в пределах 60...75%; 40...25% составляет двуокись циркония.

*Карбид кремния* — синтетический абразивный материал; изготовляют термическим путем из кварцевого и углеродистого сырья; состоит в основном из кристаллов гексагонального карбида кремния, содержание которого колеблется в различных марках материала в пределах 97,5...99%. Промышленность производит карбид кремния:

зеленый (марки 64С и 63С);  
черный (марки 55С, 54С и 53С).

Абразивный материал из карбида бора изготовляют термическим путем из борсодержащего и углеродистого сырья. Содержание  $B_4C$  в материале составляет 85...90%.

*Кубический нитрид бора* — синтетический сверхтвердый материал, получаемый из гексагональной модификации нитрида бора в результате воздействия на него высоких давлений и температур. Отечественной промышленностью материал выпускается под торговой маркой «эльбор», который в зависимости от физико-механических свойств материала разделяется на марки:

ЛО — обычной прочности;

ЛП — повышенной механической прочности;

ЛКВ — высокопрочный.

Содержание кубического нитрида бора в различных марках эльбора колеблется от 90 до 96%; как абразивный материал эльбор широко применяют для изготовления шлифовальных кругов различных типов.

Способы производства различных абразивных материалов определяют их химический и минералогический состав, кристаллическое строение и форму зерен материалов, что связано с физико-механическими и эксплуатационными свойствами абразивных инструментов и областями их применения.

К важнейшим физико-механическим характеристикам материалов относится их твердость. Для ее оценки использовалась методика определения микротвердости, основанная на принципе вдавливания алмазной пирамиды Виккерса в поверхность шлифа зерна проверяемого материала при постоянной нагрузке на приборе ПМТ-3. Этим же методом микроиндентирования измерялась микропрочность материалов.

Микротвердость, измеренная при нагрузке 1,96 Н, указанных ниже материалов, находится в следующих пределах, ГПа: алмазы синтетические и природные (для сравнения) 51,9...98,4; эльбор 75,8...98,1; карбид бора 39,2...44,2; карбид кремния 32,4...35,3; электрокорунд 18,9...23,5; природный корунд 17,7...23,5; кремнь 9,8...14,7; гранат 13,7...16,7 и техническое стекло 3,9...8,8.

Микропрочность, измеренная при нагрузке 0,98 Н, составила, ГПа: электрокорунд 1,91...3,18; монокорунд 3,33; карбид бора 2,25; карбид кремния 2,45...2,7.

Механическая прочность различных марок эльбора, измеренная по методике, предусматривающей раздавливание единичных зерен, составляет для эльбора марки ЛО зерни-

стостью 20 не менее 3,0 Н; марки ЛП — не менее 6,1 Н; ЛКВ — не менее 7,1 Н.

Абразивная способность материалов, определяемая на приборах АСЗ-4 или «шлиф» как масса сошлифованного материала определенным количеством абразивных зерен, расположенных между двумя вращающимися в разных направлениях дисками, с которых сошлифовывается материал. В качестве стандартного материала для дисков применяется стекло, так как металлические материалы не дают стабильных и сопоставимых материалов. Относительная абразивная способность (получена расчетом через массу сошлифованного материала в граммах) основных природных и синтетических абразивных материалов составляет, %: природные алмазы — 100; синтетические алмазы в зависимости от марки — 20...52,4; эльбор ЛО — 19...25,4; карбид бора — 20,0...22,4; карбид кремния зеленого — 16,7...21,1; электрокорунд — 10,2...12,7; природный корунд — 8,9...16,1; наждак — 8,4...9,4; гранат — 7,0...8,5. Как видно из этих данных, относительная абразивная способность зависит от твердости материалов.

Эксплуатационные свойства материала в абразивном инструменте также зависят от его химической инертности к обрабатываемому материалу и его термостойкости.

Степень химического взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым, определенная по специальной методике, показывает, что электрокорунды различных видов не взаимодействуют с железоуглеродистыми сплавами, чугунами, металлокерамикой и имеют высокую степень взаимодействия с титаном и его сплавами; карбид кремния соответственно высокую степень взаимодействия с железоуглеродистыми сплавами, низкую — с чугунами и металлокерамикой, среднюю — с титаном и его сплавами. Эльбор имеет очень низкую степень взаимодействия с железоуглеродистыми сплавами и титаном и не взаимодействует с чугунами и металлокерамикой. Это необходимо учитывать при выборе области применения конкретного вида инструмента из него, так же как и термостойкость материала, которая колеблется в пределах 700...800 °С у алмаза и карбида бора, до 1700...1900 °С у электрокорундовых материалов.

В табл. 3.3.9 приведены основные физико-механические свойства абразивных материалов и некоторых инструментальных мате-

### 3.3.9. Физико-механические характеристики абразивных материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Микротвердость Н, ГПа	Модуль упругости E, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа	Теплопроводность при t = 0°C, Вт/(м · °C)	Удельная теплоемкость, (Дж/кг · °C)	Температурный коэффициент 10 <sup>6</sup> , 1/°C	Предел прочности на изгибе, МПа	Температурный предел устойчивости, °C
Алмаз	(3,48...3,56) · 10 <sup>3</sup>	100,0	9000,0	20,0 *	147	504	0,9—1,45	2,1—4,9	700—800
Эльбор	(3,45...3,47) · 10 <sup>3</sup>	90,0	7200,0	5,0 *	42	672	2,5—4,7	—	1300—1500
Карбид бора	(2,48...2,52) · 10 <sup>3</sup>	37,0—43,0	2960,0	18,0	10,5	—	4,5	2,1—2,8	700—800
Карбид кремния	(3,12...3,20) · 10 <sup>3</sup>	30,0—33,0	3650,0	15,0	15,5	588	6,5	0,5—1,5	1300—1400
Электрокорунд	(2,00...2,10) · 10 <sup>3</sup>	20,0—24,0	—	7,6	19,7	756	7,5	0,8—0,9	1700—1900

\* Зависит от марки алмаза и эльбора и размера кристалла.

**Шлифовальные материалы.** Для производства инструмента абразивные материалы дробят, измельчают и классифицируют, получая шлифовальные материалы определенного размера и формы.

Шлифовальные материалы из электрокорунда, карбида кремния и бора, природных абразивных материалов (согласно ГОСТ 3647) подразделяют на группы и зернистости:

- шлифовальное зерно (шлифзерно) 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16;
- шлифовальные порошки (шлифпорошки) 12, 10, 8, 6, 5, 4;
- микropорошки М63, М50, М40, М28, М20, М14;
- тонкие микropорошки М10, М7, М5;
- особо тонкие микropорошки М3, М2, М1.

Зернистость абразивного инструмента является одной из его важнейших характеристик. Цифровое обозначение зернистости означает: 200 — соответствует размеру зерен основной фракции 2500...2000 мкм, 160 соответственно 2000...1600 мкм и т.д.; М63 соответствует размеру основной фракции 63...50 мкм; М50 соответственно 50...40 мкм и т.д.

*Для эльбора разделение по группам и обозначение по зернистости при ситовом методе контроля:*

- шлифзерно Л20 и Л16;
  - шлифпорошки Л12, Л10, Л8, Л6, Л5, Л4;
  - микropорошки ЛМ63, ЛМ50, ЛМ40, ЛМ28, ЛМ20, ЛМ14;
  - тонкие микрошлифпорошки ЛМ10, ЛМ7, ЛМ5, ЛМ3;
  - особо тонкие микрошлифпорошки ЛМ1.
- Цифровое обозначение зернистости, аналогичное абразивным материалам:
- Л20 — зерновой состав основной фракции 250...200 мкм;
  - Л16 — 200...160 мкм и т.д.;
  - ЛМ63 — зерновой состав основной фракции 60...40 мкм;
  - ЛМ50 — 40...28 мкм;
  - ЛМ1 — мельче 1 мкм.

**Связки.** В качестве связок, применяемых для закрепления зерен в абразивном инструменте, могут применяться:

- неорганические вещества (керамические, магнезиальные, силикатные, металлические);
- органические вещества природные (шеллаковые связки) и синтетические (бакелитовые, вулканитовые, эпоксидные, глифталиевые связки);
- комбинации органических и неорганических веществ (металлоорганические, металлокерамические и другие виды).

Основными видами связок для производства шлифовальных кругов являются керамические (К), бакелитовые (Б) и вулканитовые.

**Керамические связки** характеризуются высокой теплостойкостью, прочностью, хрупкостью, жесткостью и химической стойкостью, что обуславливает их использование для большинства типов кругов на операциях шлифования, где требуется повышенная стойкость режущих кромок инструмента и высокая стойкостная наработка абразивного инструмента. Для производства керамических связок используют глину, полевошпатовые материалы, стекло и т.п.

**Связки бакелитовые** имеют высокую прочность и низкую теплостойкость. Основу связки составляет бакелит в виде порошка (смесь новолачной смолы с уротропином) или жидкости (жидкая резональная смола). Бакелитовые связки применяют для изготовления инструмента, имеющего высокую самозатачиваемость (обдирочные, отрезные круги).

**Вулканитовая связка** — это вид резины (провулканизированная смесь каучука с серой и другими наполнителями). Инструмент на вулканитовой связке, обладая повышенной эластичностью, в процессе шлифования деформируется, что снижает интенсивность его самозатачивания и повышает полирующий эффект.

Комбинируя виды и количество компонентов связки, можно добиться получения, во-первых, весьма эластичной или, во-вторых, достаточно жесткой системы, что и определяет области применения инструмента: в первом случае — для полирования и отделочных операций, во втором — для резки и глубинного шлифования.

В производстве инструмента из эльбора марки ЛКВ применяют металлические связки, в состав которых входят порошки меди, олова, железа, титана, ванадия и других металлов. Базовое условное обозначение металлической связки — М.

**Твердость абразивного инструмента.** В практику производства и применения абразивного инструмента термин «твердость» введен как комплексный показатель, характеризующий свойство абразивного инструмента сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой (оказывать сопротивление проникновению в абразивный инструмент другого тела). В зависимости от значений этого показателя, различают несколько степеней твердости абразивного инструмента.

По шкале твердости принято 16 степеней твердости инструмента:

- ВМ1 и ВМ2 — весьма мягкий;
- М1, М2 и М3 — мягкий;
- СМ1 и СМ2 — средне-мягкий;
- С1 и С2 — средний;
- СТ1, СТ2 и СТ3 — средне-твердый;
- Т1 и Т2 — твердый;
- ВТ — весьма твердый;
- ЧТ — чрезвычайно твердый.

В этой шкале цифры 1, 2 и 3 характеризуют возрастание твердости внутри данной степени. Для некоторых видов инструмента, например, шарошлифовальных кругов, твердость ЧТ подразделяют на девять дополнительных степеней (ЧТ1 — ЧТ9), соответствующих определенной объемной массе (2,8...2,96 г/см<sup>3</sup>); для инструмента на вулканической связке применяют группы укрупненных степеней твердости СМ, С, СТ, Т.

*Несколько стандартных методов измерения твердости абразивного инструмента:*

*пескоструйный метод* распространяется на абразивные инструменты из электрокорунда и карбида кремния на керамической, бакелитовой и глифталевой связках зернистостью 50 и менее. Стандарт не распространяется на бруски зернистостью 12 и менее, а также шлифовальные круги высотой менее 8 мм и зернистостью 12 и менее. Измерение твердости осуществляется на пескоструйных твердомерах мод. 909 (ТП-1100) для кругов с наружным диаметром 400...1100 мм и мод. 910 (ТП-400) для кругов диаметром до 400 мм;

*метод вдавливания шарика* (ГОСТ 19202) распространяется на шлифовальные бруски и шлифовальные круги высотой менее 8 мм из электрокорунда и карбида кремния на керамической и бакелитовой связках; твердость измеряется на приборе типа ТР (Роквелл);

*метод вдавливания конусом* (ГОСТ 21323) распространяется на абразивный инструмент на вулканической связке; твердость измеряется на приборе типа ТКВ (модернизированный прибор Роквелл).

Для оценки твердости абразивного инструмента без его разрушения применяют акустический метод контроля физико-механических свойств, основанный на регистрации параметров частоты собственных колебаний, возбужденных в контролируемом объекте, измерение которых осуществляется на приборах типа «Звук» (ГОСТ 25961).

Используя формулу  $f = FC_l$  (где  $f$  — частота собственных колебаний,  $F$  — коэффици-

ент формы изделия), определяют приведенную скорость распространения акустических волн —  $C_l$  и через нее так называемые звуковые индексы (ЗИ), которые представляют условную величину, равную среднему арифметическому значению начала и конца определенных интервалов  $C_l$ , уменьшенному в 100 раз. Стандартом установлена шкала звуковых индексов от 19 до 75, которые коррелируются с соответствующими степенями твердости шлифовальных кругов. Применение данного метода дает возможность определить твердость всех основных типов шлифовальных кругов из различных материалов на всех видах связок и во всем диапазоне твердостей.

**Структура.** Термин «структура» для абразивного инструмента имеет специфическое значение. В отличие от общепринятого понятия оно не означает собственно внутреннего строения изделия — это соотношение объемов шлифовального материала, связки и пор в абразивном инструменте. Поры в инструменте регулируются его рецептурой. Чем больше суммарный объем пор и чем крупнее сами поры, тем эффективнее удаляется стружка при резании, лучше охлаждается место контакта инструмента и детали, быстрее идет самозатачивание инструмента. В то же время инструмент с высоким содержанием пор менее прочен и подвергается большему износу. Таким образом, для каждой конкретной операции шлифования необходимо подбирать инструмент со строго заданной структурой. Структуры обозначаются номерами и называются: №1...№4 — закрытые или плотные структуры; № 5-8 — средние; № 9-12 — открытые; а № 13 и более — высокопористые.

**Класс неуравновешенности шлифовальных кругов.** Как любое тело вращения, шлифовальные круги обладают неуравновешенностью. В зависимости от допустимых неуравновешенных масс устанавливается четыре класса неуравновешенности шлифовальных кругов (ГОСТ 3060). Классу I соответствует минимальная, а классу IV — максимальная неуравновешенность круга. Стандарт предусматривает методику измерения неуравновешенности масс и распространяется на шлифовальные круги всех типов с наружным диаметром 100...2000 мм, высотой 1...630 мм.

**Класс точности.** В соответствии с ГОСТ 2424 круги изготавливают трех классов точности: АА, А и Б. Стандарт устанавливает предельно допустимые отклонения геометрических размеров кругов и классы неуравнове-

шенности в зависимости от класса точности. Для кругов класса АА допускается только 1-й класс неуравновешенности, для класса А соответственно 1-й и 2-й классы, для класса Б — 1...3-й классы. Для кругов класса АА не допускается отклонение от номинальной твердости.

**Рабочая скорость.** Прочность круга и степень его неуравновешенности должны гарантировать безопасную работу (невозможность разрыва) при шлифовании. Абразивный инструмент в зависимости от типа-размера и вида связки может применяться для работы при скоростях от 15 до 120 м/с. Согласно ГОСТ 12.3.028 инструмент должен быть испытан при контрольной испытательной скорости предприятием-изготовителем и перед установкой на станок при испытательной скорости — предприятием-потребителем. Контрольная испытательная скорость выбирается в зависимости от рабочей скорости, типоразмера круга и вида связки, и превышает рабочую скорость в 1,4...1,9 раза, а испытательная скорость — соответственно в 1,1...1,5 раза. Испытания проводят на специальных испытательных стендах. Круги, изготовленные для рабочих скоростей свыше 60 м/с, маркируются (кроме кругов диаметром менее 250 мм и эльборовых) цветной полосой: желтая — на кругах с рабочей скоростью 60 м/с, красная — 80 м/с, зеленая — 100 м/с, зеленая и синяя — 125 м/с.

**Выбор характеристики абразивного инструмента** имеет важное значение для оптимизации процесса абразивной обработки. Характеристика инструмента в виде условного обозначения должна быть обязательно указана в нормативно-технической документации соответствующего процесса обработки изделия. Так, например, шлифовальный круг по ГОСТ 2424—83 обозначается:

I 500 × 50 × 305 24А 10-П С2 7 К 35 м/с  
А 1 кл ГОСТ 2424—83,

что означает: круг прямого профиля тип I с наружным диаметром 500 мм ( $D$ ), высотой ( $T$ ) — 50 мм, диаметром посадочного отверстия ( $H$ ) — 305 мм, из белого электрокорунда марки 24А, зернистостью 10-П, степенью твердости С2, номером структуры 7, на керамической связке К, для работы со скоростью 35 м/с класса точности А 1-го класса неуравновешенности.

Шлифовальная головка цилиндрическая типа АW, диаметром  $D = 8$  мм, высотой  $H = 10$  мм по ГОСТ 2447—82:

AW8 10 24А 25-Н СТ1 6 К А 35 м/с  
ГОСТ 2447—82;

остальные обозначения аналогичны шлифовальным кругам.

Пример условного обозначения шлифовального круга из эльбора:

1А1 250 × 16 × 76 × 5 ЛП Л12 С2 К 7 100,

что означает: 1А1 — круг плоский прямого профиля, диаметр  $D = 250$  мм, высота  $H = 16$  мм, посадочное отверстие  $d = 76$  мм, ширина эльборосодержащего слоя  $s = 5$  мм, эльбор прочный ЛП, зернистость 12, твердость С2, керамическая связка, структура 7, 100 — концентрация эльбора в %.

Отрезной круг диаметром  $D = 400$  мм, высотой  $H = 4,0$  мм, диаметром посадочного отверстия  $d = 51$  мм, из нормального электрокорунда марки 14А, зернистостью 40, 41 — звуковой индекс, БУ — бакелитовая связка, с упрочняющим элементом на рабочую скорость 80 м/с, 2 кл. точности:

400 × 4 × 51 14А 40 41 БУ80 м/с 2 кл  
ГОСТ 21963—82

Аналогичный принцип обозначения характеристик применяется и для других видов абразивного инструмента.

Типоразмер абразивного инструмента определяется видом операции, типом оборудования, размером обрабатываемой поверхности:

круглое наружное, бесцентровое и плоское (периферией круга) шлифование — кругами прямого профиля тип 1 (ПП) и для эльбора типы 1А1 и А8;

внутреннее шлифование — кругами типов 1, 1А1 и А8, головками типа АW;

плоское (торцом круга) шлифование и заточка инструмента — кругами типа 36 (ПН), типа 6 (ЧК), типа 11 (ЧЦ), из эльбора типа 11А2 и 12У5-45 (чашечные конические) и тарельчатыми типа 12R4, 12R9 и др.;

резьбошлифование — кругами типа 4 (2П), из эльбора типа 1Д1 и 1Е6Q;

зубошлифование — кругами типа 12 и 14 (Т);

профильное шлифование — угловыми и фасонными кругами или кругами типа 1

(ПП), спрофилированными соответствующим образом;

хонингование и суперфиниширование — брусками типа БКв, БП;

отрезка — отрезными кругами.

Вид абразивного материала, из которого изготовлен инструмент, выбирают в первую очередь в зависимости от свойства обрабатываемого материала. Общее правило: шлифование пластичных материалов с высоким сопротивлением разрыву, к которым относятся все марки сталей, проводят инструментом из электрокорунда; шлифование твердых хрупких материалов с низким сопротивлением разрыву (чугун, твердый сплав, керамика, стекло, алюминиевые и медные сплавы) — инструментом из карбида кремния. Инструмент из эльбора используют для шлифования высокотвердых инструментальных, быстрорежущих, жаропрочных сталей. При этом необходимо учитывать степень химического взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым.

Правильный выбор марки и зернистости абразивного материала позволит оптимизировать процесс обработки. Электрокорунд белый марок 24 и 25А целесообразно применять для чистового шлифования сталей, в первую очередь закаленных. Электрокорунд марок 91А и 92А, легированный хромом и титаном, используют при черновом и получистовом шлифовании сталей. Менее хрупкий нормальный электрокорунд марок 14А, 15А и 16А используют при шлифовании нетермообработанных сталей, алюминиевых сплавов и бронзы.

Монокорунд марок 44А и 45А применяется для профильного шлифования деталей из закаленных легированных сталей. Циркониевый электрокорунд марки 38А6, как наиболее прочный, применяют при обдирочном шлифовании.

Зернистость абразивного материала в инструменте выбирают в зависимости от размера снимаемого припуска и требуемой шероховатости поверхности. Обдирочное шлифование проводят кругами зернистостью 125—250, черновое шлифование с припусками 0,5...1,0 мм кругами зернистостью 25—50, чистовое шлифование с припусками 0,2...0,3 мм кругами зернистостью 10—16, тонкое шлифование с припусками 0,05...0,10 мм кругами зернистостью М28-6. Предварительное хонингование выполняют брусками зернистостью 8—12, окончательное — зернистостью М14—М4. Для суперфиниширования используют брусочки зернистостью М28—М5.

На выбор твердости абразивного инструмента влияет ряд факторов. При этом можно руководствоваться следующим правилом: твердость абразивного инструмента должна быть тем ниже, чем выше твердость обрабатываемого материала и скорость шлифования, больше снимаемый припуск и зона контакта круга и детали и чем меньше зернистость инструмента.

Структуру шлифовального круга выбирают исходя из следующих общих рекомендаций: для чернового шлифования требуются круги со структурой № 4—6, для получистового и чистового шлифования — круги со структурой № 6—8, для профильного шлифования — круги со структурой № 10—12.

Вид связки шлифовального круга определяется видом шлифования и требованиями к шероховатости поверхности. Большинство видов шлифования проводят на керамических связках, более жестких и обеспечивающих требуемую точность обработки. Обдирочное шлифование и отрезку выполняют кругами на органических связках, способных выдерживать переменные нагрузки. Доводку и полирование для получения параметра шероховатости поверхности  $Ra \leq 10$  мкм выполняют кругами на специальных органических связках с повышенной эластичностью. Для хонингования и суперфиниширования применяют брусочки преимущественно на керамической связке, для чернового хонингования — брусочки на бакелитовой связке. Для высокоскоростного глубинного шлифования сталей рекомендуется инструмент из эльбора на металлических связках.

Для инструмента из эльбора основным элементом характеристики является также концентрация зерен кубического нитрида бора в рабочем слое. В большинстве случаев используют инструмент с концентрацией зерен 100% (4,4 карата в 1 см<sup>3</sup> режущего слоя); для доводочных операций применяют инструмент с концентрацией зерен 50 и 75%; для профильного шлифования — круги с концентрацией 150%.

Выбор класса точности шлифовальных кругов зависит от вида операции и требований к точности обрабатываемых деталей. Для большинства видов шлифования точных деталей, а также для шлифования с повышенными скоростями рекомендуется применять круги класса А, для зубошлифования и обработки высокоточных деталей — круги класса АА.

Рекомендации по выбору инструмента из эльбора приведены в табл. 3.3.10.

## 3.3.10. Рекомендации по выбору характеристик инструмента из эльбора

Операция обработки	Обрабатываемый материал	Характеристика инструмента			
		Тип	Связка	Зернистость	Твердость
Круглое наружное и плоское шлифование периферией круга	Быстрорежущие, легированные конструкционные, жаропрочные и коррозионно-стойкие стали	1A1	К	Л4—Л12, Л8—Л12, Л4—Л6, ЛМ14—ЛМ40 (для доводки)	СМ2—С2
Круглое торцовое шлифование, обработка режущего инструмента и деталей машин	То же	6A2	0	Л6—Л10, Л4—Л5 (для доводки)	—
Шлифование направляющих металлорежущих станков	Чугун, сталь	11A2	0	Л10—Л12, Л6—Л8	—
Заточка однолезвийного инструмента	Быстрорежущие стали	11A2	0	Л6—Л10	—
Шлифование корпусных деталей станков	Чугун, сталь	11A2	0	Л10—Л12, Л6—Л8	—
Заточка многолезвийного инструмента (разверток, фрез и др.)	Быстрорежущие и инструментальные стали	12A2, 12R4, 12V5-45°	0	Л4—Л8	СМ1—С1
		12R4, 12V5, 12V9	К	Л5—Л10, Л6—Л10	
Шлифование резьбы метчиков	Быстрорежущие и легированные конструкционные стали	1E1	К	ЛМ14—Л5, ЛМ14—Л4	СТ3—Т2
Шлифование внутренних резьб	То же	1E1	К	ЛМ14—Л4	СТ1—СТ3
Шлифование отверстий внутренних колец подшипников	Подшипниковые, жаропрочные и коррозионно-стойкие стали	1A1	К	Л4—Л10, Л4—Л6	С1—СТ1 СТ1—Т1
		A8	К		
Шлифование эвольвентного профиля зубьев долбяков и шеверов	Быстрорежущие стали	1R1	К	Л6—Л12	СМ2
Шлифование профиля резьбы ходовых винтов и червячно-модульных фрез	Конструкционные и быстрорежущие стали	1E1	К	Л6—Л12	СМ1—СМ2
Шлифование эвольвентного профиля круглых протяжек	Быстрорежущие стали	1E1	К	Л6—Л10	СМ2—С2
Шлицшлифование	Легированные конструкционные стали	1E1	К	Л6—Л12	—
Зубошлифование	Легированные конструкционные стали	12A2-20°	0	Л10—Л12	—
		12V9	0	Л10—Л12	—
		12V9	К	Л10—Л12	СМ1—СМ2

Продолжение табл. 3.3.10.

Операция обработки	Обрабатываемый материал	Характеристика инструмента			
		Тип	Связка	Зернистость	Твердость
Шлифование желобов колец подшипников	Жаропрочные подшипниковые стали	1F1X	К	Л8—Л10	СТ1—Т2
Электрохимическое шлифование: круглое наружное и плоское периферией круга плоское торцом круга	Высоколегированные труднообрабатываемые стали и сплавы	1A1	М	Л8—Л16	—
		11A2	М	Л8—Л16	—
Доводка роликовой дорожки и желобов колец подшипников	Подшипниковые, в том числе теплоустойкие стали	ЛБП	К	ЛМ7—ЛМ40	С1—СТ3
Доводка наружной поверхности роликов в подшипниковой промышленности, шпинделей станков и других круглых деталей	Подшипниковые и другие конструкционные стали	ЛБС	К	ЛМ7—ЛМ40	СМ2—СТ3
Доводка закаленных поверхностей различных деталей для получения параметра шероховатости: Ra = 0,32...0,16 мкм	Легированные конструкционные и инструментальные стали	Шлифшкурки ШВМС, ПВМС на шифоне	—	ЛМ40—Л6	—
		Шлифшкурка на капроне	—	ЛМ14—ЛМ28	—
Ra = 0,16...0,08 мкм		То же	—	ЛМ5—ЛМ10	—
Ra = 0,04...0,02 мкм		Пасты	—	ЛМ20—ЛМ40	—
Доводка различных деталей для получения параметров шероховатости поверхности: Ra = 0,63...0,32 мкм	Легированные стали, чугуны, цветные металлы		—	ЛМ7—ЛМ14	—
Ra = 0,16...0,08 мкм			—	ЛМ1—ЛМ5	—
Ra = 0,04...0,02 мкм					

П р и м е ч а н и е . Концентрация рекомендуемых кругов — 100%.  
Связки: О — органические; К — керамические; М — металлические.

### 3.3.7. ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Алмазный инструмент.** Лучшим инструментальным материалом, который может удовлетворить большинству требований техники и технологии, является алмаз, который обладает наибольшей износостойкостью по сравнению со всеми известными материалами, используемыми при изготовлении инструментов.

Алмазный инструмент (АИ) изготавливается с использованием природного или синтетического алмаза, которым оснащается его режущая часть.

Физические и химические свойства алмаза, главным образом его высокая твердость и износостойкость, в десятки тысяч раз превосходящие свойства промышленных абразивных материалов, позволяет обрабатывать с помощью АИ твердые сплавы (в том числе труднообрабатываемые и жаропрочные), различные конструкционные материалы (оптическое кварцевое стекло, керамику, ситаллы, силумины, сплавы на основе алюминия, цветные металлы, ферриты и др.), строительные материалы (бетон, мрамор, гранит), а также фарфор, хрусталь, драгоценные камни и др.

Работа режущего АИ по сравнению с инструментами, оснащенными другими материалами, характеризуется минимальными силами резания, меньшей потребляемой мощностью, более низкой температурой в зоне резания. Качество обработанных поверхностей отличается большой точностью и малой шероховатостью ( $R_z = 0,1 \dots 0,05$  мкм). Практика применения АИ показала, что их использование способствует совершенствованию существующих и созданию новых прогрессивных технологий обработки материалов. АИ обеспечивает высокое качество продукции, повышение надежности машин и приборов.

В связи с большим значением алмазов для развития ряда ведущих отраслей промышленности они были отнесены к числу стратегических товаров и только после открытия в 1953 г. якутских месторождений природных алмазов и начала их промышленной эксплуатации стала реальной постановка задачи создания промышленного производства АИ. Однако объемы добычи природного сырья не могли удовлетворить потребности народного хозяйства. Решение проблемы получения синтетических алмазов дало реальную возможность создания отрасли по производству АИ и позволило, практически полностью, обеспе-

чить потребность в них всех отраслей народного хозяйства.

Первые синтез алмазов в лабораторных условиях был осуществлен в 1960 г. коллективом сотрудников Института физики высоких давлений АН СССР под руководством Л.Ф. Верещагина. На основе этого метода в Институте сверхтвердых материалов (г. Киев) под руководством В.Н. Бакуля в 1961 г. была разработана технология промышленного производства синтетических алмазов и организован выпуск.

Возможность получать синтетические алмазы, которые в отличие от природных имеют заранее заданные свойства, регулировать их прочность и хрупкость в широких диапазонах, позволила значительно расширить области применения алмазов, повысить эффективность их использования.

Проблемы, связанные с изучением свойств отечественного алмазного сырья, разработкой технологических процессов алмазной обработки, созданием конструкций отечественных алмазных инструментов для различных отраслей промышленности, были решены во ВНИИАЛМАЗе.

Порошки из природных и синтетических алмазов, предназначенных для изготовления АИ и применения в незакрепленном состоянии в виде паст и суспензий, выпускаются в соответствии с ГОСТ 9206.

Крупномасштабное производство синтетических алмазов и АИ было создано к середине 70-х гг. Основные виды выпускаемого АИ представлены на рис. 3.3.31.

В зависимости от назначения АИ его изготавливают из алмазных порошков природных или синтетических на различных связках: органической, керамической, эластичной (резиновой), металлической. Содержание алмаза в АИ определяется его концентрацией в алмазоносном слое. При 100 %-ной концентрации в  $1 \text{ см}^3$  алмазного слоя содержится 0,878 г (4,39 каратов) алмазного порошка.

Форма и размеры выпускаемых АИ определяются действующими стандартами.

Эффективность использования АИ зависит от правильности выбора его характеристики применительно к обработке различных материалов: марки и зернистости алмазного порошка (кристалла алмаза), вида связки, режимов и условий обработки, применяемой охлаждающей жидкости, состояния оборудования, квалификации рабочего и т.д.

В табл. 3.3.11 приведены сведения о некоторых видах АИ и областях его применения.

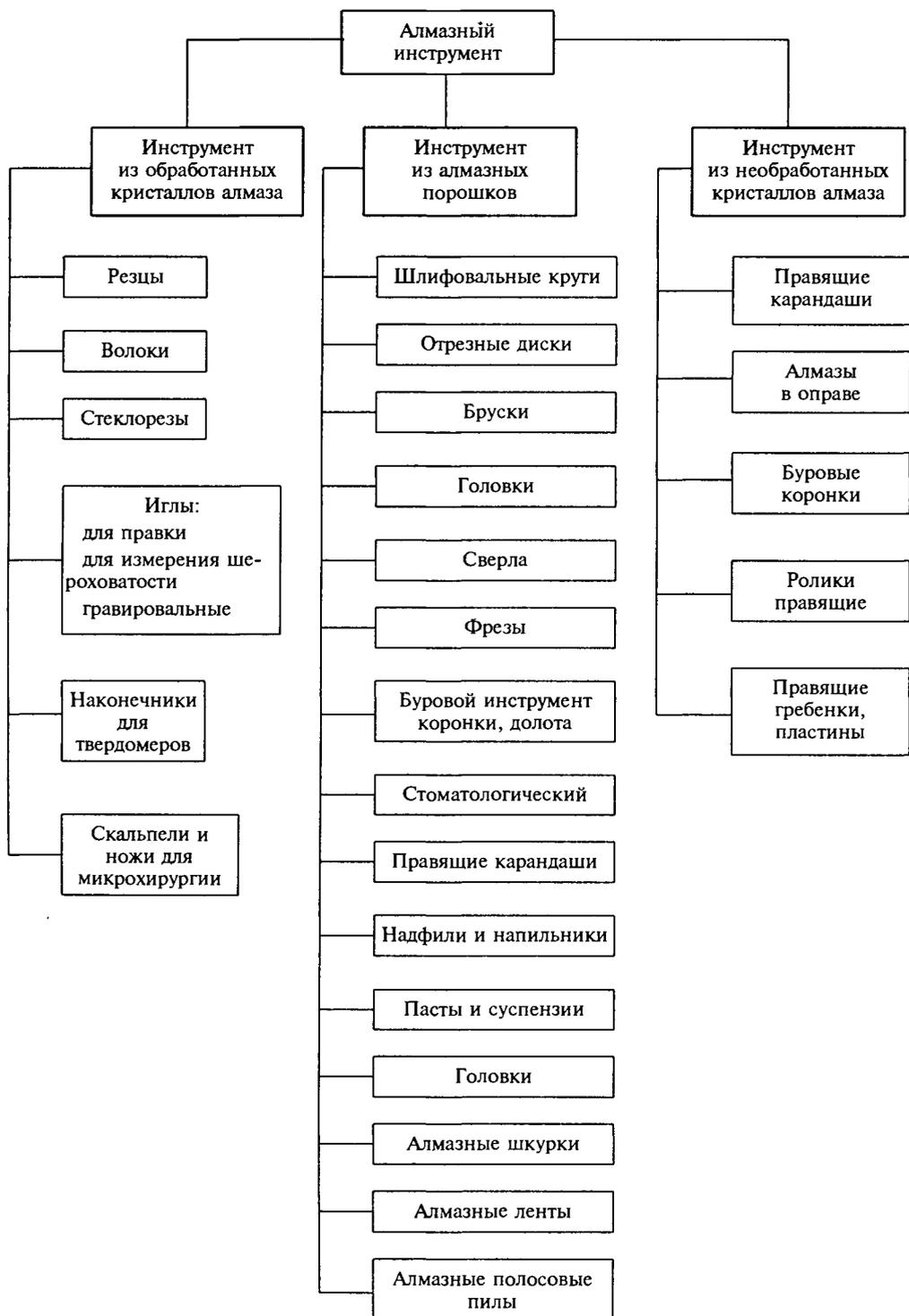


Рис. 3.3.31. Основные виды выпускаемых алмазных инструментов

## 3.3.11. Область применения алмазных режущих инструментов

Наименование	Краткая характеристика	Области применения
1	2	3
Алмазные шлифовальные круги	При изготовлении используются порошки природных и синтетических алмазов в интервале зернистостей от 5/3 до 400/315 мкм с различной концентрацией алмазов в рабочем слое круга — обычно концентрация равна 50, 75, 100 %	Операции предварительного и окончательного шлифования заточки и доводки изделий и инструментов из металлических и неметаллических материалов
Алмазные круги для полирования камней-самоцветов	Круги формы 6A2 на органической связке изготавливают с применением алмазных микропорошков зернистостью от 1/0 до 5/3 мкм. Специальная регулируемая структура связки, характерные для нее низкий коэффициент трения и высокая теплопроводность исключают сколы и трещины, гарантирует необходимое качество полирования	Для окончательной обработки ограненных вставок из полудрагоценных и драгоценных камней (природных и синтетических) для ювелирных изделий, а также изделий из поделочных камней
Фрезы алмазные фасонные	Изготавливают методом гальваностегии из природных и синтетических алмазов. Фрезы изготавливают диаметром до 400 мм и высотой до 200 мм практически любого профиля	Для профильной обработки изделий из природного и синтетического камня на камнеобрабатывающих предприятиях, мастерских и т.п.
Правящие ролики фасонного профиля	Изготавливают методом гальваностегии из природных и синтетических алмазов. Правящие ролики изготавливают любого профиля	Для профильной правки шлифовальных кругов на металлообрабатывающих предприятиях (автомобильных, машиностроительных, авиационных)
Круги алмазные отрезные сегментные формы I AIRSS (АОСК)	Изготавливают из высококачественных отечественных и импортных алмазных порошков. Удельная производительность: по мрамору 500-800 см <sup>2</sup> /мин по граниту 200-250 см <sup>2</sup> /мин по железобетону 400-600 см <sup>2</sup> /мин по известняку 1000-1200 см <sup>2</sup> /мин	Для резки природного камня, бетона, асфальта, стекла, огнеупоров на камнеобрабатывающих предприятиях, в строительной индустрии, на дорожных работах
Сверла алмазные	Изготавливают из высококачественных отечественных и импортных алмазных порошков. Производительность: по бетону 3 ... 6 см <sup>2</sup> /мин	Для сверления бетона, железобетона, природного камня, кирпича, стекла на камнеобрабатывающих предприятиях, в строительной индустрии, на дорожных работах
Резцы для контактных линз	Изготавливают из природных алмазов и сверхтвердых материалов. При обработке контактных линз обеспечивается качество поверхности, отвечающее мировым стандартам	Для оптических предприятий и мастерских

Продолжение табл. 3.3.11

1	2	3
Фрезы алмазные торцовые	Для оснащения камнеобрабатывающих установок, линий, станков отечественного и импортного производства при обработке облицовочных плит, памятников, полов, перекрытий, стен и т.п.	На камнеобрабатывающих предприятиях, в стройиндустрии, на дорожных работах
Круги алмазные типа "Турбо"	Изготавливают из высококачественных отечественных и импортных алмазных порошков. Для сухой резки мрамора, гранита, кирпича, черепицы, бетона, железобетона, асфальта, керамики огнеупоров и др. материалов	На камнеобрабатывающих предприятиях, в стройиндустрии, на дорожных работах

Алмазное сырье в виде порошков и зерна используется для изготовления различных типов алмазных инструментов; при этом из всего комплекса физико-механических свойств алмаза в практике уделяют внимание твердости, износостойкости, прочности, плотности.

**Поликристаллические сверхтвердые материалы на основе модификаций нитрида бора.** Основу поликристаллических сверхтвердых материалов составляет нитрид бора  $\text{BN}$ , который представляет собой ковалентное соединение бора  $\text{B}$  с азотом  $\text{N}$ . В природе нитрид бора не встречается. Он имеет кристаллическую структуру графита, высокую температуру плавления (выше 2200 К), практически не растворим ни в одном из известных растворителей, проводит электрический ток.

Известны три модификации  $\text{BN}$ : гексагональный графитоподобный нитрид бора  $\text{BN}_\Gamma$ , кубический нитрид бора  $\text{BN}_\kappa$  и гексагональный вюрцитоподобный нитрид бора  $\text{BN}_\nu$ .  $\text{BN}_\Gamma$  является исходным материалом для получения  $\text{BN}_\kappa$  и  $\text{BN}_\nu$ , на основе которых синтезируются все известные поликристаллические сверхтвердые материалы (ПСТМ).

**Эльбор-Р (композит 01)** состоит из беспорядочно ориентированных кристаллов кубического нитрида бора, полученных "каталитическим синтезом". В результате высокотемпературного прессования под действием высокого давления первоначальные кристаллы  $\text{BN}_\kappa$  дробятся до размеров 5 ... 20 мкм. Физико-механические свойства композита 01 зависят от состава исходной шихты и термодинамических параметров синтеза (давления, температуры, времени). Примерное массовое содержание эльбора-Р следующее: 90 ... 92 %  $\text{BN}_\kappa$ , 2 ... 3 %  $\text{BN}_\Gamma$ , остальное - примеси добавок-катализаторов.

**Эльбор-РМ (композит 01)** в отличие от эльбора-Р получают прямым синтезом  $\text{BN}_\Gamma \rightarrow \text{BN}_\kappa$ , осуществляемым при высоких давлениях

и температурах. Отсутствие в шихте катализатора позволяет получить стабильные эксплуатационные свойства этой модификации композита 01. Геометрические размеры пластин и область применения эльбора-РМ аналогичны эльбору-Р.

**Белбор (композит 02)** - кубический нитрид бора, используемый для спекания композита 02. Получается прямым переходом из  $\text{BN}_\Gamma$  в аппаратах высокого давления при статическом приложении нагрузки (давление до 9 ГПа, температура до 3200 К). Отсутствие каталитических добавок позволяет получить более высокие по сравнению с эльбором-Р физико-механические характеристики, обеспечивает стабильность свойств белбора, а значит, и инструмента, при его длительном хранении.

**Исмит (композит 03).** Исмит выпускается в виде заготовок различной формы, масса которых не превышает 1 кар.

**Киборит** - новый поликристаллический сверхтвердый материал, синтезированный впервые в ИСМ АН Украины. Поликристаллы киборита получают горячим прессованием шихты (спеканием) при высоких статических давлениях. В состав шихты входят порошок кубического нитрида бора и специальные активирующие добавки. Состав и количество добавок, а также условия спекания, обеспечивают получение такой структуры ПСТМ, в которой сросшиеся кристаллы  $\text{BN}_\kappa$  образуют непрерывный каркас (матрицу). В межзеренных промежутках каркаса образуется тугоплавкая твердая керамика. Киборит выпускается в виде круглых пластинок диаметром до 11 мм и толщиной 3,5 ... 5,5 мм.

**Композит 05** в своей основе содержит кристаллы кубического нитрида бора (85 ... 95 %), спекаемые при высоких давлениях с добавками оксида алюминия, алмазов и других элементов. По своим физико-механическим свойствам композит 05 уступает многим ПСТМ.

**Гексанит-Р** (композит 10) - поликристаллический сверхтвердый материал, основу которого составляет вюрцитная модификация нитрида бора. Технологический процесс получения гексанита-Р, как и предыдущих композитов, состоит из двух операций (двухступенчатый процесс): синтеза  $BN_B$  методом прямого перехода  $BN_T \rightarrow BN_B$  при ударном воздействии на исходный материал и спекания порошка  $BN_B$  при высоких давлениях и температурах. Для композита 10 характерна мелкозернистая структура с размером кристаллов основной фазы  $BN_B$  не более 1 мкм. Размеры кристаллов примесей ( $BN_K$ ,  $BN_T$  и др.) в зависимости от технологии получения композита могут колебаться в значительных пределах.

Особенности структуры определяют и особые механические свойства композита 10:

он не только обладает высокими режущими свойствами, но и может успешно работать при ударных нагрузках. Это свойство делает композит 10 особенно ценным материалом для оснащения фрез.

**ПТНБ (композит 09)** характеризуется тем, что его основу (матрицу) составляют частицы кубического нитрида бора размерами 3 ... 5 мкм, а в качестве наполнителя выступает вюрцитный нитрид бора. Композит 09 разработан в Институте химической физики АН, РФ, выпускается нескольких марок (ПТНБ-5, МК, ПТНБ-ИК-1 и др.), которые различаются составом исходной шихты (смесью порошков  $BN_B$  и  $BN_K$ ).

В табл. 3.3.12 и 3.3.13 приведены механические и физические характеристики основных марок композитов соответственно.

### 3.3.12. Характеристики прочности композитов

Марка композита	$\sigma_{сж}$ , ГПа	$\sigma_p$ , ГПа	$\sigma_n$ , ГПа
Эльбор-Р (композит 01)	1,9 - 2,1	0,44	0,7 - 0,8
Эльбор-РМ	$2,7 \pm 0,45$	$0,46 \pm 0,03$	0,4 - 0,5
Композит 05	0,98 - 1,47	-	0,49
Киборит	$2,93 \pm 0,35$	$0,37 \pm 0,02$	-
Белбор (композит 02)	4 - 6,5	-	0,68
Исмит (композит 03)	1,18 - 1,47	-	0,78 - 0,98
ПТНБ (композит 09):			
ПТНБ-5МК	3,92	-	0,59
ПТНБ-ИК-1	4,90	-	1,18
Гексанит-Р (композит 10)	$2,3 \pm 0,56(3-5)$	$0,32 \pm 0,06$	0,7 - 1,2

### 3.3.13. Физические характеристики основных марок композитов

Марка композита	Модуль сдвига $G$ , ГПа	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Устойчивость к нагреву на воздухе, К
Эльбор-Р (композит 01)	378	3,31-3,39	660-800	30-60	1380-1570
Гексанит-Р (композит 10)	373	3,28-3,36	880-980	60-80	1070-1170
ПТНБ-5МК	-	3,42-3,45	720	-	1470
ПТНБ-ИК-1	-	3,6	720	-	1570
Композит 05	-	3,7-4,0	530-630	-	1370
Исмит	-	3,27-3,45	720	-	1470
Эльбор-РМ	-	$3,42 \pm 0,03$	$840 \pm 70$	-	-
Киборит	-	$3,26 \pm 0,8$	$880 \pm 31$	-	-
Белбор (композит 02)	-	-	-	40-60	1370-1470

Примечание. Коэффициент Пуассона  $\mu$  для гексанита-Р (композит 10), эльбора-РМ, киборита - 0,16; удельная теплоемкость для эльбора-Р - 670 Дж/(кг·К).

При переточках режущих вставок из композитов их свойства могут существенно отличаться от свойств поликристалла в исходном состоянии. Прочностные свойства после переточки могут снижаться на 5 ... 25%.

**Режимы резания инструментами, оснащенными ПСТМ.** Назначение режимов резания является сложной и многогранной задачей, зависящей от требований, стоящих перед

каждым технологическим переходом и операцией в целом. Поэтому в данном разделе приведены ориентировочные диапазоны режимов резания, требующие экспериментального уточнения в каждом конкретном случае.

Рекомендуемые диапазоны режимов резания инструментами, оснащенными композитами, приведены в табл. 3.3.14 и 3.3.15.

### 3.3.14. Диапазоны режимов резания инструментами из ПСТМ при точении и растачивании

Обрабатываемые материалы и покрытия	Характер резания	Композит	$v$ , м/мин	$S_0$ , мм	$t$ , мм
Стали конструкционные и легированные инструментальные и подшипниковые 40 ... 58 HRC <sub>3</sub>	Без удара	05; 01; 02	50 – 180	0,03–0,20	0,05–3,0
	С ударом	10; 10Д	40 – 120	0,03–0,10	0,05–1,0
Стали быстрорежущие, инструментальные, цементируемые 58 ... 70 HRC <sub>3</sub>	Без удара	01; 02	50 – 120	0,03 – 0,1	0,05 – 0,8
	С ударом	10; 10Д; киборит	40 – 100	0,03–0,07	0,05 – 0,4
Чугуны серые и высокопрочные, 150 ... 300 HB	Без удара	05; 01; 02	400 – 1000	0,03 – 0,5	0,05 – 3,0
	С ударом	10; 10Д; 05; 01; 02	300 – 800	0,03 – 0,2	0,05 – 2,0
Чугуны отбеленные, 400 ... 600 HB	Без удара	05; 01; 02	50 – 200	0,03 – 0,5	0,05 – 2,0
	С ударом	10; 10Д	40 – 90	0,03 – 0,10	0,05 – 1,0
Твердые сплавы с содержанием кобальта не менее 15 %, 80 ... 86 HRA	Без удара	10; 10Д; 01; 02; киборит	5 – 20	0,08 – 0,1	0,05 – 1,0
Износостойкие покрытия на основе никеля (плазменное нанесение), 47 ... 57 HRC <sub>3</sub>	По корке	01; 02; 10; 10Д	40 – 80	0,03 – 0,15	0,1 – 0,4

### 3.3.15. Диапазоны режимов резания инструментами из ПСТМ при торцовом фрезеровании

Обрабатываемый материал	Композит	$v$ , м/мин	$S_2$ , мм	$t$ , мм
Стали конструкционные и легированные нетермообработанные, $\leq 30$ HRC <sub>3</sub> (в состоянии поставки)	10; 01; 10Д	400 – 900	0,01 – 0,1	0,05 – 2,0
Стали конструкционные, легированные, инструментальные, закаленные, 35 ... 55 HRC <sub>3</sub>	10; 01; 10Д	200 – 600	0,01 – 0,1	0,05 – 1,2
Стали закаленные цементируемые, 55 ... 70 HRC <sub>3</sub>	10; 01; 10Д; киборит	80 – 300	0,01 – 0,1	0,05 – 0,8
Стали быстрорежущие, 60 ... 70 HRC <sub>3</sub>	01	20 – 40	0,01 – 0,1	0,05 – 0,8
Чугуны серые и высокопрочные, 150 ... 300 HB (в том числе по литейной корке)	05; 10; 10Д	800 – 2000	0,01 – 0,1	0,05 – 6,0
Чугуны отбеленные, закаленные, 400 ... 600 HB, 40 ... 60 HRC <sub>3</sub>	10; 01; 10Д; 05; киборит	200 – 600	0,01 – 0,1	0,05 – 4,0

Приведенные диапазоны режимов резания предполагают применение инструментов с геометрическими параметрами в состоянии поставки соответствующими инструментальными заводами.

**Специальные инструменты из поликристаллических алмазов (PCD), кубического нитрида бора (PCBN) и керамики для высокоскоростного резания деталей из черных и цветных металлов.** Высокоскоростная обработка резанием деталей из черных и цветных металлов является новой прогрессивной технологией, которая интенсивно разрабатывается и внедряется в практику. Высокоскоростным следует считать резание, при котором скорость возрастает в 10 раз и более по сравнению с уровнем, установившимся для данного обрабатываемого материала. Уровень скоростей резания сталей и чугунов в машиностроении составляет 100 ... 300 м/мин, а закаленных сталей на порядок ниже. Рост скорости ограничивается теплофизическими характеристиками традиционных инструментальных материалов - твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

Вместе с тем, только скорость резания может служить реальным источником существенного повышения производительности и снижения себестоимости обработки, так как благодаря совершенствованию заготовительных операций сокращаются припуски, и значения глубины резания имеют тенденцию к уменьшению. Значения подач на один оборот заготовки или инструмента также не могут быть повышены из-за неуклонного роста требований к качеству обработки деталей машин.

Важной предпосылкой для развития высокоскоростного резания является автоматизация процессов и оборудования, позволяющая реализовать скорости 500 ... 5000 м/мин и более на современных станках с ЧПУ, многоцелевых станках и автоматических линиях. Ранее при работе на универсальных станках с ручным управлением это было практически невозможно не только по техническим причинам, но и в связи с трудностями обеспечения требований техники безопасности и преодоления психологического барьера у станочников.

Увеличение на порядок скоростей резания возможно только на базе создания и внедрения качественно новых инструментальных материалов, обладающих соответствующими теплофизикомеханическими характеристиками. Это синтетические сверхтвердые материалы на основе поликристаллических алмазов (PCD), кубического нитрида бора (PCBN) и керамические материалы на основе  $Al_2O_3$  и  $Si_3N_4$ .

Высокие твердость и износостойкость при 1000 ... 1200 °С PCBN и керамических материалов позволяют обрабатывать изделия при скоростях резания на порядок выше скоростей, допускаемых при использовании твердосплавного инструмента. Однако пониженные, сравнительно с твердосплавным инструментом, прочностные характеристики ограничивали до недавнего времени область применения инструмента из PCBN и керамики получистой и чистой обработкой чугуна и стали, причем, в основном, при непрерывном точении.

Совершенствование технологии производства PCBN и керамики, а также появление на рынке инструментальных материалов керамики на основе  $Si_3N_4$  позволило расширить область применения PCBN и керамики на получистовую, а в отдельных случаях и на черновую обработку. Выпускаемые инструментальные материалы данных классов, а также керамика на основе  $Al_2O_3$ , армированная нитевидными монокристаллами SiC в количестве до 30 ... 40 % (Whiskers), имеют достаточно высокую прочность на изгиб и вязкость разрушения.

Основная область применения инструмента из PCBN - это чистовая и получистовая обработка серых, высокопрочных и отбеленных чугунов и закаленных сталей, в основном, в условиях автоматизированного производства на базе станков с ЧПУ, многоцелевых станков, автоматических линий, специальных скоростных станков. Инструменты из PCD используются для точения, растачивания, резания и фрезерования сплавов на основе алюминия и меди, древесностружечных и композиционных неметаллических материалов, твердых вольфрамкобальтовых сплавов. Нитридная керамика на основе  $Si_3N_4$  отличается высоким сопротивлением к знакопеременным нагрузкам, повышенной ударной прочностью.

Основной областью применения нитридной керамики является обработка серых чугунов с пластинчатым графитом с высокими скоростями резания. Она рекомендуется для точения с ударом и неравномерным припуском ( $v = 300 \dots 800$  м/мин, глубина резания до 3 мм), для предварительного и получистового фрезерования ( $v = 400 \dots 1200$  м/мин, глубина резания до 4 мм). Однако, при получистовом фрезеровании серого чугуна уже при скорости  $v = 1000$  м/мин несомненно преимущество PCBN перед керамическими материалами на основе  $Si_3N_4$ . Для материалов на основе PCBN, имеющих мелкозернистую структуру и керамическое связующее, образующееся в процессе синтеза, интенсивность износа незначительна даже при получистовом

фрезеровании серого чугуна со скоростью  $v = 3000 \dots 4000$  м/мин. Ограничением же для использования этих материалов для высокоскоростной обработки является их стойкость к термоудару. Новая керамика на основе  $Al_2O_3$ , обладающая повышенными прочностными характеристиками, рекомендуется для обработки серых чугунов (со скоростью до 600 м/мин) и нетермообработанных сталей (со скоростью до 500 м/мин), а также закаленных сталей. Пластины размером  $15,875 \times 8$  мм позволяют вести обработку незакаленных сталей и серых чугунов с глубиной резания до 6 ... 8 мм. Повышенные прочностные характеристики армированной керамики на основе  $Al_2O_3$  позволяют применять ее для прерывистой обработки. Данная керамика рекомендуется также для обработки никелевых сплавов.

Выпускается широкая номенклатура инструмента из PCBN, PCD и керамики для высокоскоростного резания. Это токарные проходные, расточные, канавочные, резьбовые резцы, в том числе ступенчатой конструкции для снятия повышенных припусков с деталей типа прокатных валков; торцовые хвостовые и насадные фрезы, в том числе регулируемые и переналаживаемые, которые могут оснащаться пластинами из различных инструментальных материалов с оптимальной для каждого геометрией; гамма расточных напайных и сборных резцов; зенковки, расточные головки и т.д. Для обработки древесностружечных плит на автоматизированных линиях созданы пилы, оснащенные PCBN. Инструменты могут оснащаться как напайными режущими элементами (цилиндрические и прямоугольные вставки, твердосплавные многогранные пластины с напаянным в одной из вершин PCBN или PCD), так и сменными круглыми или многогранными пластинами цельной или двухслойной конструкции.

Для высокоскоростного фрезерования наиболее предпочтительным является кассетный вариант конструкции, когда режущая пластина расположена на съемной кассете, что позволяет путем различных вариантов исполнения кассет использовать на одном корпусе пластины различных форм и размеров. Точность расположения режущих кромок пластин в торцовых фрезах достигается путем высокой точности изготовления деталей фрезы и самих режущих пластин и, когда этого недостаточно, введением в конструкцию механизмов регулировки.

Разработаны три конструкции фрез диаметром  $d = 125 \dots 800$  мм с механизмами тонкого регулирования положения режущих кромок: с настройкой осевого биения; с настройкой осевого и радиального биения; с на-

стройкой осевого, радиального биения и углового положения зачистных режущих кромок (с точностью до  $2'$ ). Точность настройки биения 0,005 мм.

К инструменту с пластинами из PCD предъявляются повышенные требования по жесткости конструкции, точности изготовления (особенно для многозубого инструмента, в том числе торцовых фрез) и качества опорных и базовых поверхностей гнезд под пластины, что связано с высокой стоимостью пластин. Наиболее эффективное использование пластин PCD при высокоскоростном торцовом чистовом фрезеровании алюминиевых сплавов и цветных металлов обеспечивают высокоскоростные фрезы, регулирование положения пластин у которых осуществляется в осевом, радиальном и угловом направлениях. Угловая регулировка позволяет выставить зачистные режущие кромки пластин параллельно обрабатываемой поверхности, что на операции чистового фрезерования обеспечивает необходимую точность и шероховатость поверхности. Совмещение механизмов радиальной и угловой регулировки в один механизм обеспечивает значительное упрощение конструкции и технологии изготовления инструмента. Торцовые фрезы данной конструкции, оснащенные специальными фрезерными пластинами с зачистными фасками из PCD, (SPEN, 0903EDR), обеспечивают торцовое биение режущих кромок в пределах 0,005 мм, радиальное биение 0,01 мм и угловое положение  $2'$ . Это дает возможность на операциях высокоскоростного чистового фрезерования достичь максимальной производительности при высокой точности обработки и низкой шероховатости обработанной поверхности. К достоинствам данной конструкции также относится компактность и надежность механизма тонкой регулировки биения режущих кромок, обеспечивающего равномерную нагрузку зубьев, и следовательно надежную работу пластин из PCD. Диаметры фрез 160 ... 400 мм,  $z = 8 \dots 20$ , положительные осевые и радиальный передние углы  $\gamma = +4^\circ$ .

Повышение производительности и качества обработки плоскостей чугунных (нетермообработанных и закаленных), а также закаленных стальных деталей на современном автоматизированном оборудовании обеспечивается внедрением гаммы торцовых фрез  $d = 20 \dots 800$  мм с механическим креплением сменных пластин из PCBN и керамики (на основе  $Si_3N_4$ ) разных марок. Наиболее эффективно использование данной гаммы торцовых фрез на многоцелевых станках с ЧПУ (как правило  $d = 100, 125, 160$  мм) и на автоматических линиях, например, по обработке блоков и головок блока двигателей автомобилей

и тракторов (как правило  $d = 250, 315, 400, 500$  мм). При обработке серых и высокопрочных чугунов повышение производительности обеспечивается за счет использования высокоскоростного резания со скоростью  $v = 500 \dots 3000$  м/мин. Так, при высокоскоростном торцовом фрезеровании чугунных корпусных деталей на многоцелевых станках кассетными регулируемыми фрезами с пластинами из PCBN разных марок и форморазмеров обеспечивает повышение производительности резания и стойкости инструмента в 3-6 раз.

Для чистовой обработки ( $Ra < 1,25$  мкм) плоскостей чугунных корпусных деталей наиболее эффективны кассетные фрезы, оснащенные механизмом двойной регулировки положения режущих кромок в осевом (биение не более 0,005 мм) и радиальном (с точностью 0,005 ... 0,01 мм) направлениях. В фрезях используются пластины из PCBN квадратной формы с радиусными зачистными кромками ( $\varphi = 75^\circ$ ). Диаметры фрез - 125 ... 160 мм,  $z = 8$ . При наличии скоростных станков с  $n_{\max} = 6300$  мин<sup>-1</sup>, фрезы данной конструкции позволяют проводить высокоэффективное чистовое фрезерование деталей со скоростью резания до 2300 м/мин, с подачей до 4000 мм/мин. При этом производительность резания возрастает в 10-12 раз по сравнению с действующей технологией.

Для высокоскоростной предварительной ( $Ra < 40$  мкм), предварительной и черновой обработки эффективны кассетные торцовые фрезы  $d = 125$  мм с осевой регулировкой (в пределах 0,005 мм), оснащенные круглыми и квадратными пластинами из PCBN. Поддачи на оборот фрезы рекомендуются в зависимости от формы режущей пластины для обеспечения требуемой шероховатости.

Для растачивания отверстий в корпусных деталях из чугунов любой твердости используются головки расточные регулируемые со сменными пластинами из PCBN. Головки используются в условиях автоматизированного производства, на специальных станках, автоматических линиях, станках с ЧПУ, многоцелевых станках, гибких производственных модулях и системах. Рекомендуемые режимы резания: скорость 500 ... 800 м/мин; подача 0,05 ... 0,3 мм; глубина 0,5 ... 2,0 мм. Конструкция расточной головки предусматривает радиальную регулировку для настройки ее на обработку растачиваемого отверстия до определенного диаметра. Данная конструкция позволяет при использовании одного и того же хвостовика проводить растачивание отверстий пластинами различных типоразмеров, путем оснащения его резцедержателями с соответствующими пластинами.

Широкая гамма расточных резцов и вставок с механическим креплением режущих пластин из PCBN предназначена для чистовой и получистовой обработки отверстий в корпусных деталях из чугунов и цветных сплавов на основе меди, а также из закаленных сталей, прежде всего в условиях автоматизированного производства на специальных станках, станках с ЧПУ, многоцелевых станках, гибких производственных модулях и системах. При растачивании глухих отверстий применяются ромбические пластины точности G, а при растачивании отверстий на проход - круглые. Эксплуатация расточных резцов предполагается в оправках расточных сборных модульных с микрометрической регулировкой. При растачивании отверстий расточными вставками рекомендуется применение СОЖ на водной основе; на жестком и виброустойчивом оборудовании обеспечивается шероховатость поверхности  $Ra = 0,4 \dots 1,5$  мкм и точность 5 ... 9-го качества.

Расточные резцы с рабочей частью из PCBN для координатно-расточных станков предназначены для чистовой обработки отверстий в корпусных деталях из закаленных сталей, чугунов и цветных сплавов на основе меди на координатно-расточных станках, в том числе с ЧПУ. Режущий элемент из PCBN закрепляется в корпусе расточного резца по технологии вакуумной пайки. При растачивании отверстий на жестком и виброустойчивом оборудовании обеспечивается шероховатость поверхности  $Ra = 0,6 \dots 1,5$  мкм и точность 6 ... 9 качества. Резцы применяются для растачивания как сквозных, так и глухих отверстий, причем в первом случае главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$  или  $\varphi = 75^\circ$ , а в другом  $\varphi = 93^\circ$ . Диаметр державки 5 ... 25 мм.

Таким образом, экономический эффект от внедрения инструмента из PCD, PCBN и керамики при высокоскоростной обработке деталей из черных и цветных металлов обеспечивается: за счет увеличения скорости резания в 5-15 раз и производительности обработки в 1,5-4 раза, а в некоторых случаях до 6-10 раз; повышения качества обработанной поверхности и увеличения стойкости инструмента как минимум на порядок, а для инструментов из PCD - до 50-100 раз, а также за счет замены шлифования высокотвердых деталей лезвийной обработкой.

### 3.3.8. РЕЖУЩИЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Режущий инструмент (РИ) для станков с ЧПУ и модулей ГПС должен обеспечивать выполнение следующих требований:*

- 1) высокие и стабильные режущие свойства;
- 2) удовлетворительное формирование и отвод стружки;
- 3) заданные условия по точности обработки;
- 4) универсальность применения для типовых обрабатываемых поверхностей различных деталей на разных моделях станков;
- 5) быстротенность при переналадке на другую обрабатываемую деталь или замене затупившегося инструмента;
- 6) предварительную настройку на размер вне станка (совместно с применяемым вспомогательным инструментом).

Указанные требования не позволяют в целом ряде случаев использовать в ГПС режущие инструменты, применяемые на станках общего назначения. Для использования на станках с ЧПУ (в ГПС) выделена особая группа режущего инструмента, причем часть из него уже стандартизирована.

*В общем случае для условий ГПС можно выделить следующие группы инструментов:*

- резцы и резцовые головки;
- осевой инструмент;
- фрезерный инструмент;
- резьбообразующий инструмент.

**Конструкция вспомогательного инструмента** для станков с ЧПУ определяется его основными элементами: присоединительными поверхностями для крепления его на станке и для крепления режущего инструмента. Устройства автоматической смены инструмента и его крепление на станках определяют конструкцию хвостовика, который должен быть одинаковым для всего режущего инструмента к данному станку. Для получения размеров деталей без пробных проходов необходимо в конструкции вспомогательного инструмента (иногда и режущего тоже) предусмотреть элементы, обеспечивающие регулирование положения режущих кромок, т. е. настройку инструмента на определенный вылет. Этим объясняется наличие у станков с ЧПУ разнообразных переходников (адаптеров). Хвостовик переходника предназначен для конкретного станка, а передняя зажимная часть — для режущего инструмента со стандартными присоединительными поверхностями (призматическими, цилиндрическими и коническими по форме, с размерами, регламентированными стандартами на инструмент). Переходники образуют комплект вспомогательного инструмента (резцедержатели, патроны, оправки и втулки различных конструкций), обеспечивающий крепление требуемой номенклатуры режущего инструмента. Такой комплект в сочетании с прибором предварительной настройки должен обеспечить наладку инструмента для работы на станке с ЧПУ.

Разнообразие типов станков с ЧПУ предполагает и разнообразие способов установки и смены инструмента. В связи с этим разрабатывают системы вспомогательного инструмента, которые можно характеризовать как наборы универсального применения и унифицированной конструкции, обеспечивающие качественное закрепление стандартного режущего инструмента, необходимое для полной реализации технологических возможностей различных станков с ЧПУ.

*К системе вспомогательного инструмента предъявляются следующие требования:*

номенклатура и стоимость инструмента, входящего в систему, должны быть сведены к экономически обоснованному минимуму;

элементы системы должны обеспечивать применение режущего инструмента с требуемой точностью, жесткостью и виброустойчивостью;

элементы системы должны обеспечивать в необходимых случаях регулирование положения режущих кромок инструмента относительно координат системы, а также быть удобными в обслуживании (при необходимости быстротенными) и технологичными в изготовлении.

Системы вспомогательного инструмента предназначены для компоновки специальных функциональных единиц — инструментальных блоков (комбинаций режущего и вспомогательного инструмента), каждый из которых служит для выполнения конкретного технологического перехода.

Вспомогательный инструмент можно классифицировать в соответствии с назначением для различных групп станков с ЧПУ, степенью их автоматизации и с учетом перспективы развития (рис. 3.3.32).

Режущий инструмент в отличие от станочного оборудования, приспособлений, измерительных приборов и другого оборудования является на производстве наиболее подвижным в отношении его перемещения, замены, восстановления, описания и др. Это накладывает особые требования на процесс отслеживания с учетом его состояния по всем производственным звеньям предприятия.

В отечественной и зарубежной практике разрабатываются и эксплуатируются системы инструментального обеспечения, решающие задачи учета и хранения, выбора и минимизации количества РИ.

**Система инструментального обеспечения (СИО) в автоматизированном производстве** включает накопители, устройства смены и контроля инструмента, обеспечивающие хранение, автоматическую установку и его замену.



Гибкая СИО, построенная на основе вычислительной техники, сокращает запасы инструментов, повышает коэффициент их использования, уменьшает время на поиск и заказ нужных инструментов. Без этого безвозвратно теряется 30 ... 60% инструментальных запасов; идет накопление инструментов главным образом на рабочих местах; операторы тратят до 20 % времени на поиск режущих инструментов. Кардинальное решение указанных проблем возможно только с применением ЭВМ. Для этого используют базы данных для нескольких тысяч стандартных режущих инструментов, идентифицированных номером детали, номером инструмента, кодом групповой технологии. Их применение позволяет сократить запасы инструментов на 60 %, а коэффициент использования инструмента повышается с 70 до 99 %. При этом устраняется дублирование заказов на инструмент, сокращаются запасы инструментов и площадь складов, уменьшается время обучения операторов инструментального хозяйства с шести месяцев до трех недель.

Применение персонального компьютера при наличии специального программно-математического обеспечения позволяет организовать управление СИО, которое включает: управление устройством для предварительной настройки РИ; формирование графического изображения инструментальной наладки для станка; поиск РИ в базе данных с указанием стандарта; наименования РИ, идентификационного номера, основных размеров РИ, его графического изображения для токарной, фрезерной, сверлильной и шлифовальной видов обработки. На предприятиях широко применяют САПР в производстве сложных инструментов. ЭВМ конструирует вырубные инструменты и выдает управляющую программу непосредственно на металлообрабатывающий станок с учетом возможности эффективной передачи данных о сложных изогнутых поверхностях крупногабаритных листовых деталей. Организация снабжения СИО включает хранение, замену и диагностику состояния инструмента, а набор ее элементов зависит от типа оборудования и серийности производства. Эффективно работают многоцелевые станки с вместимостью магазинов на 100—170 инструментов. Иногда предусматривается разгрузка и загрузка инструментов, уложенных в кассеты.

Структура СИО развитой ГПС имеет в своем составе максимальный набор элементов, обеспечивающих автоматизацию всех процессов, связанных с эксплуатацией РИ в данной системе: центральный склад для режущего и вспомогательного инструментов; склад настроенных на размер комплектов

инструмента; систему диагностики; систему подачи изношенных инструментов на заточные станки с ЧПУ с последующей заточкой РИ и аттестацией их на измерительной машине.

Параллельно с усовершенствованием технических элементов СИО совершенствуется организация учета и хранения инструмента с использованием ЭВМ. Планирование требуемого количества инструментов, изготавливаемых силами предприятия, или покупных, а также снабжение инструментальными материалами связано с переработкой больших объемов информации для составления заявок на инструментальные стали, пластины твердых сплавов. В соответствии с нормативами рассчитывают нормы расхода инструмента на каждую деталь-операцию в технологических процессах на условное число деталей на один месяц и на годовой производственный план изделий по всем цехам предприятия.

*Совершенствование структуры СИО и его составных элементов осуществляется по следующим основным направлениям:*

- расширение набора технических средств;
- оптимизация временных транспортных потоков;
- индивидуализация управления;
- совершенствование средств диагностики и прогнозирования стойкости инструмента;
- учет расхода и планирование потребности в инструменте;
- оценка технико-экономических показателей.

Каждое из указанных направлений может быть представлено как составляющая причинно-следственной модели СИО, математическая интерпретация которой отображается в виде гиперграфа, где ребра  $r_n \in E$  и  $r_n \subset r_{ij}$ . Структура гиперграфа в компактной форме дает описание модели СИО с учетом ее технической реализации (рис. 3.3.33).

Область формирования основных элементов первого уровня причинно-следственной модели СИО, отображается графом

$$\eta = \bigcup_{j=1}^8 \eta_j = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_8\},$$

где каждая вершина определяет:

- $r_{11}$  (РИ) — тип или набор типов режущих инструментов;
- $r_{12}$  (ТСР) — технические средства реализации СИО;
- $r_{13}$  (ВТРП) — временные транспортные потоки РИ;
- $r_{14}$  (ПВРИ) — программно-математическое обеспечение выбора РИ;
- $r_{15}$  (ПУПР) — управляющие программы перемещения РИ в ТС;

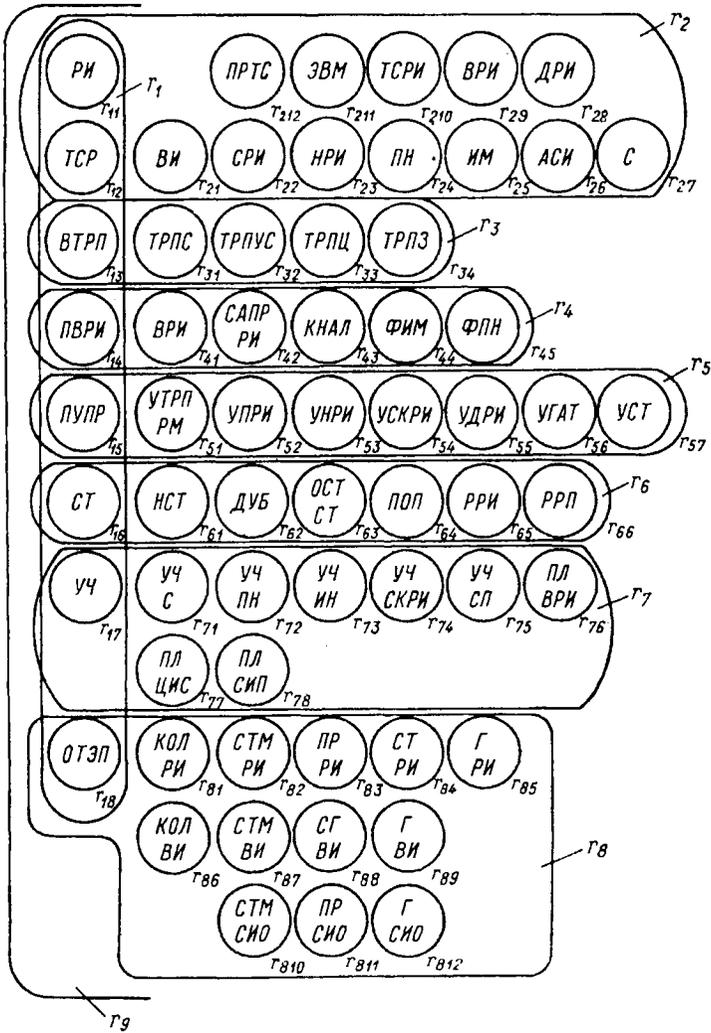


Рис. 3.3.33. Структура гиперграфа системы автоматизированного инструментального обеспечения (СИО)

$r_{16}$  (СТ) — система прогнозирования и фиксации стойкости РИ;

$r_{17}$  (УЧ) — система учета и планирования РИ;

$r_{18}$  (ТЭЦ) — технико-экономические показатели СИО.

Набор элементов области  $r_1$  дает типы РИ, которые выбираются в зависимости от структуры ТС и ТП. На гиперграфе (рис. 3.3.33) ребро  $r_1$  охватывает вершины, расположенные в левой вертикали, и как бы скрепляет воедино последующие горизонтально сформированные ребра  $r_2 - r_8$ , которые соответствуют подсистемам СИО. Их содержание определяется крайними левыми вершинами. Так, в области  $r_2$  сосредоточены вспомога-

тельные инструменты и механизмы реализации вспомогательных функций; в области  $r_3$  — временные связи транспортных потоков; в области  $r_4$  — программное обеспечение выбора РИ и т. д. Области формирования технических средств СИО представлены ребром  $r_2$ , в котором вершины отображают:  $r_{21}$  (ВИ) — вспомогательный инструмент или набор вспомогательного инструмента;  $r_{22}$  (СРИ) — система складов РИ и ВИ;  $r_{23}$  (НРИ) — система наладок РИ;  $r_{24}$  (ПН) — система промежуточных накопителей, предназначенных для подачи РИ на рабочее место;  $r_{25}$  (ИМ) — инструментальные магазины;  $r_{26}$  (АСИ) — системы автоматической смены РИ;  $r_{27}$  (С) — типы станков;  $r_{28}$  (ДРИ) — система диагностики

РИ;  $r_{29}$  (ВРИ) — система восстановления РИ;  $r_{210}$  (ТСРИ) — транспортные средства для перемещения РИ в ТС;  $r_{211}$  (ЭВМ) — тип вычислительных машин, применяемых в системе СИО;  $r_{212}$  (ПРТС) — прочие технические средства СИО.

**Инструментальная оснастка стаяков с ЧПУ сверлильно-расточной и фрезерной групп.**

Инструментальные блоки собирают на базе подсистемы вспомогательного инструмента для станков сверлильно-расточной и фрезерной групп (рис. 3.3.34, а), которая позволяет применять любой требуемый инструмент. Хвостовики инструментов (поз. 1—15) выполняются по ГОСТ 25827—93 (рис. 3.3.35. и табл. 3.3.16).

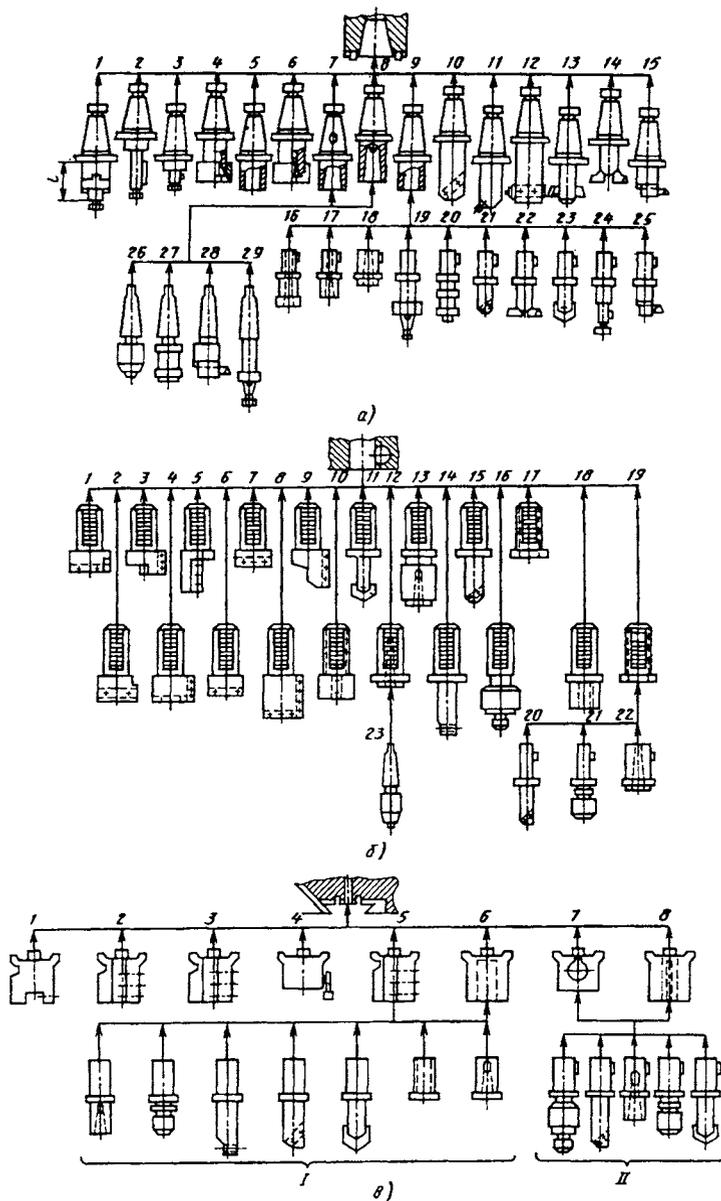


Рис. 3.3.34. Вспомогательные инструменты для станков с ЧПУ:

а: 1 - оправка для насадных фрез с поперечной шпанкой; 2 - оправка для насадных цилиндрических фрез с продольной шпанкой; 3 - оправка для насадных торцовых фрез с продольной шпанкой; 4 - патрон цанговый

## 3.3.16. Размеры хвостовиков (в мм) инструментов с конусностью 7:24

Обозначение конуса по ГОСТ 25827-93	$D$ (пред. откл. $\pm 0,15$ )	$D_1$	$D_2$ (пред. откл. по h12)	$D_3$ (пред. откл. по h8)	$D_4^*$ , не более	$d_1$	$d_2$ (пред. откл. по g5)	$L$ (пред. откл. по h11)	$l_1^*$ , не менее	$l_2$ (пред. откл. -0,3)	$l_3$	$a_1$ (пред. откл. $\pm 0,1$ )	$l$	Торцовое биение $B$ относительно $A$ (повышенной точности)	Торцовое биение $B$ относительно $A$ (нормальной точности)
30	50	31,75	46	55,07	44	13	4	68,4	8	15,5	6	5,6	8	0,01	0,02
40 <sup>1</sup>	63	44,45	58	69,4	55	17	5	93,4	10	18,5	8	6,6	10	0,01	0,02
45	80	57,15	74	87,61	68	21	6	106,8	13	24,0	10	9,2	12	0,01	0,02
50 <sup>1</sup>	100	69,85	94	107,61	85	25	6	126,8	16	30,0	11	9,2	12	0,01	0,02

<sup>1</sup> Хвостовики предпочтительного применения.

Примечание. Размеры  $D_4^*$  и  $l_1^*$  определяют пространство для захвата манипулятором.

Предусмотрена единая конструкция хвостовиков для станков как с автоматической сменой, так и ручной сменой инструмента. Место захвата манипулятором представляет собой канавку трапецеидальной формы с углом 60°. Фрезерование на фланце под углом 90° обеспечивает при автоматической замене расположение шпоночных пазов блока против шпонок шпинделя. Каждый вид вспомогательного инструмента имеет до 24 типоразмеров, различающихся длиной (рис. 3.3.35, а) и размерами посадочного места под режущий

инструмент. Допускаемое биение посадочного места для инструмента или регулируемой по длине оправки относительно хвостовика с конусностью 7:24 составляет 0,005 ... 0,01 мм. Для станков классов точности Н и П установлена степень точности хвостовиков АТ5, для станков классов точности В и А – АТ4. Вспомогательный инструмент изготавливают из стали 18ХГТ с цементацией и закалкой до твердости 53 ... 57 HRC, что обеспечивает достаточную долговечность и отсутствие деформаций после термической обработки.

Рис. 3.34 (продолжение): с диапазоном зажима 20-40 мм; 5 - втулка переходная для концевых фрез; 6 - патрон цанговый с диапазоном зажима 5-20 мм; 7 - втулка переходная для инструмента с конусом Морзе с лапкой; 8 - втулка переходная с конусом Морзе с резьбовым отверстием; 9 - державка для регулируемых патронов, втулок и оправок; 10 - оправка расточная для черного растачивания отверстий; 11 - оправка расточная для чистового растачивания; 12 - оправка сборная для чистового растачивания; 13 - оправка для подрезных пластин; 14 - головка расточная двухзубая; 15 - головка расточная универсальная; 16 - патрон регулируемый цанговый с диапазоном зажима 5-25 мм; 17 - втулка регулируемая с внутренним конусом Морзе; 18 - втулка регулируемая с внутренним конусом Морзе; 19 - оправка регулируемая для насадных зенкеров и разверток; 20 - патрон регулируемый резьбонарезной; 21 - оправка регулируемая для черного растачивания; 22 - оправка регулируемая расточная двухзубая; 23 - оправка регулируемая для крепления пластин первых сверл; 24 - оправка регулируемая для дисковых фрез; 25 - патрон расточной регулируемый; 26 - патрон сверлильный трехкулачковый с конусом Морзе; 27 - патрон резьбонарезной с конусом Морзе; 28 - патрон расточной с конусом Морзе; 29 - оправка для насадных зенкеров и разверток с конусом Морзе

б. резцедержатель: 1 - с перпендикулярным открытым пазом; 2 - с перпендикулярным закрытым пазом; 3 - с параллельным открытым пазом; 4 - с перпендикулярным и параллельным открытыми пазами; 5 - с осевым открытым пазом; 6 - с перпендикулярным открытым пазом для отрезных резцов; 7 - несимметричный с перпендикулярным открытым пазом; 8 - удлиненный с перпендикулярным открытым пазом; 9 - удлиненный с параллельным открытым пазом; 10 - втулка переходная; 11 - втулка перовое; 12 - втулка переходная с конусом Морзе; 13, 22 - втулка переходная (плавающая) с конусом Морзе; 14 - борштанга расточная с перпендикулярным пазом; 15, 20 - борштанга расточная с наклонным пазом; 16, 21 - патрон для метчиков; 17 - втулка переходная разжимная; 18 - втулка переходная со шпоночным пазом; 19 - втулка переходная укороченная со шпоночным пазом; 23 - патрон трехкулачковый;

в. резцедержатель: 1 - с открытым и закрытым параллельными пазами; 2 - с открытым перпендикулярным пазом; 3 - двухсторонний; 4 - распределитель охлаждающей жидкости; 5 - резцедержатель трехсторонний; 6 - резцедержатель для крепления инструмента с цилиндрическим хвостовиком со смешанным отверстием; 7 - держатель для крепления инструмента с цилиндрическим хвостовиком с отверстием, параллельным его базовой поверхности; 8 - держатель для крепления инструмента с цилиндрическим хвостовиком с отверстием, перпендикулярным его базовой поверхности; 1 - инструменты и переходные втулки, устанавливаемые в резцедержатель; 11 - инструменты и переходные втулки, устанавливаемые в держатели 7 и 8

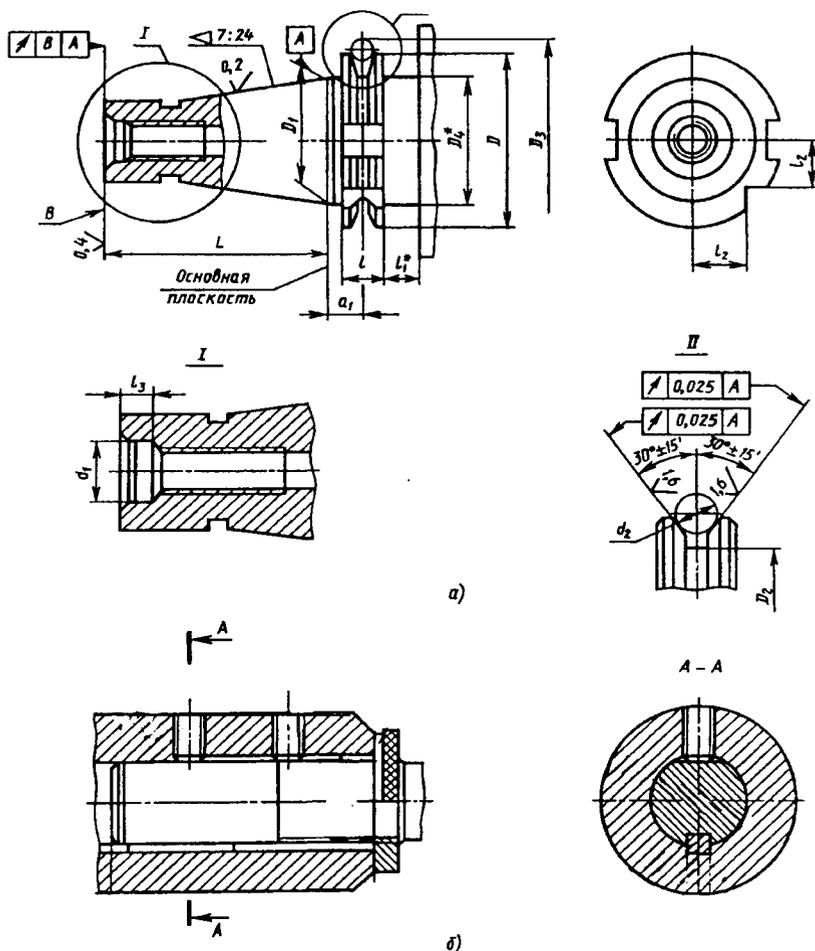


Рис. 3.3.35 Хвостовики вспомогательного инструмента для станков с ЧПУ сверлильно-расточной и фрезерной групп

Унифицированы цилиндрические хвостовики и посадочные размеры отверстий для блоков, регулируемых по длине (рис. 3.3.34, а, поз. 9 и 16—25). Конструкция и размеры цилиндрических хвостовиков приведены на рис. 3.3.35, б. Посадочное отверстие в державке (поз. 9) выполняется по 6-му квалитету.

Для закрепления инструментов с цилиндрическим хвостовиком подсистемой предусмотрены цанговые патроны и оправки с диапазонами диаметров хвостовиков 3 ... 25 мм и 20 ... 40 мм. Цанги имеют конусность 1:5, изготавливаются из стали 60С2А с термообработкой до твердости 49 ... 53 HRC. На станках сверлильно-расточной и фрезерных групп применяются как стандартные конструкции инструментов, так и выполненные по отраслевым стандартам и отличающиеся от стан-

дартных более точным изготовлением режущей и присоединительной части. Так, сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком диаметром 3 ... 20 мм для станков с ЧПУ отличаются от стандартных (ГОСТ 10902) уменьшенными допусками на симметричность сердцевины, осевое и радиальное биение режущих кромок. Хвостовики сверл выполнены цилиндрическими, без обратной конусности, что обеспечивает более надежное закрепление в цанговых патронах. Задняя поверхность выполняется либо двухплоскостной, либо винтовой. Обе эти формы задней поверхности обеспечивают снижение осевой силы на 15 ... 20 %, увеличивают стойкость и надежность сверла, точность отверстий за счет уменьшения разбивки и точность координат центров отверстий.

Кроме инструментов традиционной конструкции и номенклатуры, применяются инструменты, обладающие повышенными надежностью, точностью, регулируемые по размеру и комбинированные, обеспечивающие совмещение переходов, а следовательно, повышение эффективности оборудования. Примерами таких инструментов являются перовые сверла, более жесткие и прочные по сравнению со спиральными, обеспечивающие большую точность обработки и меньшую стойкость. При обработке коротких отверстий применяют сверла, оснащенные многогранными пластинами, обладающие высокой надежностью, точностью и обеспечивающие высокую производительность.

С целью сокращения номенклатуры инструмента применяют регулируемые по диаметру расточные головки (рис. 3.3.36, а) с диапазоном регулирования 12 ... 35 мм. Для обработки точных отверстий используют резцы-вставки с микрометрическим регулированием вылета, оснащенные припаянной или многогранной пластиной из твердого сплава (рис. 3.3.36, б). Конструкции вставок отличаются большим разнообразием. Конструкции комбинированных инструментов приведены на рис. 3.3.36, в.

Примеры инструментальных блоков, регулируемых по длине, даны на рис. 3.3.36, г-з. На рис. 3.3.36, г приведен блок с регулируемой оправкой для дисковых фрез диаметром 50 ... 80 мм и шириной 5 ... 16 мм; регулирование по длине 45 мм. На рис. 3.3.36, д и е показаны блоки для сверл с коническим и цилиндрическим хвостовиком, на рис. 3.3.36, ж — регулируемая оправка, оснащенная резцом-вставкой с микрометрическим регулированием вылета. На рис. 3.3.36, з приведен регулируемый резбонарезной патрон, предназначенный для нарезания резьбы метчиком в сквозных и глухих отверстиях. Патрон состоит из корпуса 4, сменного хвостовика 7, предохранительной шариковой муфты 5, выдвигного метчикодержателя 3, быстросменных вставок 2 для метчиков. Величина крутящего момента регулируется гайкой 6. Метчикодержатель возвращается в исходное положение после нарезания резьбы и выхода метчика из нарезанного отверстия с помощью пружины 8. Нарезание резьбы происходит путем самозатягивания метчика благодаря выдвиганию метчикодержателя. Замена вставки 2 производится нажатием на втулку 1 до совмещения оси канавки втулки с осью шарика 9.

Для закрепления блоков в шпинделе станка в резьбовое отверстие конуса 7:24 вворачивается болт со специальной головкой, которую захватывает цанговый зажим (рис. 3.3.36, з).

**Точность позиционирования и податливость инструментальных блоков.** Точность обработки отверстий в значительной степени зависит от точности позиционирования и проявляется в биении вершины лезвия расточного инструмента и податливости инструментальных блоков. Допустимые величины биения и податливости инструментальных блоков приведены в табл. 3.3.17. Указанная точность может быть получена правильным выбором конструкции и точности изготовления присоединительных поверхностей вспомогательного инструмента при соответствующей точности изготовления режущего инструмента.

Источником погрешностей позиционирования являются относительные биения присоединительных поверхностей блоков и перекосы в соединениях из-за допусков на точность изготовления присоединительных поверхностей.

Применение теоретико-вероятностных методов позволяет рассчитать биение инструмента, получаемое в результате погрешности изготовления вспомогательного инструмента.

Угловые погрешности звеньев (перекосы осей) и векторные погрешности (параллельное смещение осей, равное половине биения) элементов инструментальных блоков можно суммировать путем приведения перекосов осей к векторному виду в плоскости замыкающего звена (биение режущей части) через передаточное отношение, которое учитывает фактическую длину элемента блока.

Так, если известно, что биение контрольной оправки длиной 100 мм в цилиндрическом соединении, выполненном по 5-му качеству точности, составляет 3,2 мкм, то биение инструмента с вылетом 150 мм относительно соединения будет в 1,5 раза больше, и для данного элемента конструкции блока передаточное отношение  $A = 150/100 = 1,5$ .

Погрешность позиционирования вершины лезвия инструмента (половину биения) при установке блока в шпиндель станка можно рассчитать по формуле:

$$e_{\Sigma} = \frac{1}{k_{\Sigma}} \sqrt{\sum_1^n (e_i k_i A_i)^2},$$

где  $e_{\Sigma}$  — половина допуска биения режущей части как замыкающего звена;  $n$  — число элементов инструментального блока, влияющих на точность позиционирования, включая погрешности шпинделя станка и перекося в соединении конусов 7:24;  $e_i A_i$  — принятое за скалярную величину произведение векторной величины  $e_i$  на свое передаточное отношение  $A_i$ ;  $k_i$  — коэффициент относительного рассея-

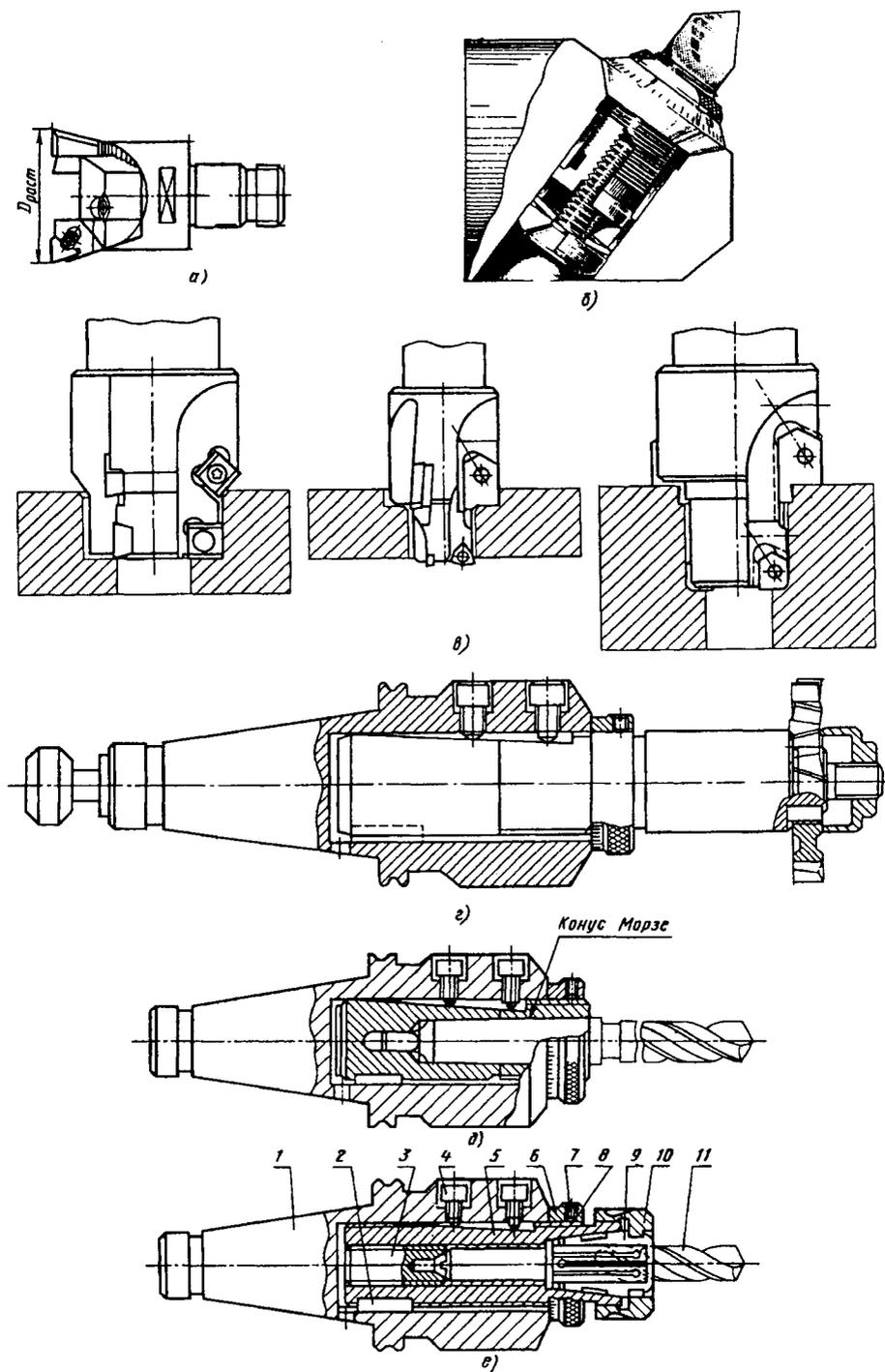


Рис. 3.3.36. Инструменты и инструментальные блоки станков с ЧПУ сверльно-расточной и фрезерной групп:  
 e: 1 - хвостовик; 2 - шпонка; 3 - упор; 4 - винт; 5 - хвостовик цангового патрона; 6 - регулировочная гайка;  
 7 - стопорный винт; 8 - подкладка; 9 - цанга; 10 - гайка; 11 - сверло;

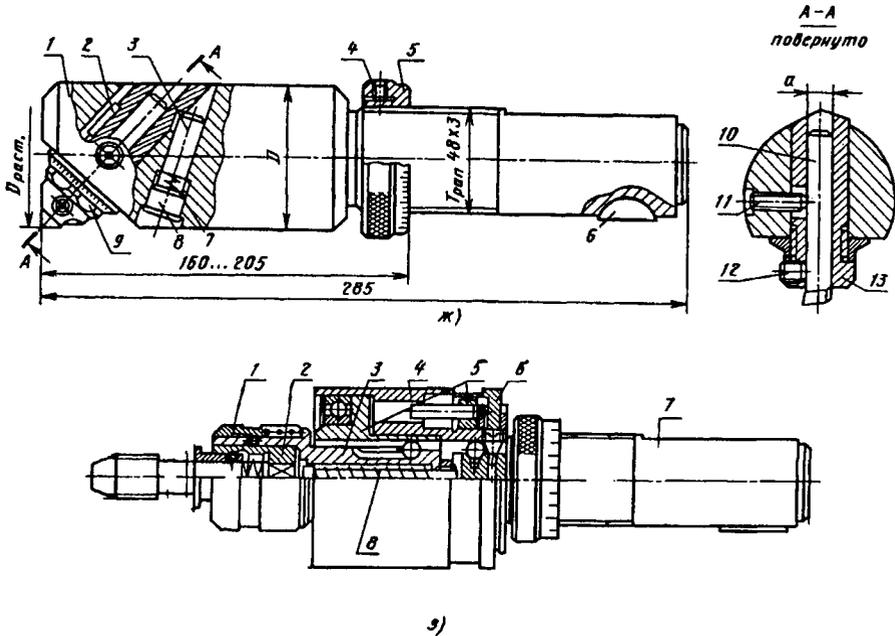


Рис. 3.3.36 (продолжение):

ж: 1 - корпус; 2 - шпонка; 3 - штифт; 4 - стопорный винт; 5 - гайка; 6 - шпонка;  
 7 - пружина; 8 - винт; 9 - гайка микрометрического регулирования; 10 - резец; 11 - винт крепления реза;  
 12 - винт; 13 - резцедержатель

ния размеров соединительных поверхностей вспомогательного инструмента;  $k_{\Sigma}$  — коэффициент относительного рассеяния замыкающего звена

$$k_{\Sigma} = 1 + \frac{0,55}{\sum_1^n e_i} \left[ \sqrt{\sum_1^n (e_i k_i)^2} - \sqrt{\sum_1^n e_i^2} \right]$$

### 3.3.17. Допустимое биение режущих кромок инструмента после установки инструментальных блоков в шпинделе станка и допустимая податливость блоков

Вид инструмента	Допустимое биение, мм	Допустимая податливость, мкм/Н
Сверла:		
с цилиндрическим хвостовиком диаметром 6–18 мм	0,056	0,292
с коническим хвостовиком диаметром 18–30 мм	0,071	0,186
Зенкеры и развертки:		
диаметром до 50 мм	0,062	—
диаметром до 120 мм	0,071	—
Расточные оправки:		
для полустойковой обработки отверстий диаметром 22 ... 180 мм	0,03	0,110
для чистовой обработки отверстий, диаметром, мм:		
25 ... 80	0,005	0,115
80 ... 180	0,01	0,075

Значения величин  $k_i$  и  $e_i$ , определяют по табл. 3.3.18 – 3.3.20.

Точность обработки зависит от деформации инструментальных блоков. Погрешности, вызванные деформацией инструментальных блоков, могут составлять до 60 % погрешности обработки. Деформация инструментальных блоков регламентируется допустимой податливостью, т. е. величиной деформации блока (в мкм/Н) в точке приложения силы. Допустимая податливость для некоторых видов инструментов в инструментальных блоках приведена в табл. 3.3.18.

Инструментальные блоки испытывают деформацию при изгибе или кручении деталей и деформацию контактных поверхностей элементов блока в местах соединений. Деформации первого вида противостоит объемная жесткость, деформации второго вида –

контактная жесткость. Объемная жесткость определяется по формулам сопротивления материалов. Контактная жесткость, влияющая на деформацию блока в месте приложения силы, зависит от величины и направления действующих сил, конструкции и точности изготовления сопряженных поверхностей и т.д.

Упругие контактные деформации в блоке под действием силы  $P$ , приложенной на расстоянии  $L$  от конца стыка,

$$y = \delta_0 + \Theta L,$$

где  $\delta_0$  – смещение на краю стыка в результате контактной податливости, мкм;  $\Theta$  – угол поворота в стыке, зависящий от конструкции соединения, мкм/мм. Для конических поверхностей

### 3.3.18. Значения коэффициентов $k_i$

Способ получения поверхности	Поверхность	$k_i$
Наружное шлифование в центрах	Конусная (конус Морзе)	1,17
	Конусная (7:24)	1,51
	Конусная (1:5)	1,37
	Цилиндрическая	1,09
Внутреннее шлифование	Конусная (конус Морзе)	1,17
	Конусная (7:24)	1,17
	Конусная (1:5)	1,37
	Цилиндрическая	1,09
Бесцентровое шлифование	Конус Морзе	1,03

### 3.3.19. Значение биения $2e$ инструмента на вылете 100 мм в зависимости от погрешности изготовления конусов, мкм

Конусность	Степень точности конусов							
	AT3	AT4	AT5	AT6	AT7	AT8	AT9	AT10
7:24	1	1,2	1,3	2,6	5	12	–	–
Конус Морзе (1:20)	–	–	9,5	10,5	15,0	18,0	20,0	24,5
1:5	–	–	8	9,0	10	12	13	17

### 3.3.20. Биения $2e$ инструмента на вылете 100 мм в зависимости от погрешности изготовления цилиндрических соединений, для соединений $\varnothing 30 \dots 50$ мм

Квалитет точности изготовления	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9
Биение $2e$ , мкм	2,0	3,2	6,4	8,6	12,0	24,0

$$\delta_0 = \frac{4P\beta c}{\pi D} (\beta Lc_1 + c_2);$$

$$\Theta = \frac{4P\beta^2 c}{\pi D} (\beta Lc_3 + c_1);$$

$$\beta = \sqrt[4]{1/(13cD^3)},$$

где  $c$  — коэффициент контактной податливости, мкм·см<sup>2</sup>/Н (для конусов Морзе  $c = 0,003 \dots 0,006$  мкм·см<sup>2</sup>/Н; для конусов 7:24  $c = 0,002$  мкм·см<sup>2</sup>/Н);  $c_1, c_2, c_3$  — коэффициенты, учитывающие изменение диаметра по длине конического соединения (для конусов Морзе  $c_1 = c_2 = c_3 = 1$ ; для конусов 7:24  $c_1 = c_2 = 1,35$  и  $c_3 = 1$ );  $D$  — диаметр соединяемых поверхностей.

В тех случаях, когда поверхности стыков шлифованные и имеют высокую твердость, величиной  $\delta_0$  можно пренебречь; при расчете контактной деформации можно учитывать только угол поворота в стыке. В этом случае  $y = \Theta L$ .

Приведенные выше формулы не учитывают погрешности в коническом соединении, поэтому для инженерных расчетов значения угла поворота  $\Theta/M$  под действием момента 1 кН·м выбираются по табл. 3.3.21–3.3.24. Величина деформации блока под действием силы, нормальной к его оси,

$$Y = P \sum_1^n \left[ \frac{\left( \sum_1^n l_i \right)^3}{3EI_i} + \frac{\Theta}{10^3 M} \left( \sum_1^n l_i \right)^2 \right],$$

где  $P$  — нагружающая сила, Н;  $l_i$  — длина  $i$ -го элемента вспомогательного инструмента, мм;  $n$  — число элементов;  $E = 2,1 \cdot 10^2$  ГПа — модуль продольной упругости;  $I_i$  — осевой момент инерции  $i$ -го элемента, мм<sup>4</sup>;  $\Theta/M$  — угол поворота  $i$ -го соединения, (кН·м)<sup>-1</sup>.

Податливость блока  $\Pi = y/P$ , мм/Н.

### 3.3.21. Значения угла поворота $\Theta/M$ (кН·м)<sup>-1</sup> в конусах Морзе

Номер конуса	Исполнение	Точность изготовления		
		AT7	AT8	AT9
1	С лапкой	0,2012	0,2097	0,2110
2	С резьбой	0,0433	0,0436	0,0462
	С лапкой	0,0447	0,0476	0,0499
3	С резьбой	0,0118	0,0124	0,0136
	С лапкой	0,0124	0,0141	0,0157
4	С резьбой	0,0034	0,0038	0,0046
	С лапкой	0,0046	0,0052	0,0055
5	С резьбой	—	0,0008	—
6	С резьбой	—	0,00027	—

### 3.3.22. Значения угла поворота $\Theta/M$ (кН·м)<sup>-1</sup> в конусах 7:24

Номер конуса	Точность изготовления			
	AT5	AT6	AT7	AT8
40	0,00121	0,00133	0,00142	0,00191
50	0,00020	0,00027	0,00035	—

3.3.23. Значения угла поворота  $\Theta/M$  (кН·м)<sup>-1</sup> в цилиндрических соединениях

Диаметр соединения, мм	Зазор в соединении, мм	Направление внешней силы	
		совпадает с силой затяжки винтов	перпендикулярно к силе затяжки винтов
36	0,014	0,032	0,006
	0,037	0,041	0,0079
48	0,014	0,001	0,0014
	0,026	0,012	0,0032
	0,048	0,016	0,0062

3.3.24. Значения угла поворота  $\Theta/M$  (кН·м)<sup>-1</sup> в цанговом зажиме

Диаметр хвостовика, мм	Стык цанга-корпус патрона	Стыки хвостовик инструмента - цанга - корпус патрона
40	0,001	0,0026
20		0,0029
20	0,0019	0,038
16		0,040
12		0,047
10		0,056
6		0,0103

**Модульный принцип конструирования инструментальных блоков.** Недостатки подсистемы вспомогательного инструмента для станков сверлильно-расточной и фрезерной групп следующие:

применение большого числа типоразмеров, причем коэффициент использования каждого типоразмера невелик;

не может быть использована при обработке некоторых ступенчатых отверстий.

Эти недостатки устраняются, если применить модульный принцип конструирования инструментальных блоков, заключающийся в том, что вспомогательный инструмент делается не цельным, а сборным, состоящим из стандартных модулей.

Таковыми стандартными модулями являются:

державки с посадочным местом для установки в шпиндель станка и посадочным местом для инструмента или удлинителя;

удлинители, обеспечивающие необходимую длину блока;

переходники, позволяющие изменять диаметр блока;

инструментальные головки.

Основной проблемой в создании модульного инструмента является разработка соединительного элемента, который должен

обеспечить не только соединение отдельных частей инструмента, но и достаточные жесткость, точность и повторяемость размеров инструмента. Большинство разработанных систем используют соединение, в котором базирующими поверхностями являются цилиндрические поверхности длиной, равной диаметру, и торцовые поверхности с торцовым биением около 0,001 мм. Соосно с цилиндрической поверхностью располагается резьбовая часть с крупным шагом. Сборка модулей осуществляется ввинчиванием одной части в другую до затяжки по торцовой поверхности. Точность цилиндрических направляющих поясков соответствует 5-му качеству, а отверстий — 6-му качеству. Твердость элементов 52 ... 58 HRC; параметр шероховатости  $Ra < 0,2$  мкм.

Инструментальные блоки, спроектированные из стандартных модулей, по сравнению с цельными, обладают повышенной динамической устойчивостью, так как возникающие вибрации гасятся стыками, но их жесткость на 20 ... 30 % ниже жесткости цельных блоков.

Модульный принцип построения инструментальных блоков увеличивает коэффициент использования каждого модуля и обеспечивает снижение расходов на инструментальную оснастку.

**Инструментальная оснастка станков с ЧПУ токарной группы.** Для компоновки инструментальных блоков на станках с револьверной головкой и ручной сменой инструмента применяется подсистема вспомогательного инструмента с цилиндрическим хвостовиком и лыской, на которой имеются рифления (см. рис. 3.3.34, б).

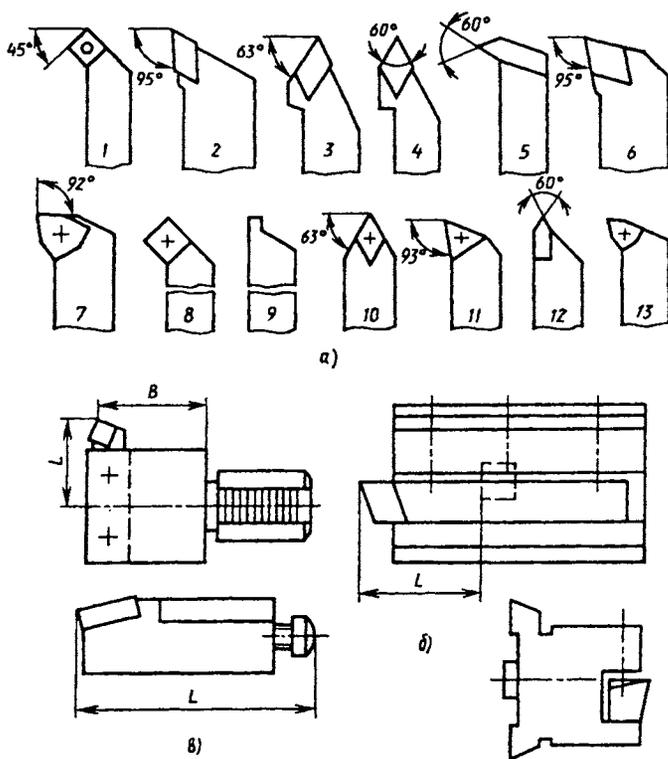
Базирование резцедержателя производится по цилиндру хвостовика, обеспечивающему точную угловую установку, и торцу. Крепление блока в револьверной головке проводится с помощью клина, который имеет рифления, смещенные относительно рифлений хвостовика.

В подсистеме резцедержатели 1—9 позволяют крепить резцы сечением от  $16 \times 16$  до  $40 \times 40$  мм. Для обработки наружных поверхностей используются резцедержатели 1, 2, 4, 7—9. Резцедержатели 3 и 5 могут быть использованы для креплений инструмента для обработки внутренних поверхностей. Все резцедержатели обеспечивают подвод СОЖ от револьверной головки к вершине резца. Пе-

реходная втулка 10 позволяет крепить режущий инструмент круглого сечения диаметром 16 ... 40 мм. Для крепления инструмента с конусами Морзе предназначены жесткие 12 или плавающие 13 переходные втулки. Нарезание резьб метчиком проводится с использованием патронов для метчиков, конструкция которого аналогична приведенной на рис. 3.3.36, з.

Подсистема вспомогательного инструмента с базирующей призмой (см. рис. 3.3.34, в) используется также на станках, имеющих револьверную головку.

Подсистема обеспечивает высокую жесткость инструментальных блоков. Резцедержатель 1 с открытым и закрытым пазами предназначен для крепления резцов сечением от  $16 \times 16$  до  $40 \times 40$  мм. Резцедержатель двухсторонний и может быть использован при любом положении револьверной головки и любом направлении вращения шпинделя. Резцедержатель 2 с открытым перпендикулярным пазом позволяет вынести режущий инструмент



**Рис. 3.3.37. Резцы и инструментальные блоки токарных станков с ЧПУ:**  
 а - минимально необходимая номенклатура резцов для токарных станков с ЧПУ;  
 б - конструкции резцовых блоков; в - резец-вставка, настраиваемая на размер вне станка

за пределы габаритов револьверной головки, улучшая технологические возможности станка. Большой универсальностью обладают трёхсторонние резцедержатели 5, которые позволяют крепить два инструмента. Резцедержатель 6 предназначен для крепления инструмента с цилиндрическим хвостовиком диаметром 30 ... 60 мм. Держатели 7 и 8 также предназначены для крепления инструментов с цилиндрическим хвостовиком.

Достоинством рассмотренных подсистем вспомогательного инструмента является возможность применения резцов, используемых на универсальных станках.

Номенклатура резцов, применяемая на станках с ЧПУ, приведена на рис. 3.3.37, а. Настройка блоков (рис. 3.3.37, б) на размер осуществляется на приборах БВ-2011 с установкой вершины резца с точностью до 0,01 мм в перекрестии окуляра микроскопа.

На некоторых типах станков применяют резцовые вставки с регулировочными винтами (рис. 3.3.37, в) и креплением их в револьверных головках клиновидными сухарями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорев Н.Н., Фетисова З.М. Обработка резанием тугоплавких сплавов. М.: Машиностроение, 1966. 225 с.
2. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение. 1984. 272 с.
3. Инструментальные системы автоматизированного производства: Учебник / Р.И. Гжиров, В.А. Гречишников, В.Г. Логашов и др. СПб.: Политехника. 1996. 399 с.
4. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение. 1974. 240 с.
5. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: Справочник. М.: Машиностроение. 1983. 359 с.
6. Лашнев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструментов с применением ЭВМ. М.: Машиностроение. 1980. 208 с.
7. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. М.: Машиностроение. 1975. 391 с.
8. Металлорежущие инструменты: Учебник / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. М.: Машиностроение. 1989. 328 с.
9. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа. 1986. 304 с.
10. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. М.: Машиностроение. 1979. 167 с.
11. Палей М.М., Дибнер Л.Г., Флид М.Д. Технология шлифования и заточки режущего инструмента. М.: Машиностроение. 1988. 288 с.
12. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами и их применение: Справочник / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант и др. М.: Машиностроение. 1987. 320 с.
13. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов. Киев: Вища школа. 1990. 424 с.
14. Сверхтвердые материалы / Под общ. ред. И.Н. Францевича. Киев: Наук. Думка. 1980. 296 с.
15. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение. 1987. 846 с.
16. Справочник конструктора-инструментальщика / Под ред. В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение. 1994. 560 с.
17. Справочник технолога / Под ред. А.А. Панова. М.: Машиностроение. 1988. 736 с.
18. Справочник машиностроителя / Под ред. Э.А. Сателъ. Т5. М.: Машиностроение. 1964. 450 с.
19. Таратынов О.В. и др. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ. М.: Высшая школа. 1991. 423 с.
20. Юликов М.И. и др. Проектирование и производство режущего инструмента. М.: Машиностроение. 1987. 296 с.

## РАЗДЕЛ 4

# ТИПИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ГРУППОВАЯ ОБРАБОТКА

### Глава 4.1

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

##### 4.1.1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В зависимости от характеристик потока изделий, проходящих через производственную систему, по конструкторскому и технологическому сходству возможны различные формы реализации технологических процессов, схема образования которых представлена на рис. 4.1.1.

*Единичный технологический процесс* проектируется для изготовления изделий одного наименования, объем выпуска которых обеспечивает эффективное изготовление их по заданному критерию: себестоимости, производительности, показателям качества, срочности поставки, уникальности достигаемых параметров.

*Типовой технологический процесс* проектируется на типовые конструкции, заведомо технологически однородные в пределах конструкторских или технологических типов, групповой - на конструкторски различные, но технологически однородные изделия. Оба этих вида объединяются термином - унифицированный технологический процесс.

*Технологически однородными* считаются изделия, для которых изменения конструкторских параметров ограничены такими пределами, что остаются неизменными параметры технологического процесса, сложные в переналадке, и изменяются легко переналаживаемые. По этим признакам создаются технологические типы, которые могут объединять несколько конструкторских типов, и комплектуются группы конструкторски различных изделий. Полная переналадка оборудования делается на технологический тип или группу, а в пределах этих объединений изделий осуществляется только

подналадка путем изменения положений инструментов, смены простых инструментов, замены базирующих, направляющих, зажимных, исполнительных элементов приспособлений, перепрограммирования траекторий перемещений инструментов, задания новых режимов работы. Тем самым достигается экономия подготовительно-заключительного времени в несколько раз, и она растет по мере насыщения групп изделиями.

В результате оказывается выгодным переводить на специализированное оборудование изготовление изделий партиями в десятки штук, в то время как для единичной технологии их должно быть несколько сотен, а также открывается возможность автоматизации серийного и единичного производства на базе дешевых автоматов с простыми и эффективными устройствами управления.

При группировании производится искусственное укрупнение партий изделий в типах и группах, что дает возможность применять наиболее совершенные технологии, заимствованные из массового производства, в серийном и единичном. Группирование осуществляется с таким расчетом, чтобы добиться экономии всех видов ресурсов по важнейшим источникам: прогрессивные методы изготовления, специализация оборудования, многократное применение оснастки, сокращение расхода инструментальных материалов, поточная организация, ускорение проектно-конструкторских работ за счет заимствования заранее подготовленных технологий и оснастки, повышение технологичности конструкций при условии отнесения их к типу или группе, постоянная готовность производства к освоению новых конструкций изделий, лишь бы они попали в тип или группу, на которые настроено оборудование.

**Особенности проектирования унифицированных технологических процессов.** Проектирование технологии на совокупность изделий усложняется из-за необходимости учета большого разнообразия их характеристик для типа и группы. Возникающие сложности преодоле-

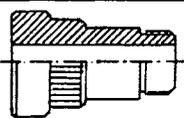
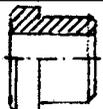
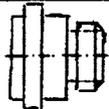
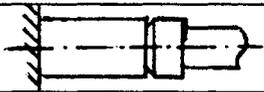
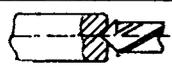
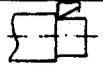
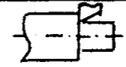
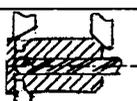
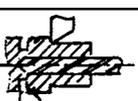
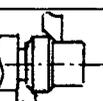
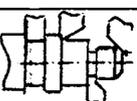
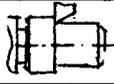
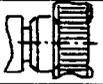
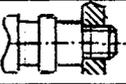


Рис. 4.1.1. Схема образования организационных форм реализации технологических процессов

ваются: за счет комплектования типов и групп по условию технологической однородности; путем конструирования типового представителя и комплексной детали для типа из группы, которые охватывают все элементы обработки совокупности. Однородность сказывается в незначительности изменений технологии и простоте подналадки. Проще всего менять положение инструментов и их траекторию, оставляя неизменными приспособления, элементы управления, станки. Меняя места крепления, вылет, длины ходов, можно получать разные размеры поверхностей в пределах типа. Удаляя инструменты из рабочих гнезд и заменяя их, удается менять форму деталей в группе.

В табл. 4.1.1 показана группа деталей и операционная технология их обработки на токарном автомате. Обработка на автомате по единичной технологии оказывается невыгодной из-за малых партий деталей, а в группе происходит суммирование объемов выпуска до размеров, обосновывающих такую технологию. Конструкции деталей различны: втулки и пробки. Технологическая однородность состоит в том, что разные поверхности получают одинаковыми рабочими движениями: продольными или поперечными. Они задаются кулачками револьверной головки, переднего, верхнего и заднего суппортов, которые являются дорогими и сложными в переналадке.

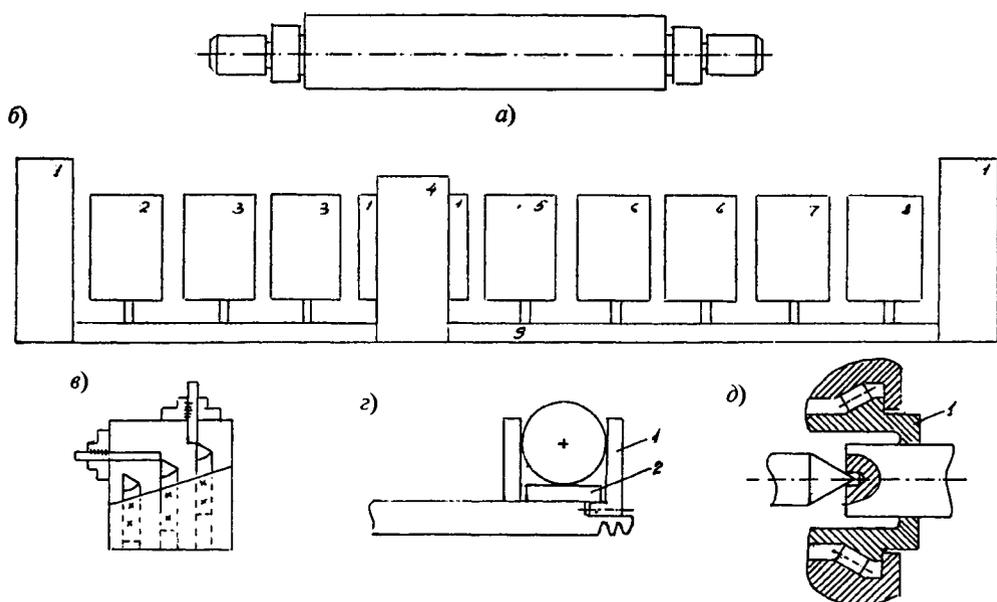
## 4.1.1. Групповая технологическая операция обработки деталей на токарном автомате

Эскиз комплексной детали				
Эскизы деталей группы				
Подача прутка на упор				
Центровка обтачива-ния при продольном ходе				
Сверление, точение, снятие фасок продольным ходом, протачивание канавок поперечным ходом				
Точение, нарезание резьбы, накатка продольным ходом				
Растачивание и снятие фаски продольным ходом				
Отрезка поперечным ходом				

Кулачки проектируются на комплексную деталь, имеющую полный набор движений и наибольшие рабочие ходы в технологическом процессе, устанавливаются при наладке на группу и не меняются при подналадке. Подналадка сводится к регулированию положения инструментов, их замене и удалению из рабочих гнезд. Для простой детали набор движений и длины ходов уменьшатся по сравнению с комплексной. Однако все заданные кулачками движения будут выполнены для каждой детали. Отсутствие инструментов в рабочих гнездах и укороченные их ходы приводят к тому, что появляются дополнительные холостые движения и соответственно увеличиваются потери времени. Обработка детали в группе будет экономичной, если дополнительные потери времени на холостые ходы не превысят сокращения времени на замене переналадки подналадкой.

Детали, относящиеся к одному типу, имеют ограниченные размерные различия, не влияющие на технологию. На рис. 4.1.2, а показан типовой вал. Технологический про-

цесс включает одинаковые операции для всех деталей типа. При значительных суммарных объемах выпуска, обеспечивающих полную загрузку автоматического оборудования, обосновывается создание специализированной автоматической линии, схема которой представлена на рис. 4.1.2, б. В начале, середине и конце ее расположены магазины 1 загрузки, выгрузки и накопления. Обработка начинается на агрегате 2 подрезки торцов и сверления центровых отверстий. Затем идут операции токарной обработки 3 с разных сторон, термическая обработка 4, правка торцов 5, шлифование точных поверхностей 6, сверлильно-фрезерная обработка 7, контроль 8. Межоперационный транспорт осуществляет конвейер 9. Подналадка на конкретный типоразмер состоит в регулировании размеров. Она осуществляется вне станка, например для резцов по схеме рис. 4.1.2, в, с последующей заменой блока или непосредственно на станке, например для манипулятора (рис. 4.1.2, г) с помощью подвижного угольника 1 и подкладки 2, а для патрона - путем замены цанги 1 (рис. 4.1.2, д).



**Рис. 4.1.2. Схемы типового технологического процесса обработки валов на автоматической линии:**  
 а - пример типового вала; б - структура автоматической линии;  
 в - настройка блока резцов на размер вне станка; г - элементы поднастройки схвата манипулятора;  
 д - элементы поднастройки зажимного патрона

Проектирование технологии ведется для типового представителя или комплексной детали, которые концентрируют в себе характеристики типа или группы и заменяют собой всю совокупность деталей. Это упрощает процесс проектирования, который ведется по обычной методике, применимой для единичной технологии. Отличие состоит в том, что суммирование объемов выпуска в пределах типа и группы позволяет принимать в качестве образцов технологии массового производства с высоким уровнем оснащенности процесса, автоматизации и организации. Отличия в технологии каждой детали отражаются в картах наладки.

**Унификация технологических процессов в системе группового производства.** Приведение в действие всех источников экономии благодаря унификации технологических процессов достигается в рамках группового производства, которое представляет собой организационную форму предприятия, основанную на сквозной унификации производственного процесса, охватывающего все стадии технической подготовки производства: проектирование, конструирование, планирование, организацию и все переделы производства (изготовление заготовок, обработку деталей, сборку, настройку и испытание изделий). Групповое производство позволяет разрешить основное

противоречие развития предприятий, состоящее в необходимости расширения номенклатуры выпускаемых изделий для удовлетворения разнообразных потребностей при сохранении высокого уровня организации и автоматизации, достигнутых в однономенклатурном массовом производстве. Это свойство сделало групповое производство базой для развития гибких производственных систем, которые добавляют к прежним достижениям роботы, ЭВМ, микропроцессорное управление. Эффективность группового производства обеспечивается высокой конкурентоспособностью предприятия, достигаемой за счет ускоренного освоения новых видов продукции и снижения себестоимости.

Характер технологической подготовки производства меняется в зависимости от уровня организации и стадии функционирования группового производства. На рис. 4.1.3 представлен алгоритм организационной стадии. Он начинается с классификации (блок 1), имеющей целью выделить изделия для единичного производства путем сравнения станкоемкости  $T_c$ , рассчитанной по аналогам, с установленным нормативом эффективности  $T_{н.ед}$ . Затем с блока 4 ведется группирование по условию  $U$  выполнения норматива эффективности  $T_{н.гр}$ , задающего необходимый по производственным условиям уровень загрузки

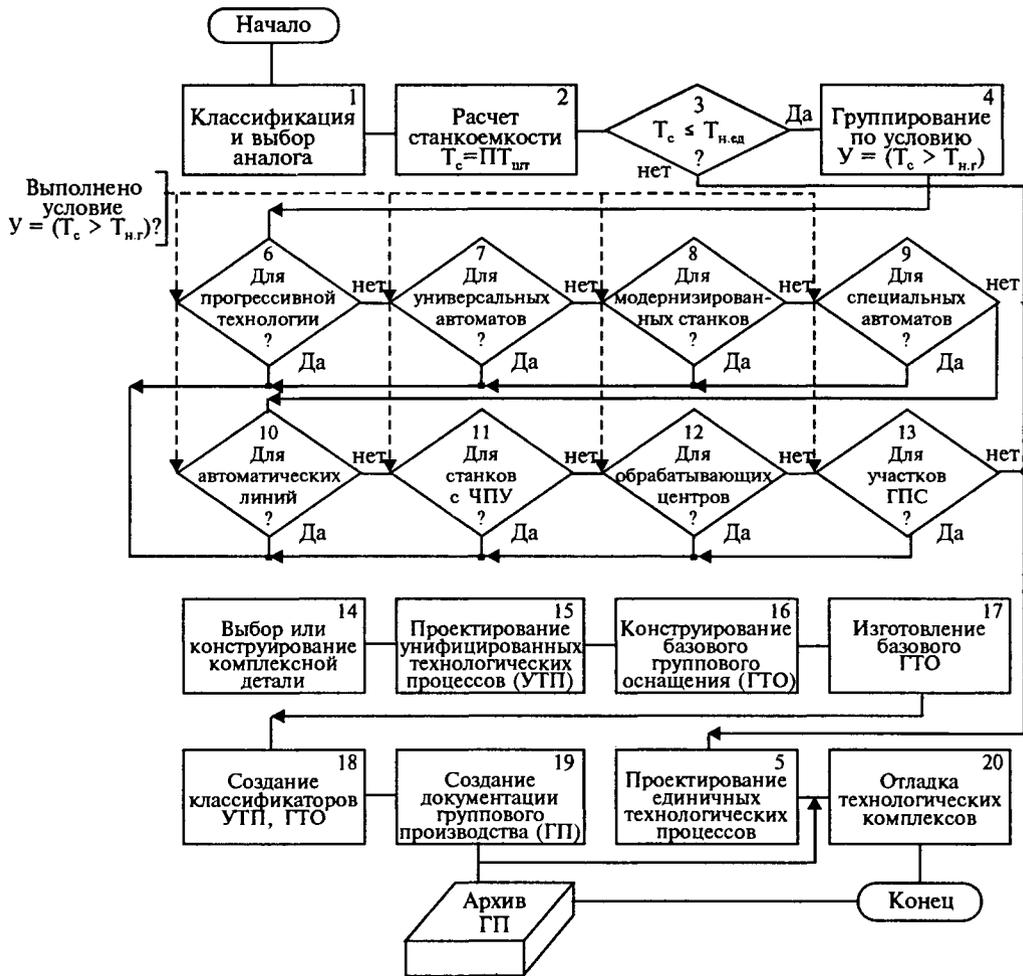


Рис. 4.1.3. Блок-схема алгоритма организации технологической подготовки группового производства

оборудования изготовлением изделий группы. Оптимальность состава групп достигается за счет последовательного включения в план наиболее эффективных мероприятий из классификационного ряда, в котором они расположены по уменьшению эффективности. Ряд представлен в схеме блоками 6-13. Наибольшая эффективность у прогрессивной технологии, затем она снижается из-за увеличения затрат на оснащение.

Проектирование технологии начинается с создания комплексной детали или изделия (блок 14), несущих в себе все конструкторские элементы группы. Для комплексного изделия по общепринятой методике проектируется технологический процесс, охватывающий изготовление всей группы, и конструируется базовое групповое оснащение (блок 16). Этап создания группового производства включает

изготовление базового оснащения и отладку технологических комплексов, а завершается систематизацией разработанных унифицированных технологических процессов (блок 18) и выпуском документации по организации группового производства.

Алгоритм функционирования группового производства на стадии запуска в производство изделий представлен на рис. 4.1.4. В отличие от предшествующей стадии классификация ведется путем адресования к действующим процессам и прежде всего на специализированных линиях и участках, как дающих наибольший эффект от унификации (блоки 1-3). Проектирование рабочей документации сводится к корректировке унифицированных процессов, конструированию сменных элементов к базовым приспособлениям с контролем насыщенности групп по



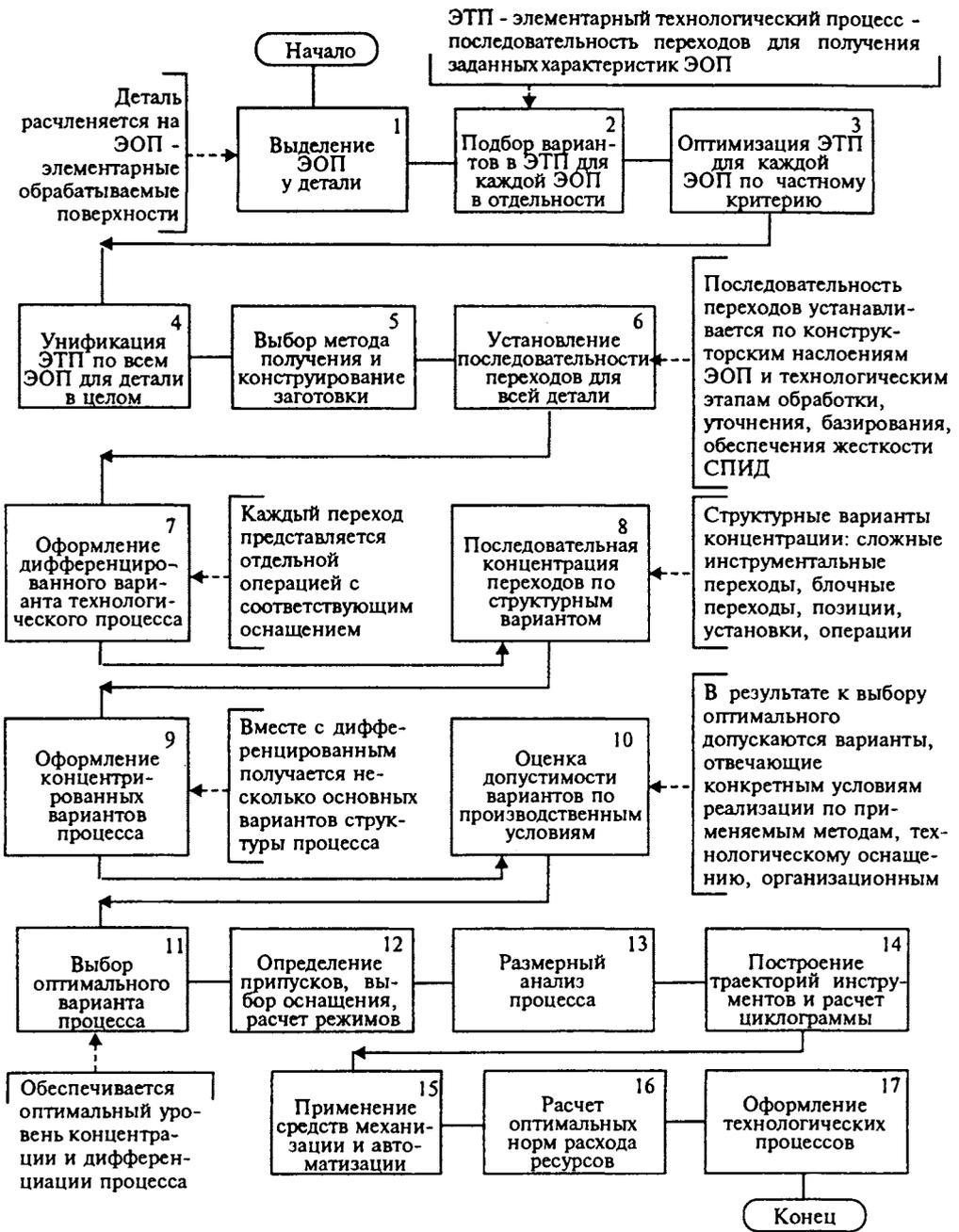


Рис. 4.1.5. Блок-схема алгоритма аналитического метода проектирования технологии

Конструкторские закономерности заложены в пространственном наслоении поверхностей и соединениях пар деталей. Они выявляются путем построения схем вхождения

отдельных поверхностей в общую структуру детали и деталей в узлы.

Технологические закономерности, прежде всего, устанавливаются этапами переделов:

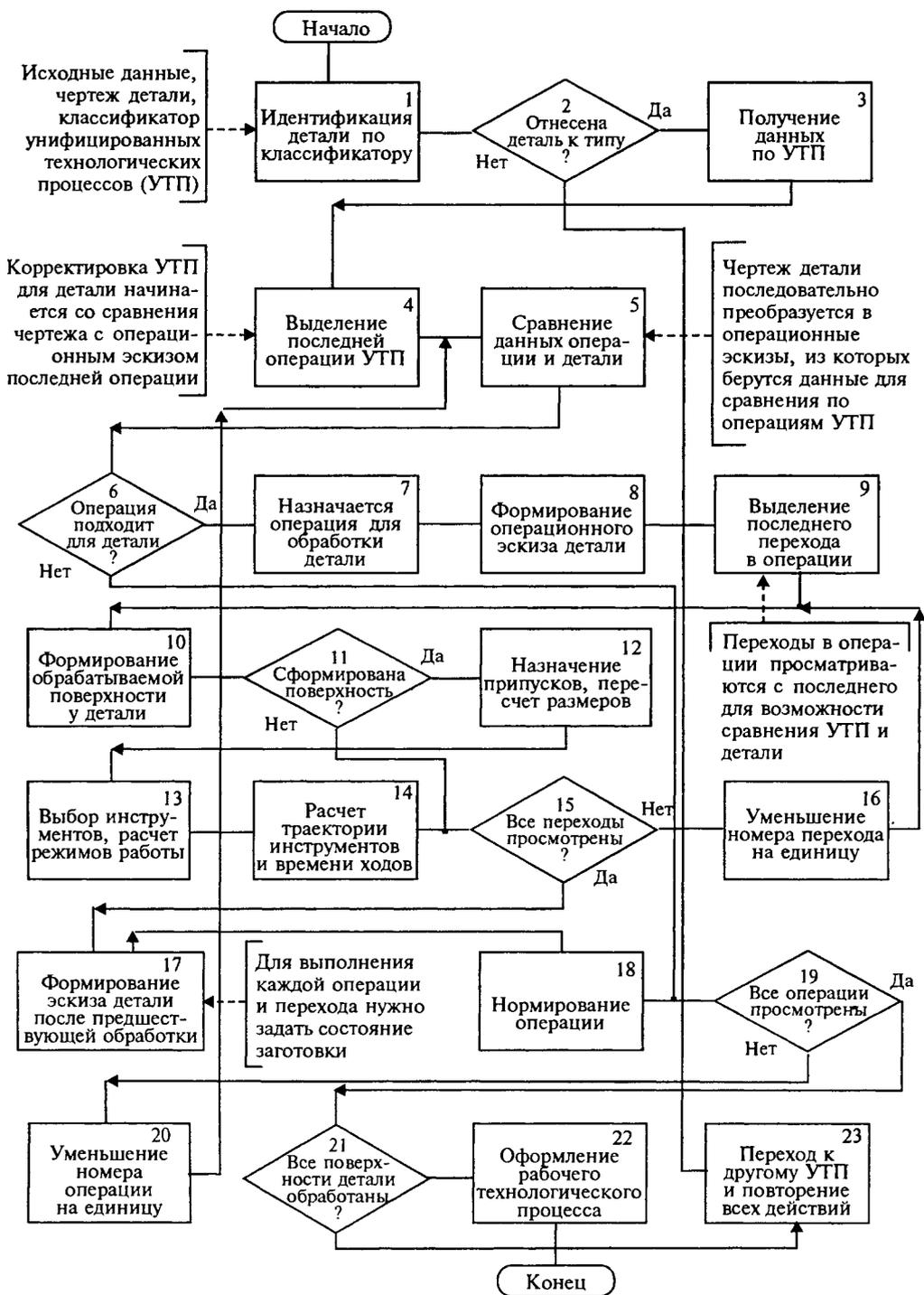


Рис. 4.1.6. Блок-схема алгоритма аналогового метода проектирования технологии

заготовительного, термохимического, предварительной, основной, окончательной, финишной обработки. В пределах каждого из них имеются детализированные правила последовательности выполнения переходов.

Совместное использование конструкторских и технологических закономерностей приводит к расположению всех переходов в единый технологический процесс, построенный на основе дифференциации, так как при этом работа каждого простого инструмента выделяется в отдельную операцию.

В блоке 8 порождаются концентрированные варианты технологического процесса за счет перехода от простых инструментов к сложным, к блочным переходам, к позициям, установкам и операциям. Теперь имеется возможность выбрать оптимальный вариант структуры из всех возможных вариантов, что и делается в блоках 10-11. По выбранному варианту решаются остальные технологические задачи и выпускается документация. Аналитическая методика сложна, но позволяет решить проблему оптимальной унифицированной технологии, которая принимается в качестве образца для разработки рабочих технологических процессов.

Принципиальная схема алгоритма аналогового метода проектирования приведена на рис. 4.1.6. В первом блоке среди унифицированных технологических процессов ведется поиск аналога для конкретной детали. Как только он найден, появляется полный набор технологических данных, применимость которых нужно оценить путем сравнения чертежа детали и операционных эскизов процесса, и необходимо пересчитать режимы работы. Сравнение начинается с последнего перехода последней операции, выходные данные которого сопоставимы с чертежом детали (выполняется в блоках 4 и 9), а затем ведется последовательная корректировка данных унифицированного процесса посредством формирования операционных эскизов обработки детали по схеме образца.

Если операция нужна, то идет попережное сравнение поверхностей чертежа и операционных эскизов с оставлением тех из них, которые нужны для детали (блоки 10 и 11). Процедуры сравнения и корректировки повторяются до тех пор, пока все операции и переходы не будут просмотрены на предмет применимости для конкретной детали. Для каждого этапа просмотра формируется эскиз предшествующего состояния детали, который как бы заменяет чертеж для промежуточных состояний обработки. Это осуществляется в блоке 17, связывающим отдельные циклы проектирования. Завершение цикличности просмотра технологии аналога контролируют блоки 15 и 19.

На последнем этапе проектирования решается вопрос полноты обработки детали по выбранному аналогу (блок 21) с тем, чтобы не допустить огрехов в разработанном технологическом процессе и в случае необходимости перейти к другому аналогу (блок 23). Основное преимущество метода состоит в простоте проектных процедур, а недостаток - в суженности области применения, ограниченной разработанными аналогами. Оптимальность получаемых технологий в значительной степени определяется качеством унифицированных технологических процессов, которые оптимизируются по аналитическому методу.

#### 4.1.2. РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

*Модульная технология - это новый вид технологии, основанной на представлении детали совокупностью модулей поверхностей (МП) и построении технологического процесса детали из модулей технологического процесса изготовления (МТИ), являющихся законченными частями процесса по изготовлению МП [9].*

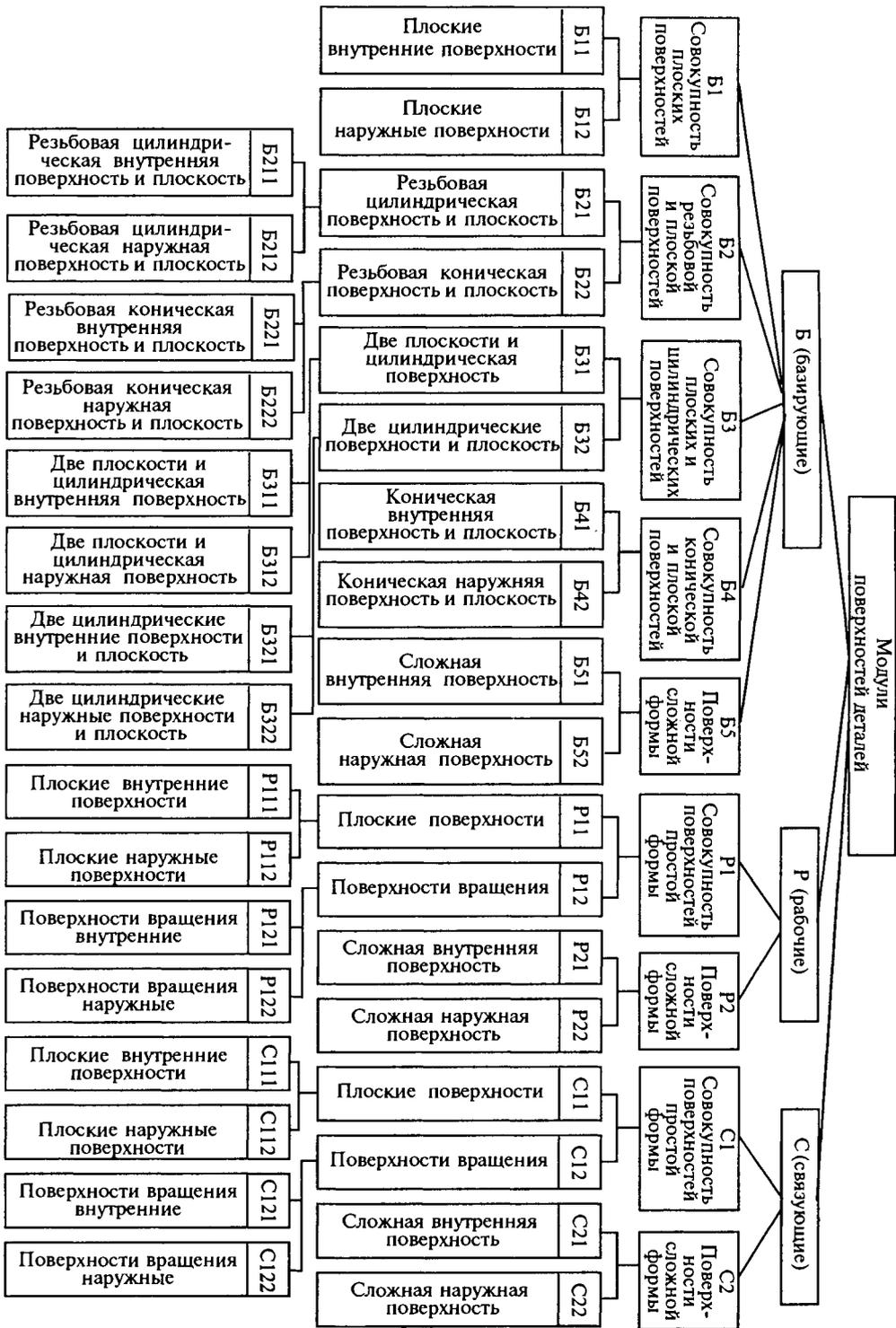
Под МП понимается сочетание поверхностей, с помощью которых выполняется та или иная законченная служебная функция детали (например, набор поверхностей, образующих комплект баз, является базирующий модулем поверхностей).

В основу классификации МП положен служебный признак поверхностей деталей. Согласно ему все поверхности деталей можно разделить на три класса: базирующие, рабочие и связующие. Деталь выполняет свои служебные функции, как правило, сочетаниями поверхностей. Эти сочетания поверхностей и получили название модулей поверхностей.

Классификация МП построена на основе служебного назначения поверхностей деталей и содержит 26 наименований (рис. 4.1.7). Из них четырнадцать базирующих модулей поверхностей (МПБ), шесть рабочих модулей поверхностей (МНР) и шесть связующих модулей поверхностей (МПС). Примеры их конструктивного оформления приведены на рис. 4.1.8. МПБ представляет собой набор базирующих поверхностей, с помощью которых деталь лишается шести степеней свободы. Если детали предоставляются одна или несколько степеней свободы, то МПБ будет неполным комплектом баз. МНР и МПС могут содержать различное число поверхностей и различаться по геометрическим признакам. С помощью МП в пределах 26 их наименований любую деталь можно представить совокупностью МП.

Номенклатура МП, ограниченная 26 наименованиями, создает благоприятные предпосылки для сокращения разнообразия ТБ и

Рис. 4.1.7. Классификация модулей поверхностей



их технологических средств: оборудования, инструментных наладок, приспособлений, измерительных средств.

МП каждого наименования могут значительно различаться своими размерами, требованиями к точности и параметрам шероховатости. Поэтому для сведения к минимуму разнообразия МТИ целесообразно разработать классификации МП каждого наименования по перечисленным выше отличительным признакам. На основе классификаций определяются типы МП и под каждый тип разрабатывается типовая МТИ и типовые технологические средства. Такая типизация открывает широкие возможности унификации как самих МП, так и их технологического обеспечения.

В основу проектирования модульного процесса изготовления детали положены следующие принципы:

деталь должна быть представлена совокупностью МП (модулей поверхностей);

все поверхности одного МП должны быть обработаны на одной операции, желательно за один установ;

маршрут изготовления детали должен быть индивидуальным для этой детали и учитывать ее особенности;

операция модульного процесса должна компоноваться из МТИ;

построение маршрута должно предполагать возможность изменения последовательности осуществления операций.

Представление детали совокупностью МП модулей сводит проектирование технологического процесса к разработке маршрута и компоновке процесса из МТИ ее МП.

Как известно, МП включает в себя только те поверхности, которые связаны совместным выполнением той или иной служебной функции детали. Наличие такой связи поверхностей предопределяет требования к точности их относительного положения. Обработка этих поверхностей за один установ позволяет воспользоваться принципом наикратчайшего пути в достижении заданной точности относительного положения поверхностей.

Принцип наикратчайшего пути обеспечивается использованием принципа единства баз, когда обработка всех поверхностей проводится от одних и тех же технологических баз.

Таким образом, обработка всех поверхностей модуля на одной операции за один установ позволит избежать накопления погрешностей относительного положения из-за смены баз, сократить число рабочих ходов и гарантирует получение высокой точности относительного положения поверхностей модуля.

Модульная технология объединяет в себе преимущества единичного, типового и группового процессов.

Разработка маршрута обработки индивидуально для каждой детали позволяет учесть все ее особенности, как в единичном процессе, и таким образом приблизить модульный процесс к оптимальному.

Построение операции модульного процесса из МТИ изготовление МП детали открывает широкие возможности для типизации и унификации модулей технологического процесса изготовления и технологических средств их осуществления.

Возможность изменения последовательности операций в маршруте придает модульному процессу гибкость.

В модульном процессе все поверхности МП выполняются на одной операции, что упрощает размерные связи процесса и делает их в значительной степени обозримыми. Это позволяет оценить влияние изменения последовательности обработки МП на погрешность обработки и допустимость этого изменения.

Типизация технологии сохраняется на уровне МТИ, что позволяет совершенствовать технологию с учетом последующих достижений науки и техники, сокращать трудоемкость технологической подготовки производства и широко распространять передовую технологию на все машиностроительные предприятия. Построение технологического процесса из модулей позволяет для каждой детали строить единственный технологический процесс, учитывающий специфику детали. И, наконец, модульная технология позволяет группировать детали в партии по общности содержащихся МП в условиях мелкосерийного и единичного производств, т.е. решая лучшим образом ту же задачу, что и групповая технология.

*Разработка модульного технологического процесса изготовления детали включает следующие основные этапы.*

**Этап 1. Представление детали совокупностью МП.** Эту работу проводит технолог при традиционном оформлении конструктором чертежа детали. При этом должна быть составлена спецификация МП данной детали, в которой указывается для каждого МП конструкторская база и координирующие размеры с соответствующими допусками.

**Этап 2. Формирование из МП детали интегральных модулей поверхностей (МПИ).** Модули поверхностей (МП) получили название конструкторских, так как отражают служебное назначение детали. Чертеж детали с указанием МП, из которых она состоит, приведен на рис. 4.1.9, а. Между тем анализ поверхностей

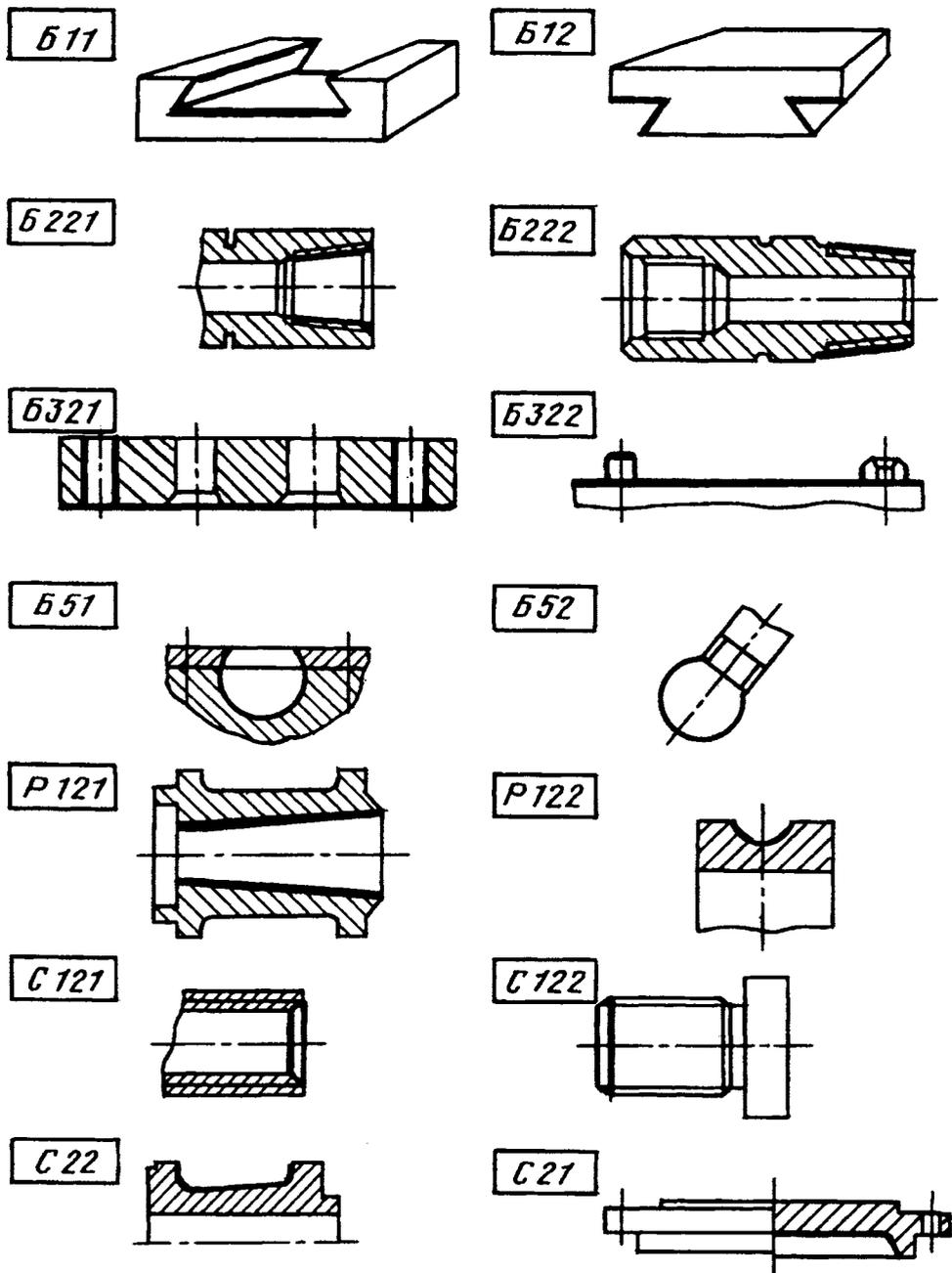


Рис. 4.1.8. Примеры конструктивного оформления модулей поверхности

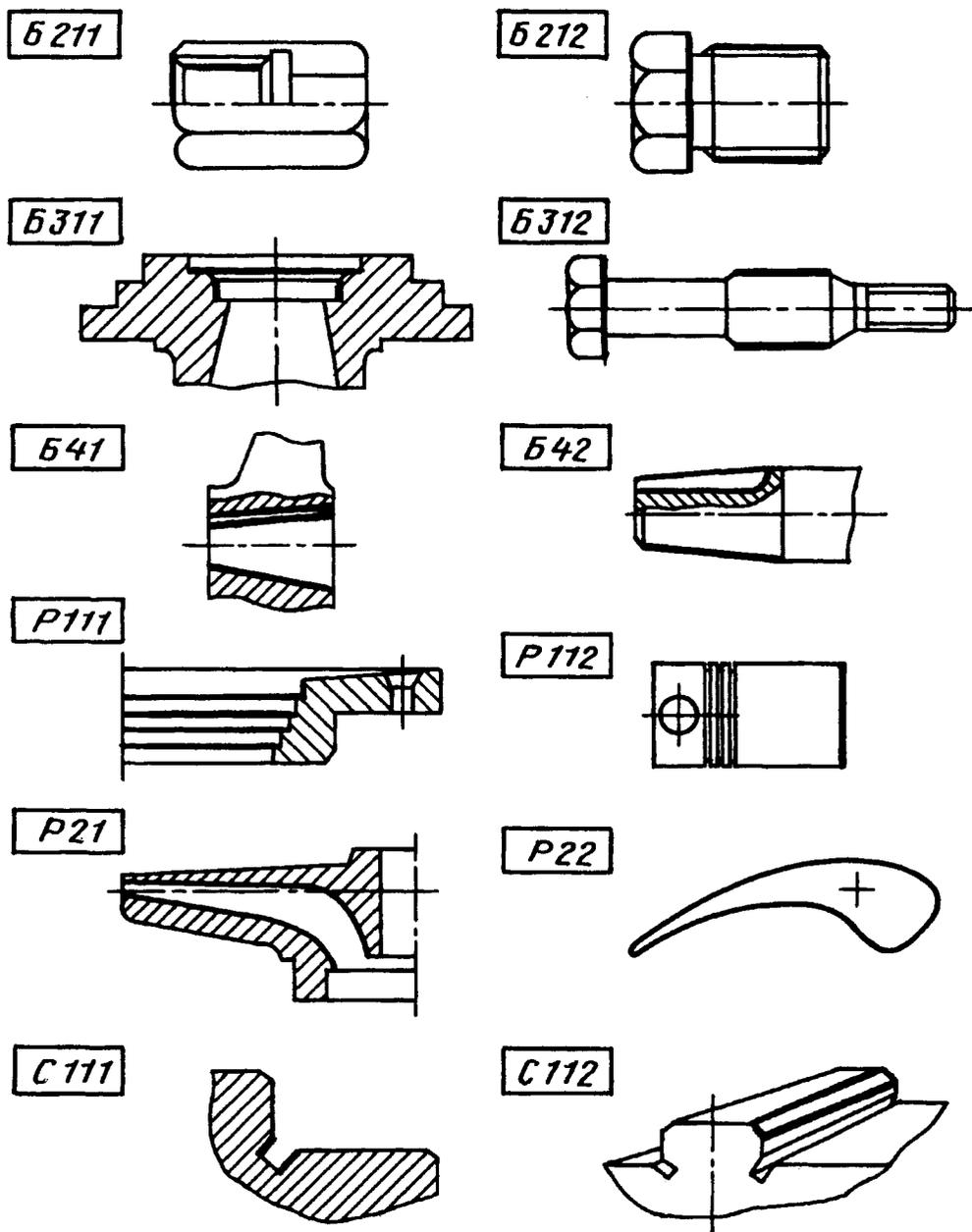


Рис. 4.1.8. (продолжение)

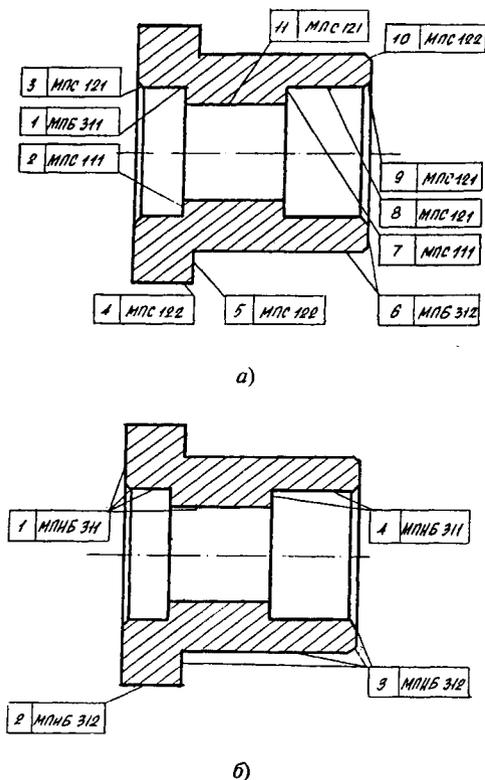


Рис. 4.1.9. Деталь, представленная совокупностью модулей поверхностей:

- а - из конструкторских модулей (МПС);  
 б - из интегральных модулей (МПИ)

деталей показывает, что у детали встречаются поверхности, по своему назначению не принадлежащие к перечисленным трем классам, хотя условно их относят к связующим поверхностям (например, канавка на детали, предназначенная для выхода инструмента или для получения прямого угла, различного рода выточки и т.п. поверхности). Наличие этих поверхностей, которые можно назвать технологическими, объясняется действием законов технологии.

Опытный конструктор, проектируя деталь, в какой-то мере уже закладывает технологию ее изготовления, вводя соответствующие технологические поверхности.

Технологические поверхности выполняют различную роль, но при этом, как правило, связаны с тем или иным МП. Поэтому изготовление технологических поверхностей в отрыве от этих МП нецелесообразно. Их следует изготавливать на одной операции, за один установ, так же, как и другие поверхности МП, с которыми они связаны.

Группа МП объединенных по этому признаку получила название *интегрального модуля поверхностей* (МПИ). На рис. 4.1.9, б та же деталь представлена совокупностью МПИ. После формирования МПИ для каждого из них осуществляется пересчет размеров связей МП, вошедших в его состав.

**Этап 3. Разработка маршрута изготовления детали.** Разработка маршрута традиционного технологического процесса изготовления детали включает в себя определение последовательности обработки поверхностей детали, выбор технологических баз, методов обработки каждой поверхности, подбор соответствующего типа оборудования и формирование операций.

Одной из важных задач разработки маршрута является определение последовательности изготовления поверхностей детали.

При разработке маршрута обработки по традиционной технологии многообразие и значительное количество отдельно обрабатываемых поверхностей создает многовариантность последовательности их обработки с учетом таких факторов, как качество изготовления деталей, загруженность оборудования, время транспортирования и ожидания и т.п.

Технология обработки деталей по модульному принципу упрощает постановку и решение данной задачи. Во-первых, задача однозначно решается для обработки поверхностей "внутри" каждого интегрального модуля выбранным типовым модулем технологического процесса. Во-вторых, формирование последовательности обработки интегральных модулей резко сокращает количество вариантов маршрута их обработки, так как число интегральных модулей примерно в 3 раза меньше числа поверхностей у детали. Кроме того, последовательность обработки ряда интегральных модулей частично определена требованиями к точности и качеству обрабатываемых поверхностей, необходимостью термической обработки и др. Те же интегральные модули, последовательность обработки которых не связана данными требованиями, могут перераспределяться по маршруту обработки как в процессе проектирования, так и в процессе изготовления в зависимости от конкретно складывающейся производственной ситуации. Такое перераспределение позволит повысить загруженность станочного оборудования и снизить затраты времени на транспортирование и пролеживание деталей.

При формировании интегральных модулей, если известна заготовка, в дополнение к интегральным модулям, сформированным из конструкторских МП деталей, могут появиться дополнительные МПИ, которые необходимо предварительно изготовить, чтобы в даль-

нейшем сформировать на детали конструкторские МП. Это относится в первую очередь к тем случаям, когда изготовление МПИ детали осуществляется в несколько рабочих ходов. Чтобы различать МПИ, принадлежащие детали и заготовке, введено такое понятие как заготовительный модуль.

Под *заготовительным интегральным модулем* понимается такой интегральный модуль, после обработки которого получается МПИ детали.

Если рабочих ходов больше двух, то число заготовительных модулей больше двух.

Полученная последовательность обработки МПИ, МП является условной; она в основном намечает ориентиры и ограничения в построении фактической последовательности обработки МПИ, так как в дальнейшем эта последовательность может корректироваться как при формировании маршрута, так и операций. Выбор последовательности обработки МПИ, МП осуществляется в соответствии с общими известными рекомендациями.

Основным отличием маршрута модульного технологического процесса является формирование операций из МП. На одной операции могут обрабатываться один или несколько МПИ, МП, причем во втором случае модули поверхностей могут быть как одного, так и разного наименования.

**Этап 4.** При проектировании операций устанавливается последовательность обработки заготовительных интегральных модулей и получение модулей детали, выбирается схема базирования заготовки, рассчитываются режимы резания, нормы времени и заполняется операционная карта. В отличие от обычного технологического процесса в операционной карте модульного процесса указываются только вспомогательные переходы (связанные с установкой и снятием заготовки), последовательность обработки МПИ, МП на этой операции и их модули технологического процесса. К каждой операционной карте прикладываются карты модулей технологического процесса, в которые вносятся числовые значения, зависящие от конкретных характеристик обрабатываемых модулей поверхностей и детали.

Применение модульной технологии позволяет существенно повысить эффективность производства деталей за счет использования более эффективных организационных форм производственных процессов и в первую очередь, в единичном, мелкосерийном и среднесерийном производствах, широкой типизации и унификации технологических процессов и средств их осуществления.

#### 4.1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ

**Система классификации деталей** - это основа для упорядочения конструкторско-технологических разработок, стандартизации и унификации продукции и технологических процессов, определения рациональных и экономических форм организации производства.

Системы классификации деталей строятся:

по методам и способам обработки, единству технологического оснащения и общности настройки станка;

по конструктивно-технологическому сходству деталей в целом (типовыми совокупностями в этом случае являются группы шестерен, втулок, валиков и др.);

по элементарным поверхностям деталей, что позволяет установить варианты обработки этих поверхностей.

Учитывая многообразие задач технологической подготовки производства, на предприятии могут использоваться несколько или все методы классификации деталей

**Система классификации деталей по методам и способам обработки.** Классификация деталей по методам и способам обработки (рис. 4.1.10) является предварительным этапом анализа деталей, облегчающим проведение дальнейшего анализа деталей и решение задач группирования, разработки технологических процессов (ТП), проектирование оснащения и т.д., и самостоятельного значения не имеет.

*Детали разделяются на три класса:*

1) класс, объединяющий детали с законченным циклом обработки на одном типе оборудования, например, заготовительные и отделочные процессы, металлообработка и т.п.;

2) класс, объединяющий детали с общим технологическим маршрутом, но обрабатываемых на разных типах оборудования;

3) класс, объединяющий детали с многооперационными процессами (детали данного класса проходят в общем случае через часть операций).

**Система классификации по конструктивно-технологическому сходству.** Эта система применяется для решения задач группирования деталей, подетальной специализации производственных подразделений, унификации и стандартизации маршрутной и операционной технологии, адресации деталей к ранее разработанным типовым и групповым ТП, выбора типов технологического оборудо-

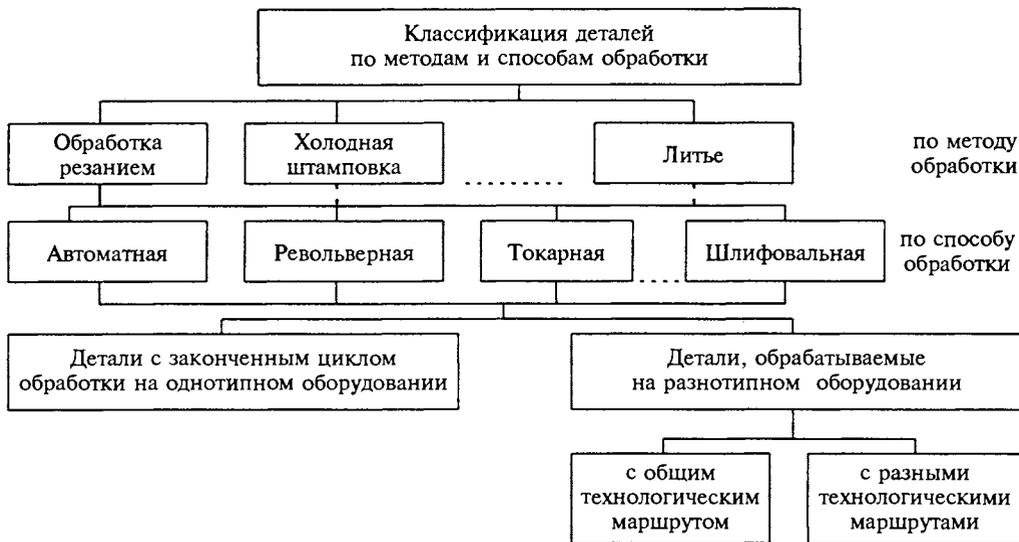


Рис. 4.1.10. Классификация деталей по методам и способам обработки

вания. Классификация деталей в этом случае ведется по конструктивным и технологическим признакам.

В системе классификации выделяются две составляющие: конструкторский классификатор и технологический классификатор. С помощью конструкторского классификатора задается геометрическая форма, конструктивные характеристики отдельных элементов, взаимное расположение элементов, выполняемая функция и наименование детали; с помощью технологического классификатора - размерные данные, материал, вид исходной заготовки, точность, параметры шероховатости и т.п. Состав признаков технологического классификатора зависит от метода обработки детали. Поэтому классификацию по технологическим признакам часто выполняют в два этапа.

На первом этапе кодируются признаки, состав которых не зависит от метода или способа изготовления детали (например, размерные данные, материал, вид обработки). На втором этапе кодируются признаки, состав которых зависит от метода и способа изготовления детали (например, число резьбовых отверстий, технологические требования, масса и т.д.). Поэтому технологический код детали состоит из двух частей (см. рис. 1.3.2 и рис. 4.1.11). Но тогда каждая деталь имеет столько технологических кодов, сколько методов обработки используется при ее изготовлении, причем первая часть этих кодов будет постоянной.



Рис. 4.1.11. Структура конструкторско-технологического кода детали

**Система классификации элементов детали.** Унификация и стандартизация операций и переходов, схем обработки элементов детали и их сочетаний, а также схем базирования деталей требуют выполнения *классификации деталей по элементам*. В качестве элемента детали понимается, в общем случае, сочетание элементов формы детали, объединенных одним приемом или способом, или методом изготовления. Такое сочетание часто называется технологической поверхностью или телом. В зависимости от целей и задач технологического проектирования используются различный состав технологических поверхностей или тел (рис. 4.1.12).

*Классификация технологических поверхностей и тел производится:*  
по конструктивно-технологическим признакам (геометрическая форма, размеры, точность размеров, шероховатость поверхностей, материал детали);

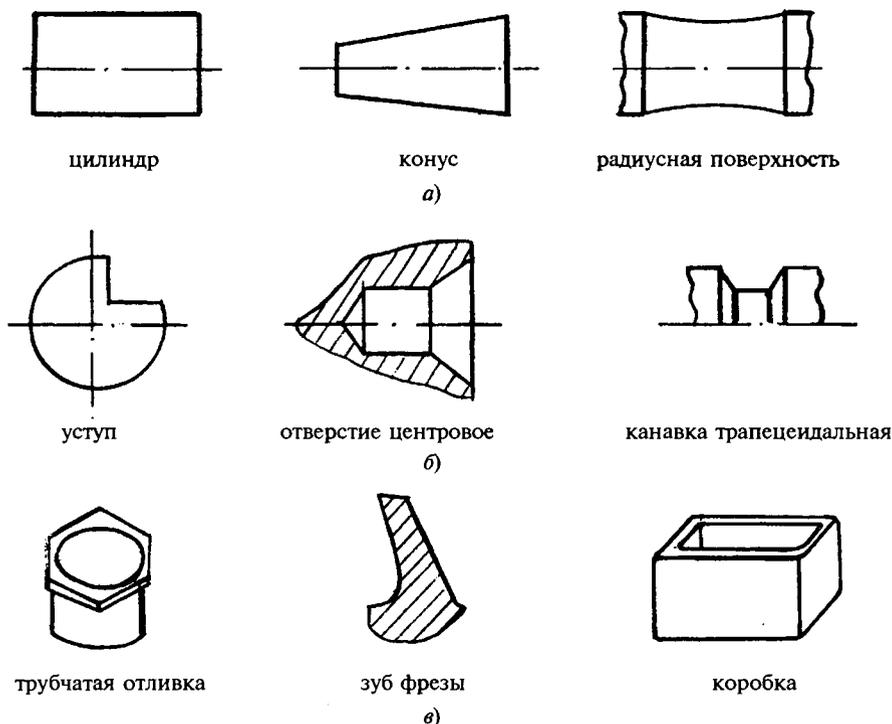


Рис. 4.1.12. Примеры технологических поверхностей и тел:  
 а - поверхности; б - сочетания поверхностей; в - тела

по технологическим признакам (методы обработки, применяемое оборудование, схемы базирования и закрепления, применяемая оснастка, припуски и допуски на обработку и т.д.).

Глубина и схема классификации определяются решаемой технологической задачей. Например, для решения задачи стандартизации технологических процессов резания классификация технологических поверхностей выполняется по следующим признакам и порядку: виду обработки (сверлильные, токарные и т.п.); типу оборудования (токарно-карусельное, токарно-револьверное и т.п.); моделям станков; типовым схемам базирования и закрепления; типоразмерам; сложности перехода (инструментальный переход, блочные переходы и т.п.); размерному ряду конструктивных элементов; режущему и мерительному инструменту; режимам обработки; нормам времени.

Для решения сложных задач технологии (например, разработки технологических процессов) применяются системы кодирования деталей, которые можно рассматривать как развитие систем классификации по конструктивно-технологическим признакам и элементам детали.

Системы кодирования делятся по классу деталей или методам обработки (например, система кодирования деталей, представляющих собой тела вращения, или система кодирования деталей, изготавливаемых холодно-листовой штамповкой).

Система кодирования, в общем случае, включает: классификатор деталей по конструктивно-технологическим признакам (с помощью которого деталь описывается как целостный объект); классификатор элементов детали; классификатор взаимосвязей элементов детали. По способу представления данных о детали системы кодирования делятся на строго позиционную и с ключевым заданием признаков. При строго позиционном описании детали применяются кодировочные ведомости, которые представляют собой систему заранее структурированных таблиц. Каждый признак детали записывается в строго определенное место. При ключевом задании признаков описание имеет вид:

< Имя признака > < Знак отношения >  
 < Состав значений >.

Например, запись ФОРМ ЕСКД = 733111,  $L = 800$ ,  $B = 450$ ,  $H = 500$  описывает форму и габаритные размеры детали. В этом случае порядок задания признаков может быть произвольным.

#### 4.1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИИ

*Технологический процесс состоит из следующих элементов:*

описания начального и конечного состояний изделия (чертежи детали и заготовки, операционные и попереходные эскизы);

методов обеспечения точности выходных параметров изделия (качества изделия);

структуры, представляемой перечнем и связями переходов;

методов воздействия на заготовки;

технологического оснащения в составе оборудования, приспособлений, инструментов, а также средств механизации и автоматизации;

траектории движений инструментов и исполнительных механизмов;

режимов движения по траектории;

устройств управления движением;

программ, задающих траектории и режимы;

норм расходов всех видов ресурсов, потерь, отходов;

методов контроля норм точности, производительности, расходов;

правил безопасности выполняемых работ;

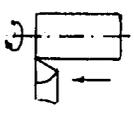
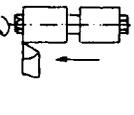
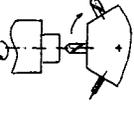
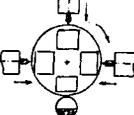
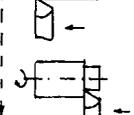
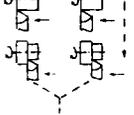
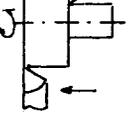
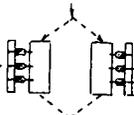
мероприятий по обеспечению надежности хода процесса по заданным параметрам: точность, производительность, себестоимость, эффективность.

Применительно к типовым и групповым формам организации этот перечень расширяется составом типовых изделий или их групп, конструкциями типового представителя, характеризующего тип комплексного изделия, включающего все элементы обработки в группе. Наличие нескольких изделий, проходящих по одному процессу, заставляет предусматривать способы подналадки элементов технологии и определять способности их к переналадке. Из оценки этих способностей вытекают основания для комплектации технологических типов и групп изделий. Оценка делается на основе классификации элементов технологий по признаку переналадчиваемости для наиболее важных из них: методов обеспечения точности (табл. 4.1.2), структур (табл. 4.1.3), методов воздействий на заготовки (табл. 4.1.4), устройств управления (табл. 4.1.5) Результаты классификации представлены в виде рядов, в которых классы элементов технологии расположены и пронумерованы в порядке усложнения переналадки, следовательно *низший номер в ряду соответствует высшей способности к подналадке.*

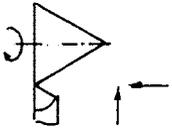
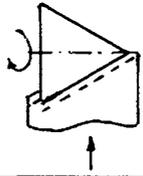
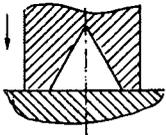
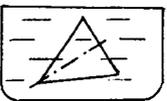
#### 4.1.2. Классификационный ряд методов обеспечения точности обработки деталей и сборки изделий

Область применения			Содержание метода	Приемы переналадки для обеспечения точности	Номер класса	
Обработка	Сборка					
Настройка	Вне станка	Взаимозаменяемость	Полная	Высокоточные настройка и предшествующие операции	Отсутствуют	1
	На работу без брака		Групповая	Точная настройка станка, разбраковка деталей на группы точности перед сборкой	Смена калибров, схем настройки и регламентов	2
	На исправимый брак		Частичная	Неточные настройка станка и предшествующие операции	Смена калибров и схем настройки на операциях изготовления и устранения брака	3
Пробные проходы		Регулировка, подгонка		Последовательные приближения к допуску	Смена измерителей, рабочих движений, регуляторов, инструментов подгонки	4

### 4.1.3. Классификационный ряд технологических структур

Наименование	Классификационный признак							
	Отсутствует				Имеется			
Совмещение переходов во времени								
	Один		Несколько		Один		Несколько	
Количество инструментов								
	Одно	Несколько	Одно	Несколько	Одно	Несколько	Одно	Несколько
Количество обрабатываемых изделий								
	Одно	Несколько	Одно	Несколько	Одно	Несколько	Одно	Несколько
Характеристика класса структур								
	Одноинструментная однопредметная операция	Одноинструментная многопредметная операция	Многопозиционная однопредметная операция	Многопозиционная многоместная операция	Дифференцированный процесс	Дифференцированный процесс с многоместными операциями	Концентрированная одноместная операция	Концентрированная многоместная операция
Схема структуры								
								
Номер класса								
	1	2	3	4	5	6	7	8

## 4.1.4. Классификационный ряд технологических методов воздействий

Классификационный признак	Характер воздействия инструмента			
	Точечное	Линейное	Поверхностное	Объемное
Метод - представитель класса	Точение протылым резцом	Точение фасонным резцом	Формирование в штампе, пресс-форме	Воздействие рабочей средой
Схема воздействия инструмента				
Номер класса	1	2	3	4
Переналаживаемость инструмента	Усложняется с увеличением номера класса			
Переналаживаемость автомата	Упрощается с увеличением номера класса			

## 4.1.5. Классификационный ряд управляющих устройств автоматов

Устройство управления	Способ задания движения	Вид программносителя (устройства)	Переналадка	Номер класса
Центральная управляющая ЭВМ	Математический	Перфолента, интерполятор	Смена перфоленты	1
Локальная управляющая ЭВМ		Задание на программирование	Смена задания на программирование	2
Программное управление		Перфолента, интерполятор	Смена перфоленты	3
Программное управление	Аналоговый	Программируемые контроллеры	Набор циклов и расстояний	4
Временные, магнитные, оптические и прочие устройства		Запись на физические носители	Запись и смена программносителя	5
Кинематические переналаживаемые механизмы	Геометрический	Сменные шестерни в установленной комплектке	Смена шестерен	6
Копировальные кулачковые, коноидные механизмы		Копиры, кулачки, коноиды	Смена копиров, кулачков, коноидов	7
Управление по конечным положениям		Конечные выключатели и упоры	Перестановка упоров	8

**Способность элементов технологии к переналадкам.** Ряд методов обеспечения точности (табл. 4.1.2) начинается с настройки инструментов вне станка и с полной взаимозаменяемости для сборки. В обоих случаях точность выполнения операции гарантируется предварительными мероприятиями, в основе которых лежит расчет допусков на наладку инструментов и на комплектующие изделия по методу максимума-минимума, исключаящего возможность появления брака. Следовательно, в процессе выполнения операции не требуется специальных движений для достижения точности и нет необходимости в специальной переналадке.

Операция налаживается на выполнение движений обработки и сборки, а точность получается автоматически вследствие жестких требований к предшествующим операциям. Повышение номера метода в ряду усложняет переналадку, так как приходится выполнять все более сложные движения по обеспечению точности. Однако при этом смягчаются точностные требования к предыдущим операциям. Возникающее противоречие разрешается на основе экономических сопоставлений методов. Унификация технологии способствует переходу на методы с малыми номерами, а следовательно, упрощает переналадку.

Установка одного инструмента и приспособления наиболее проста и эта структура принимается в качестве базы для сравнения в классификационном ряду (см. табл. 4.1.3). Многоинструментность увеличивает сложность переналадки в соответственное число раз. Сложности возникают при концентрированной работе из-за резкого проявления взаимного влияния инструментов через силы, температуру, вибрации. Многоместность обработки усложняет наладку приспособлений, а многооперационность в процессе увеличивает сложность увязки операций в потоке и потоков между собой. Однако эти усовершенствования ведут к росту производительности и, тем самым, покрываются потери времени на переналадку. Типовая и групповая технологии, сокращая затраты на переналадку, дают возможность применять сложные и производительные структуры в многономенклатурном производстве.

В табл. 4.1.4 представлен ряд методов воздействий на заготовки, построенный на основе классификации Л.Н. Кошкина. Из анализа ряда следует, что с ростом номера класса усложняется инструмент, а значит и его переналадка - это с одной стороны, с другой стороны, это ведет к упрощению переналадки устройства управления станком, выполняющим операцию. Прогрессивная технология и автоматизация связаны с при-

менением все более сложных методов, которые становятся сложными в переналадке. Типовая и групповая технологии, сокращая их, создают основу для автоматизации многономенклатурного производства.

Ряд устройств управления, представленных в табл. 4.1.5, показывает процесс усовершенствованная их в направлении сокращения сложности переналадки. Математический способ задания движений, воплощенный в устройствах ЧПУ с разным уровнем использования вычислительной техники, окончательно разрешает проблему переналадки, сводя ее к посылке новой серии сигналов управления от центральной ЭВМ к станку. Программировать можно любые устройства: оборудование, приспособления, транспорт, роботы по основным и вспомогательным движениям, а также движениям переналадки.

Таким образом, на основе ЧПУ может быть автоматизирована переналадка, а потери от нее сведены к минимуму. Однако сложность и высокая стоимость таких устройств заставляет искать оптимальное решение на основе сопоставления всех вариантов устройств в ряду. Унифицированная технология предлагает в противоположность ЧПУ технологические приемы сокращения переналадок, которые делают конкурентоспособными более простые и дешевые устройства управления.

#### 4.1.5. ГРУППИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Группой называется совокупность деталей, характеризующаяся при обработке общностью оборудования; оснастки, наладки и технологического процесса (ТП). Группа деталей при групповом производстве характеризуется конструкторским, технологическим (общность технологии), инструментальным (общность оснащения) и организационно-плановым (единое планирование и организация производства) единством.

Проектирование групповых ТП изготовления деталей может базироваться на различных методах их группирования:

- 1) по конструктивно-технологическому сходству деталей (наиболее типичными в этом случае являются группы шестерен, втулок, валиков и др.);
- 2) по элементам деталей, что позволяет установить варианты обработки этих элементов или их сочетаний, а из комбинации элементарных процессов получить ТП обработки любой детали;
- 3) по степени унифицируемости условий обработки (преобладающим видам обработки и типам оборудования, единству технологического оснащения, общности наладки станка).

Групповой метод допускает использование всех указанных методов группирования деталей, если они целесообразны в условиях данного производства.

Группирование деталей для построения групповых ТП рекомендуется выполнять таким образом, чтобы сформировать общность маршрутной технологии, а затем общность операционной технологии. Но можно формировать группы деталей с частичной унификацией ТП обработки, когда унификацией охватывается либо одна операция, либо несколько операций (обязательно смежных в технологическом маршруте) обработки деталей. Можно формировать группы деталей только по общности маршрутной технологии.

Группирование охватывает числящиеся в номенклатуре выпуска реальные детали. Результат группирования может быть оформлен в виде комплексной детали, комплексного сочетания поверхностей или тел, перечисления деталей, вошедших в группу, описания на

естественном или табличном языках. Во многих случаях бывает целесообразно применять несколько способов представления результата группирования.

Под *комплексной деталью* понимается реальная или условная (искусственно созданная) деталь, имеющая все основные геометрические элементы деталей данной группы. Под основными элементами понимаются поверхности или тела, определяющие конфигурацию детали и необходимые для решения поставленной технологической задачи (рис. 4.1.13, 4.1.14). Основные элементы служат главным признаком для отнесения детали к той или иной группе деталей. Комплексная деталь служит основой при разработке группового процесса и групповой оснастки (совокупности приспособлений и инструментов, обеспечивающих обработку любой детали группы при небольших подналадках оборудования).

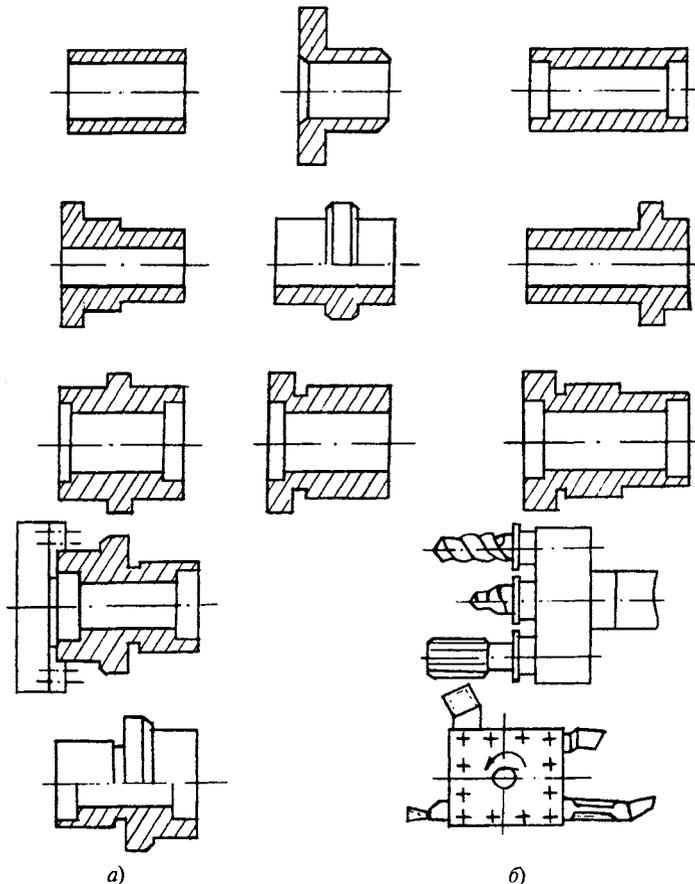


Рис. 4.1.13. Группа деталей, обрабатываемая на токарном станке и заданная комплексной деталью: а - комплексная деталь; б - наладка

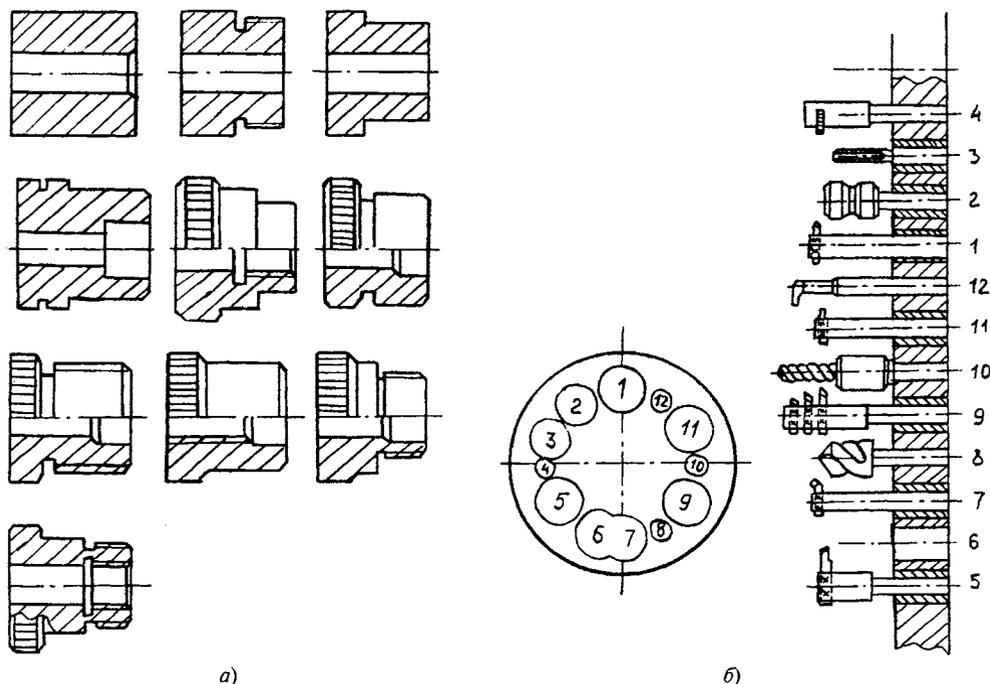


Рис. 4.1.14. Группа деталей, обрабатываемая на токарно-револьверном станке и заданная комплексной деталью: а - комплексная деталь; б - наладка

В процессе разработки групповых ТП по комплексной детали определяется тип оборудования, конструкция приспособления, необходимые инструменты и др. Например, на рис. 4.1.13, б представлена наладка токарного станка для обработки группы деталей, которая предполагает закрепление заготовки в трехкулачковом патроне и использование режущего инструмента в четырехпозиционном резцедержателе и поворотной револьверной головке, установленной в пиноли задней бабки.

В случаях, когда в группу входят детали сложной конфигурации, определяющими признаками группы являются схема базирования и комплексное сочетание элементов поверхности (рис. 4.1.15). Сходные схемы базирования деталей группы дают возможность спроектировать или выбрать групповое приспособление, обеспечивающее установку и закрепление каждой детали группы, а комплексное сочетание поверхностей - инструментальную наладку станка.

В тех случаях, когда комплексную деталь построить принципиально невозможно и нецелесообразно задавать комплексное сочетание поверхностей или тел, группу деталей задают перечислением эскизов деталей (рис. 4.1.16), вошедших в группу, и(или) перечислением обозначений деталей группы с зада-

нием признаков, определяющих общность ТП их изготовления (табл. 4.1.6). Такие способы описания групп деталей часто применяются, когда рассматриваются методы холодной и горячей штамповки, литья, порошковой металлургии и др.

Рекомендуется во всех случаях задавать результат группирования в виде описания, которое, по сути, является алгоритмом классификации деталей по группам. С помощью описания задаются все детали, которые вошли и могут войти в группу. Описание группы может быть представлено на естественном языке, например: "группа состоит из деталей различной конфигурации типа гаек, болтов, втулок, колец, фланцев и т.п., в которых есть грани или пазы. Детали группы должны соответствовать следующим техническим условиям: 1) наружный, диаметр не должен превышать 50 мм; 2) высота - до 20 мм; 3) точность обработки - не выше 8 качества, 4) параметр шероховатости поверхностей  $Rz = 40$  мкм; 5) смещение осевой линии любого паза относительно наружного или внутреннего диаметров допускается в пределах 8 качества", или в виде таблицы возможных значений характерных признаков (табл. 4.1.7).

При формировании групп рассматриваются габаритные размеры деталей, их геомет-

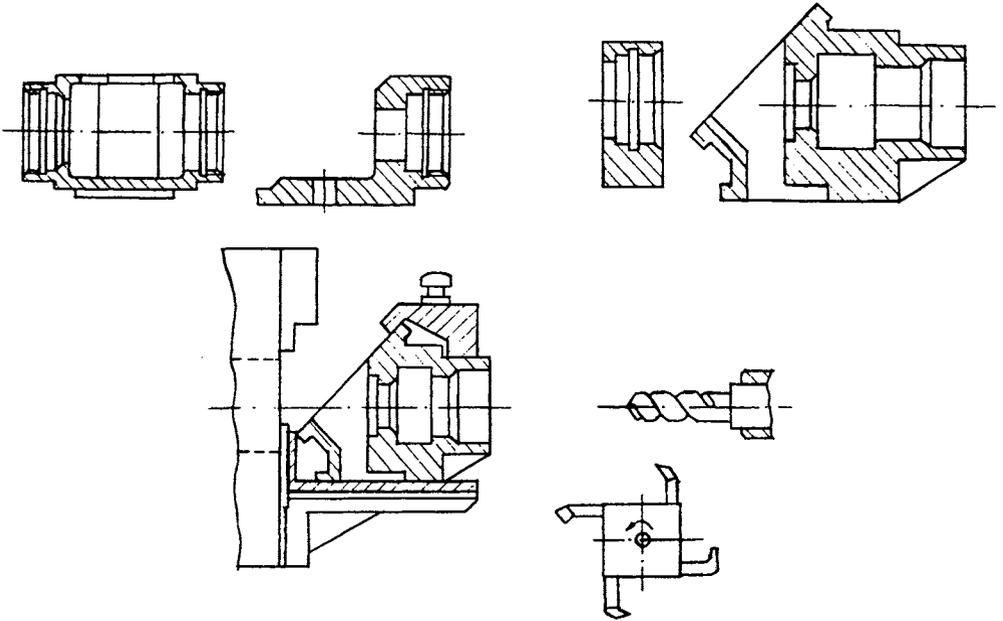


Рис. 4.1.15. Группа деталей, обрабатываемая на токарном станке и заданная комплексом поверхностей

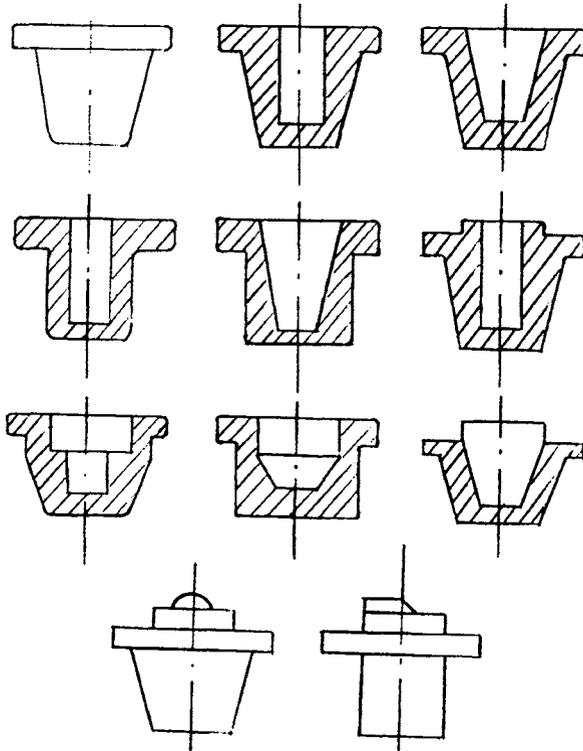


Рис. 4.1.16. Группа деталей прямоугольной формы, изготавливаемых штамповкой из жидкого металла

рическая форма, отдельные поверхности, точность размеров, параметры шероховатости обрабатываемых поверхностей, материал детали, серийность выпуска. Этот состав признаков является основным, но не полным. Каждый метод или способ обработки, а также конкретные производственные условия могут потребовать оригинального состава признаков. В табл. 4.1.8 ... 4.1.11 приведены рекомендуемые составы признаков для некоторых методов обработки и типов оборудования.

Чем больше на оборудовании используется различных способов обработки, тем длиннее список рекомендуемых признаков.

При группировании деталей, изготавливаемых холодной и горячей штамповкой, литьем, методом порошковой металлургии, акцент делается на возможность применения быстроперенастраиваемых и упрощенных штампов, форм, специальных прессов и автоматов.

**4.1.6. Обозначение деталей, вошедших в группу**

Обозначение детали	Форма детали	Материал	Длина, мм	Диаметр, мм	Число наружных поверхностей	Число внутренних поверхностей	Квалитет допуска размера при обработке
ЛЛ 1310-2074	1711	Сталь 15Л	26	22	2	0	6
ЛЛ 1349-4156	1771	Сталь 25Л	20	18	3	2	7

**4.1.7. Табличное описание группы деталей**

Код группы материала	Наружные поверхности			Внутренние поверхности			Длина детали	Код формы детали
	Диаметр, мм, не более	Квалитет допуска диаметра	Параметр шероховатости	Диаметр, мм, не более	Квалитет допуска диаметра	Параметр шероховатости		
9	40 ... 131	≥ 9	≥ Ra 2,5 мкм	12 ... 33	≥ 6	Ra 2,5 мкм	24 ... 42	1121 ... 1158

**4.1.8. Рекомендуемый состав признаков для группирования деталей при обработке резанием**

Признак	Станок					
	Токарный	Револьверный	Токарный автомат	Фрезерный	Сверлильный	Агрегатный
1	2	3	4	5	6	7
Геометрическая форма детали	+	+	+	+	+	+
Габаритные размеры	+	+	+	+	+	+
Точность размеров и параметры шероховатости поверхности	+	+	+	+	+	+
Марка материала заготовки	+	+	+	+	+	+
Серийность	+	+	+	+	+	+
Вид исходной заготовки	+	+	+			+
Диаметры отверстий	+	+	+		+	
Форма отверстий					+	
Расположение отверстий					+	
Число канавок наружных, внутренних	+	+	+			

Продолжение табл. 4.1.8

1	2	3	4	5	6	7
Наличие канавок на торце	+	+	+			
Наличие резьбы наружной, внутренней	+	+	+		+	
Шаг резьбы	+	+	+		+	
Наличие сферических, конических наружных, внутренних поверхностей	+	+	+	+	+	
Жесткость деталей	+	+	+			

**4.1.9. Рекомендуемый состав признаков  
для группирования деталей, изготавливаемых холодной штамповкой**

Признак	Операция			
	Разделительная	Гибочная	Вытяжки	Объемная штамповка
Геометрическая форма детали		+	+	+
Материал	+	+	+	+
Габаритные размеры	+	+	+	+
Точность размеров	+	+	+	+
Параметры шероховатости поверхности	+	+	+	+
Вид заготовки	+	+	+	+
Экономичность раскроя материала	+			
Серийность	+	+	+	+
Размерные соотношения элементов	+	+	+	+
Наличие отверстий, выступов и т.д.	+			
Масса заготовки	+	+		

**4.1.10. Рекомендуемый состав признаков  
для группирования деталей, обрабатываемых давлением**

Признак	Операция				
	Литье с кристаллизацией под давлением	Ковка	Горячая штамповка	Литье	Порошковая металлургия
1	2	3	4	5	6
Геометрическая форма детали	+	+	+	+	+
Материал	+	+	+	+	
Габаритные размеры	+	+	+	+	+
Точность размеров	+	+	+	+	
Параметр шероховатости поверхности	+	+	+	+	
Вид заготовки		+	+	+	
Масса заготовки	+	+	+	+	+
Серийность	+	+	+	+	+

Продолжение табл. 4.1.10

1	2	3	4	5	6
Технологические требования:					
наличие ребер, выступов, фланцев, отростков, развилин, поднутренний		+	+	+	+
размерные соотношения (утолщения, с удлиненной осью и т.д.)		+	+		+
толщина стенки				+	+

**4.1.11. Рекомендуемый состав признаков для группирования изделий при сварке**

Признак	Маршрутная технология	Операционная технология
Материал	+	+
Масса изделия и его составных частей	+	+
Габаритные размеры	+	+
Программа выпуска	+	+
Характеристика методов:		
сборки	+	+
сварки	+	+
контроля	+	+
Число разновидностей геометрических контуров сопряжения деталей		+
Разновидности геометрические контуров сопряжения деталей:		
пространственное расположение деталей		+
тип соединения (тип шва)		+
Вид сварки		+

**4.1.6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ, ГРУППИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Автоматизированная система классификации (АСК)* представляет собой вычислительную систему (ВС), осуществляющую машинную обработку графических и текстовых данных об изделии или о технологическом процессе и формирование обозначений изделия и конструктивных документов или кода ТП. В состав программного обеспечения включаются: информационно-поисковая система; интерактивная графическая система; программы управления вычислительным процессом и определения кодов. Информационное обеспечение АСК включает в себя базы данных классификационных характеристик и алфавитно-предметных указателей классификаторов.

Качество функционирования и адаптивные свойства АСК и объем диалогового взаимодействия с пользователем определяется набором и формой представления правил формирования классификационных кодов. Совокупность правил можно разделить на два класса: правила формирования конструкторского кода, описывающего геометрическую форму деталей, и правила формирования технологического кода. С помощью правил первого класса проводятся анализ и декомпозиция детали на составляющие, по которым определяются класс, подкласс, группа, подгруппа и вид.

Если интерактивная графическая система оперирует унифицированными конструктивными примитивами, то сложность этих правил невелика; в противном случае алгоритмическая реализация этих правил слишком

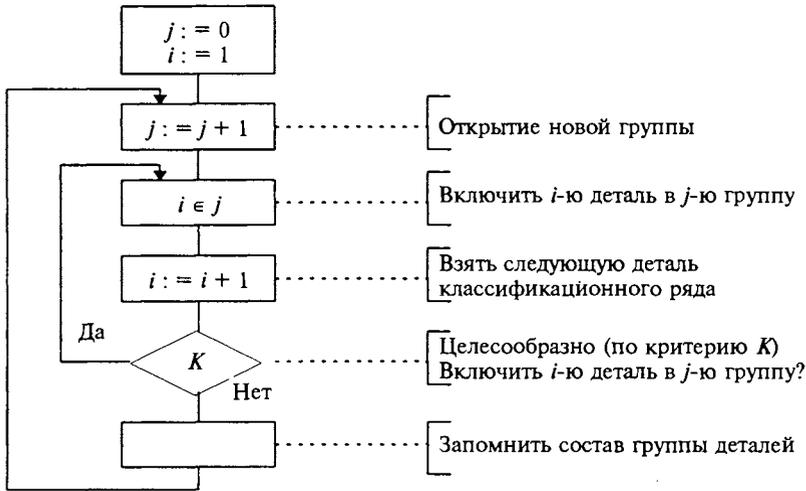


Рис. 4.1.17. Алгоритм группирования по классификационному ряду (нумерация членов ряда может быть как слева направо, так и наоборот)

ком сложна и требует много ресурсов ВС. Правила второго класса просты, так как реализуют таблицы кодирования, входящие в классификатор. Если правила хранятся в базе знаний и реализуются инвариантным по отношению к ним программным обеспечением, то АСК является адаптивной.

**Автоматизированная система группирования деталей** (АСГ) представляет собой вычислительную систему (ВС), осуществляющую машинный анализ данных о деталях и формирование групп деталей, имеющих конструктивно-технологическое подобие. АСГ состоит из двух взаимосвязанных частей: программного обеспечения и технического оснащения. Программное обеспечение включает в себя программу группирования деталей, ввода, сортировки, редактирования, преобразования, накопления, отображения данных и управления вычислительным процессом. Техническое оснащение состоит из вычислительной машины и специализированных периферийных устройств, обеспечивающих весь комплекс операций по формированию групп и подготовки сопутствующих технологических документов.

Созданию программного обеспечения предшествует выбор или разработка метода группирования, функций и структуры программной системы.

Различают три метода автоматизированного группирования деталей:

- 1) с построением классификационных рядов;
- 2) по описанию предполагаемого множества технологически подобных деталей;
- 3) с предварительным формированием множеств наивысшей плотности.

*Первый метод* основывается на построении классификационного ряда кодов детали и использовании его свойств: а) две детали, имеющие одинаковый код  $K$ , будут либо одинаковыми, либо обладать высоким подобием; б) если даны три детали, у которых соответственно коды равны  $K_1, K_2, K_3$ , и если  $K_1 > K_2$ , а  $K_2 > K_3$ , то первая деталь более подобна второй детали, чем третьей (рис. 4.1.17). В состав АСГ, реализующую этот метод, обычно включается информационно-поисковая система (ИПС) деталей и АСК. Преимущество метода - простота, недостаток - необходимость задания конкретной иерархии признаков, что не всегда возможно, поэтому данный метод трудно использовать в автоматическом режиме.

*Второй метод* имеет две модификации. Первая основана на задании поискового предписания и предположении, что детали, удовлетворяющие поисковому предписанию, являются технологически подобными. Поисковое предписание оформляется на специальном языке и содержит перечисления, интервалы и конкретные значения признаков детали, требования наличия или отсутствия каких-либо признаков, условия взаимосвязи различных признаков, арифметические отношения. Например,

$$\text{КЛ} = (403532, 403552) \wedge \text{МАТ} = \\ = (\text{СТ3}, \text{СТ10}) \wedge D = 80 \dots 100 \wedge L = 50 \dots 70,$$

задает группу из деталей, имеющих классификационную группировку 402532 или 403552, изготавливаемых из стали Ст3 или стали Ст10, с габаритными размерами  $D = 80 \dots 100$  мм и  $L = 50 \dots 70$  мм.

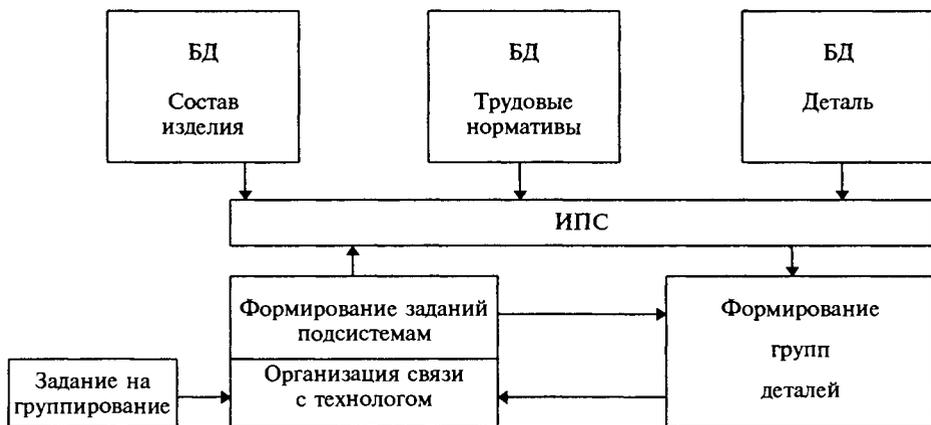


Рис. 4.1.18. Состав и схема функционирования АСГ по поисковым предписаниям

Поисковые предписания могут храниться как неизменяемое правило в базе данных (БД) или быть реализованными в виде программы, или формироваться и уточняться технологом (в этом случае группирование ведется в режиме диалога). АСГ, реализующие этот метод, включают в свой состав ИПС деталей (рис. 4.1.18). Вторая модификация основана на задании описания комплексной детали и правил допустимой ее трансформации. Преимущество метода - можно выполнять вариантное группирование деталей, недостаток - качество групп деталей зависит от опыта и знания технологом технологических свойств продукции и условий производства.

*Третий метод* основан на выделении подмножеств деталей, в которое входит большое число технологически подобных деталей. Опираясь на эти подмножества, автоматически или в режиме диалога "технолог - ВС", окончательно формируют группы деталей по заданным критериям. Методы выделения подмножеств заимствованы из теории распознавания образов и классификаций.

Данный метод группирования требует решения трех дополнительных задач:  
 - определение состава признаков группирования;  
 - формирование критериев и построение дерева целей;  
 - повышение адаптивных свойств системы группирования (рис. 4.1.19).

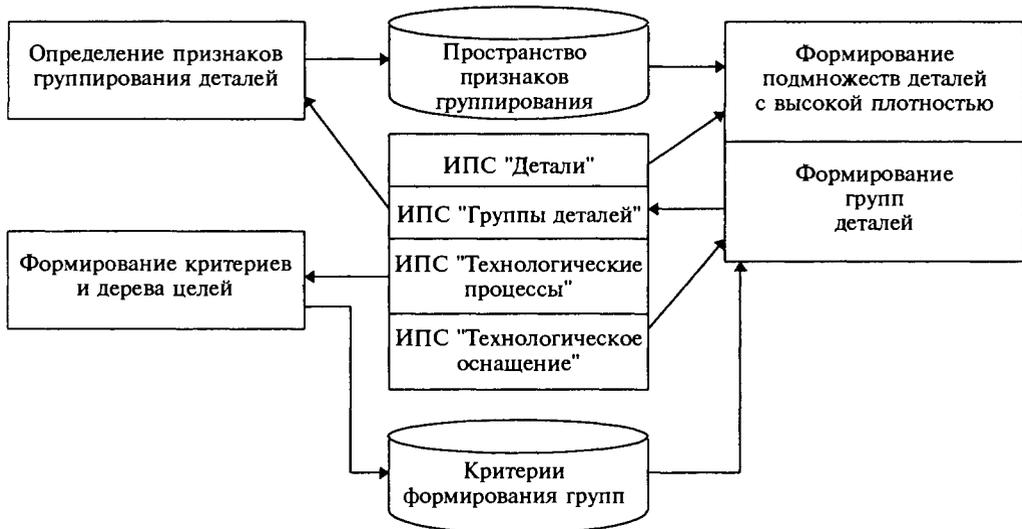


Рис. 4.1.19. Состав и схема функционирования АСГ с предварительным формированием множеств с высокой плотностью

Адаптивные свойства повышаются за счет возможности "переучить" систему. Инициализировать "переучивание" может как технолог, так и специальный механизм, введенный в систему группирования. Преимущество метода - отсутствие недостатков, свойственных первым двум методам, возможность повысить адаптивные свойства и обеспечить самоорганизацию системы. Недостаток - повышение сложности реализации системы.

Эффективность АСГ повышается при совместном использовании второго и третьего методов группирования. АСГ можно классифицировать по организации технологического оснащения: одно- и двухконтурные АСГ. В одноконтурных АСГ все функции группирования деталей выполняются под управлением вычислительной машины. В двухконтурных АСГ функции анализа чертежей деталей технологом выполняются на специальных устройствах, работающих автономно.

*Автоматизированная система проектирования технологических процессов (САПР ТП)* - вычислительная система, осуществляющая машинную обработку данных об изделии, оснащении, методах и способах обработки,

организации производства и т.д. и формирование технологического процесса изготовления изделия. В состав программного обеспечения включаются: программы управления вычислительным процессом, формирования состава и структуры технологического процесса (ТП); информационно-поисковые системы технологического назначения, расчета режимов изготовления, организации ввода информации и формирования вывода технологических документов.

Состав, структура, функционирование и функциональное назначение систем зависят от метода проектирования состава и структуры ТП (рис. 4.1.20). Методы адресации являются основными методами проектирования ТП при эксплуатации специализированных производственных подразделений, настроенных на реализацию *унифицированных* ТП (типовых и групповых) (УТП). Алгоритм проектирования ТП методом адресации (рис. 4.1.21) основан на отнесении изделия к одному из известных типов (или групп) каждому из которых соответствует унифицированный ТП или основан на заимствовании УТП и, в случае необходимости, на его корректировке.



Рис. 4.1.20. Классификация методов проектирования состава и структуры ТП

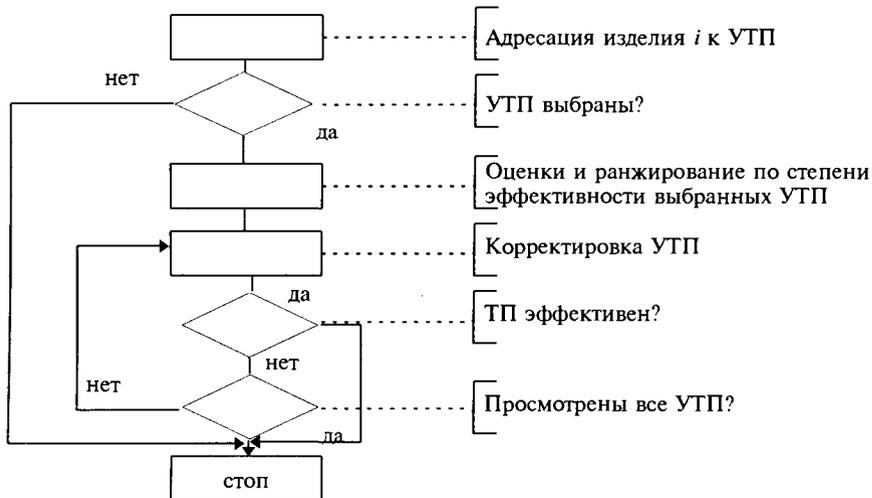


Рис. 4.1.21. Алгоритм проектирования ТП методом адресации

Корректировка УТП заключается в исключении ненужных для изготовления изделия элементов ТП и тех связей, которые инцидентны исключаемым элементам. Такая схема проектирования ТП не нарушает существующей специализации производственных подразделений. Если реализуется метод адре-

сации без изменения состава УТП, то в состав программ формирования состава и структуры ТП входят программы классификации и ИПС. Если реализуется метод адресации с изменением состава УТП, то к этим программам добавляются программы выбора (назначения) операций, переходов и ходов.

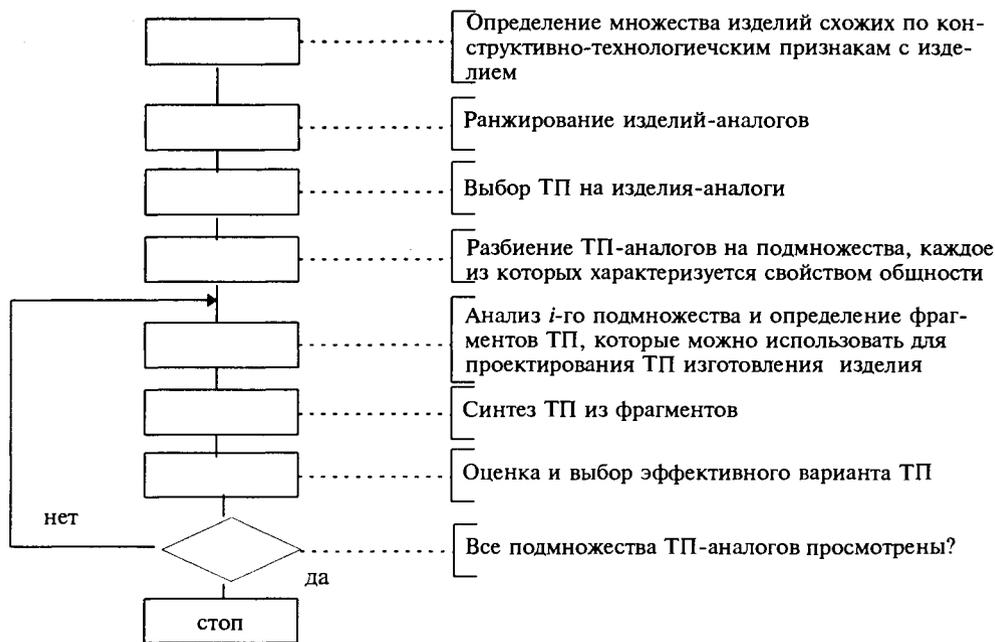


Рис. 4.1.22. Алгоритмы проектирования ТП методом синтеза с ТП-аналогам

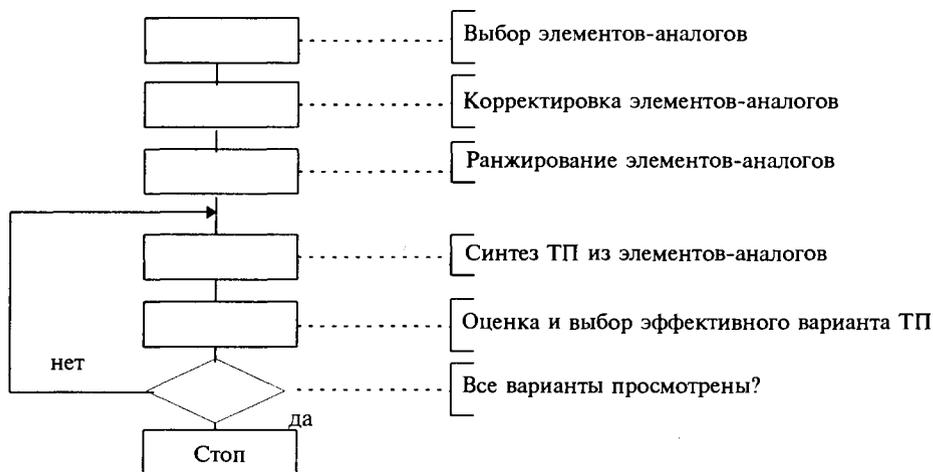


Рис. 4.1.23. Алгоритм проектирования ТП методом синтеза с элементами-аналогам

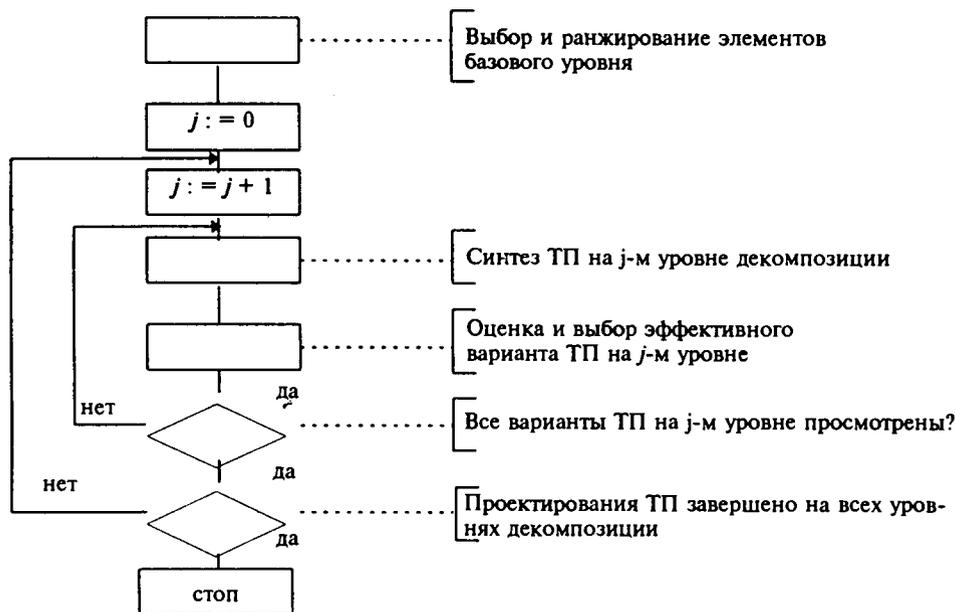


Рис. 4.1.24. Алгоритм проектирования ТП методом синтеза без аналогов

Методы синтеза используются для проектирования групповых, типовых и единичных ТП. Использование аналогов при проектировании ТП позволяет повысить уровень унификации принимаемых технологических решений. Но все методы синтеза предполагают либо включение новых элементов в ТП-аналоги, либо изменение их последовательности или пространственного расположения. Поэтому в состав программ формирования состава и структуры ТП вводятся следующие компоненты: определение множества элементов, из которых будет создаваться ТП; построение связей между элементами ТП; проверка достоверности состава и связей ТП. (рис. 4.1.22 - рис. 4.1.24). Процесс проектирования ТП методом синтеза без аналогов выполняется поэтапно на каждом уровне декомпозиции ТП, кроме базового. Например, на базовом уровне выбираются хода (рабочие и вспомогательные), на первом уровне синтезируются инструментальные переходы, на втором - блочные переходы и т.д.

Методы проектирования состава и структуры ТП не являются взаимоисключающими, а являются самостоятельными дополняющими друг друга. Поэтому САПР ТП должна содержать программные системы, реализующие все названные методы. Рассматривая методы проектирования слева направо (см. рис. 4.1.20), следует отметить, что преемственность технологических решений от метода к методу убывает, а сложность реализации САПР ТП возрастает.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / В.С. Корсаков и др. М.: Машиностроение, 1985. 310 с.
2. Гибкие автоматические производства / В.С. Азбель и др. Л.: Машиностроение, 1985. 280 с.
3. Митрофанов С.П. Научная организация машиностроительного производства. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Машиностроение, 1975. 350 с.
4. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2 т. Л.: Машиностроение, 1983. 385 с.
5. Митрофанов С.П. Групповая технология изготовления заготовок серийного производства. Л.: Машиностроение, 1985. 410 с.
6. Организация группового производства / Под общ. ред. С.П. Митрофанова и В.А. Петрова. Л.: Лениздат, 1980. 370 с.
7. Организационно-технологическое проектирование ГПС / В.О. Азбель и др. М.: Машиностроение, 1986. 350 с.
8. Технологическая подготовка гибких производственных систем / Под общ. ред. С.П. Митрофанова. Л.: Машиностроение, 1987. 450 с.
9. Базов Б.М. Модульная технология изготовления деталей. М.: 1986. (Обзорная инф. / ВНИИТЭМР. Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Вып 5).

## Глава 4.2

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 4.2.1. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ И УНИВЕРСАЛЬНО-НАЛАДОЧНАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ ТИПОВОЙ И ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИЙ

**Типовые и групповые приспособления в системах технологического оснащения.** Особенности *специализированной наладочной оснастки* (СНО) для типовых технологических процессов и *универсально-наладочной оснастки* (УНО) для групповых процессов выявляются в сравнении с прочими видами оснащения. В зависимости от уровня специализации и с учетом особенностей конструкции образованы системы технологической оснастки, в пределах которых находят свое место разнообразные по назначению инструменты, приспособления, устройства. В табл. 4.2.1 (на примерах оснастки) и на рис. 4.2.1 (на примерах машинных тисков) представлены системы технологического оснащения, расположенные в ряд по эффективности применения от *неразборной специальной* (НСО) до *универсальной безналадочной оснастки* (УБО).

Эффективность измеряется отношением полученного эффекта к затратам. Эффект определяется, в основном, уровнем специализации и растет пропорционально объему выпуска изделий или коэффициенту загрузки приспособления, а также увеличению качественных показателей изготовления: точности, параметров шероховатости, производительности.

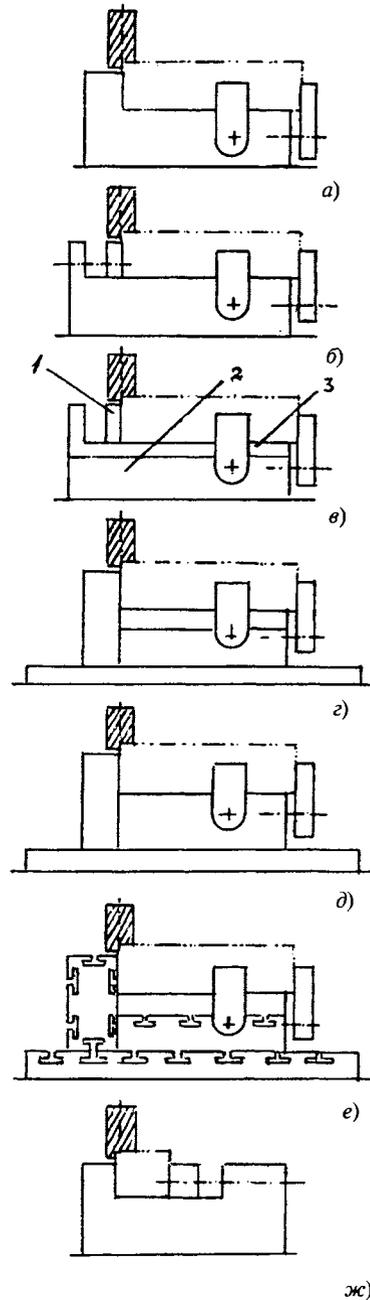
Затраты на изготовление, установку, наладку, переналадку определяются методом проектирования оснастки:

оригинальная разработка, заимствование базовой конструкции, компоновка из агрегатов;

принятыми устройствами переналадки, рассчитанными на широкую номенклатуру или на суженный круг изделий определенного типа или группы;

достигнутым уровнем механизации и автоматизации.

Наиболее перспективной считается НСО, которая стоит первой в ряду и дает наибольшее значение эффекта, а при обеспечении полной загрузки вызывает незначительные затраты, приходящиеся на каждое изделие (рис. 4.2.1, а). На эту систему следует ориентироваться при оптимизации состава технологического оснащения. Многономенклатурность приводит к неэффективности



**Рис. 4.2.1. Схемы компоновки машинных тисков в различных системах оснастки:**

а - неразборная специальная оснастка; б - специализированная наладочная оснастка; в - универсально-наладочная оснастка; г - универсально-сборная, переналаживаемая оснастка; д - сборно-разборная оснастка; е - универсально-сборная оснастка; ж - универсально-безналадочная оснастка

## 4.2.1. Конструкторско-технологические характеристики систем оснащения

Оснастка	Обозначение	Конструкция	Применение
Неразборная специальная	НСО	Монолитная без элементов переналадки	Для всех видов работ в однономенклатурном производстве, а также при высоких требованиях к точности и конфигурации деталей
Специализированная наладочная	СНО	Монолитная с регулируемыми и заменяемыми элементами, которыми осуществляется подналадка	Для изготовления изделий, составляющих конструкторский тип и различающихся по типоразмерам
Универсально-наладочная	УНО	Специализированная, состоящая из базовой и сменных частей, соединяемых без зазоров; подналадка путем смены и регулировки частей	Для изготовления технологически однородных, но конструкторски различных изделий, составляющих группы
Универсально-сборная переналаживаемая	УСПО	Специализированная, агрегатная, компонованная из укрупненных частей с беззазорными соединениями. Переналадка путем перекомпоновки, смены и регулировки частей	В серийном производстве, в типовых и групповых технологиях при повышенных требованиях к точности и стабильности процесса
Сборно-разборная	СРО	Агрегатная, компонованная из специализированных частей, соединяемых с зазором. Переналадка путем перекомпоновки и смены частей	В серийном производстве, в типовых и групповых технологиях при повышенных требованиях к точности и стабильности процесса
Универсально-сборная	УСО	Специализированная, агрегатная, компонованная в основном из деталей с зазорами. Переналадка путем перекомпоновки	В серийном и единичном производствах, в том числе и в групповых технологиях
Универсально-безналадочная	УБО	Монолитная с элементами регулирования, включаемая в комплектацию станков	Для всех типов производств и видов работ

НСО из-за снижения загрузки и роста номенклатурного состава оснастки, а также длительных сроков подготовки производства. Последующие системы смягчают эти недостатки вследствие снижения уровня специализации, а следовательно, повышения универсальности применения.

Следующей в ряду по эффективности является СНО, ориентированная на изготов-

ление по типовым технологическим процессам изделий одного конструкторского типа, сходство которых позволяет подналадивать приспособления за счет простых регулировочных устройств, схематически показанных на рис. 4.2.1, б; сохраняются высокий уровень специализации, производительности, автоматизации и остаются низкими затраты, так как они относятся не на одно изделие, а на весь тип изделий.

В технологических группах номенклатура изделий расширяется за счет объединения нескольких конструкторских типов. Это ведет к необходимости универсализации приспособлений (рис. 4.2.1, а) в системе (УНО). Она достигается разделением их на базовую 2 и сменную 3 части: призмы базирующих элементов, губки зажимных, пакеты штампов, вкладыши пресс-форм. Меняя их и используя регулировки 1, можно легко приспособиться к конкретному изделию группы. Высокая эффективность сохраняется за счет производительности обработки и ограниченных затрат на изготовление сменных частей.

Следующие системы: универсально-сборная переналаживаемая (УСПО), сборно-разборная (СРО), универсально-сборная (УСО), представленные на рис. 4.2.1, г-е, характеризуются агрегатированием оснастки, позволяющим компоновать специализированные приспособления из универсальных агрегатов и деталей общего применения. Таким путем удастся создать оснастку в несколько раз быстрее, чем при полном цикле проектирования и изготовления. В УСПО эти преимущества объединяются с возможностью подналадки и беззоровых соединений агрегатов, что приближает УСПО к УНО по многономенклатурности и к НСО по точности при сравнительно низкой стоимости. Такое сочетание преимуществ позволяет обосновать введение в агрегаты механизированных гидравлических приводов, приспособившая оснастку к работе с автоматическим оборудованием. Последующие системы, сохраняя универсальность, снижают точность из-за зазоров в соединениях. Завершает ряд система УБО (рис. 4.2.1, ж), широкая универсальность которой ведет к низкой производительности. Этими показателями определяется применимость УБО в единичных технологических процессах.

Наиболее удачно сочетают преимущества специализации конструкции и универсальности применения системы, расположенные в центральной части ряда: СНО, УНО, УСПО, СРО, УСО. Поэтому они получают все большее распространение, особенно в унифицированных технологиях. Системность этих видов оснащения проявляется в наличии единой элементной базы агрегатов, типовых узлов, базовых конструкций, на основе которых быстро создаются дешевые и производительные приспособления. Системы НСО и УБО занимают противоположные позиции и имеют свои области применения; первая - для массового производства или особо сложных случаев обработки, вторая - в тех случаях, когда все остальные варианты оказываются нереализуемыми или неэффективными.

**Переналаживаемая технологическая оснастка.** Унификация технологии для изготов-

ления изделий одного типа или группы обеспечивает эффект за счет специализации, которая в наибольшей степени отражается на оснастке. При групповой технологии создается комплект наладочных базовых приспособлений, которые покрывают потребности действующих групп изделий. Подналадка осуществляется с помощью регулировочных или сменных элементов, настраиваемых на каждое конкретное изделие. Все приспособления специализированы для выполнения определенных работ и снабжены устройствами подналадки (рис. 4.2.2).

Самоцентрирующиеся тиски (рис. 4.2.2, а) имеют сменные двухсторонние призмы, расположенные на верхней плоскости и снабженные регулятором положения относительно центральной линии. Тем самым обеспечивается подналадка под асимметричные заготовки. Агрегатирование конструкции позволяет скомпоновать вариант базового приспособления для обработки сложных деталей типа рычагов, закрепляемых на разном уровне. Элементами механизации являются цилиндры гидроприводов, установка которых обоснована высокой нагрузкой приспособления (рис. 4.2.2, б). Механизированные тиски (рис. 4.2.2, в) позволяют закреплять большую номенклатуру изделий путем смены наладок на вертикальной стенке корпуса, на подвижном ползуне и на горизонтальной поверхности в зажиме. Комбинированное расположение тисков на плите (рис. 4.2.2, г) дает возможность обрабатывать длинномерные детали различной конфигурации, подстраивая тиски сменными наладками. Базовые конструкции с наклонной (рис. 4.2.2, д) и вертикальной (рис. 4.2.2, е) поверхностями крепления расширяют представление о возможностях специализации приспособлений под любые требования высокопроизводительной обработки.

Переналадка штамповой и прессовой оснастки состоит в замене исполнительных частей: пакетов и вкладышей в базовом блоке, имеющем соответствующие гнезда и зажимы (рис. 4.2.2, ж). Приведенные примеры показывают возможности оснащения групповых технологических процессов системами УНО, УСПО, СРО, УСО. Для типовых технологических процессов уровень специализации поднимается за счет перехода на систему СНО. Тем самым открываются дополнительные возможности для повышения производительности, механизации и автоматизации. На рис. 4.2.2, з представлена схема специализированного наладочного приспособления для крепления геометрически подобных рычагов. Каждый зажим снабжен гидроблоком. Установка работа или другого исполнительного механизма подачи позволяет автоматизировать установку деталей.

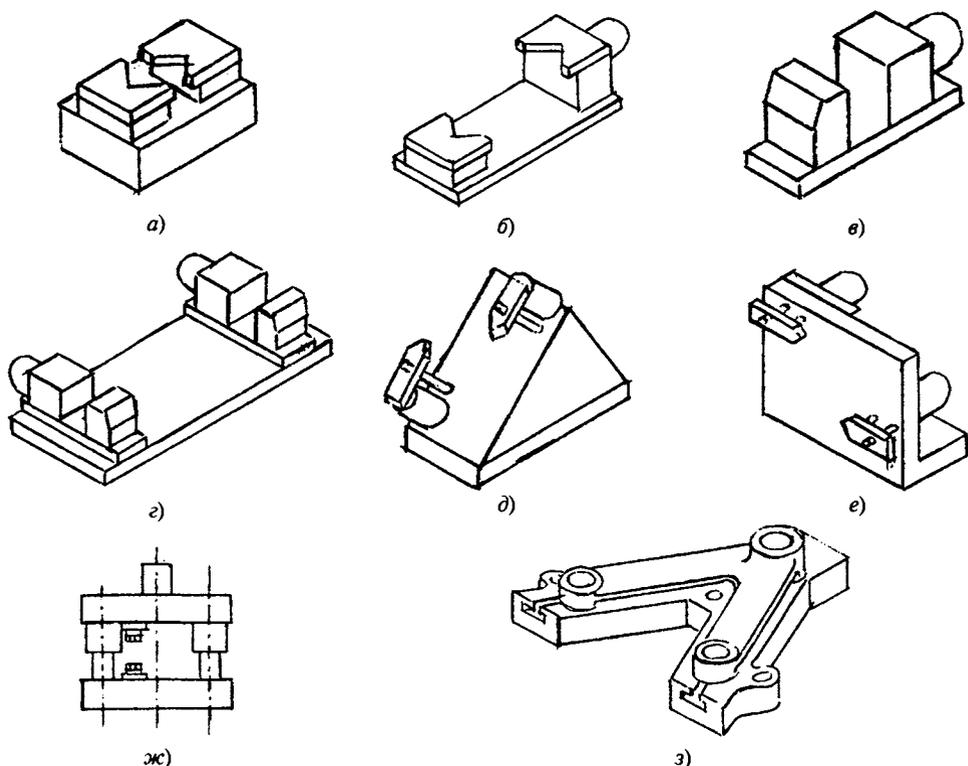


Рис. 4.2.2. Схемы базовых унифицированных приспособлений:  
 а - ж - базовый комплект групповых приспособлений; з - типовое приспособление

#### 4.2.2. ГРУППОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАТКА

Классификация групповой оснастки осуществлена в двух направлениях:

- разработка принципиальной схемы классификации и кодирования;
- детальное рассмотрение отдельных классификационных признаков для подразделений.

Основными научно-методическими положениями разработанной классификации являются:

- единство конструктивно-технологических и эксплуатационных признаков для всей совокупности групповой оснастки;
- взаимосвязанное рассмотрение конструктивно-технологических и эксплуатационных особенностей групповой оснастки и обрабатываемых деталей в ней;
- единая теоретическая основа классификации групповой оснастки и деталей;
- метод построения классификационных подразделений - дедуктивный (деление множества на подмножества), от общего к частному;
- взаимосвязь классификации групповой оснастки с положениями, регламентированными ЕСКД и ЕСТПП.

Согласно классификатору ЕСКД, первым классификационным подразделением является "Оснастка технологическая" - класс 29; вторым - "Приспособления станочные, сборочные, сварочные" - подклассы 4, 5, 6 и далее для решения конкретных задач:

*X* - функциональное назначение и характер операций, выполняемых в групповой оснастке - группа деталей;

*Y* - конструктивные особенности деталей и их элементов и компоновок групповой оснастки - подгруппа деталей;

*Z* - функциональное назначение и конструктивные особенности элементов и сборочных единиц групповой оснастки - вид;

*Q* - размерно-весовая характеристика элементов и сборочных единиц групповой оснастки.

Каждый из этих признаков имеет конечное число компонентов:  $X_{(xi)} - X_0; X_1; X_2; X_3; X_4; X_5, i = 6$ , [обработка; сборка; переустановка; контроль линейных размеров; контроль пространственных размеров; поворот (кантовка)];

$Y_{(yj)} - Y_1; Y_2; \dots; Y_{10}, j = 10$  - компоновка групповой оснастки для изготовления деталей;

$Z_{(zu)} - Z_0; Z_1; \dots; Z_5, u = 6$ , базовые элементы комплекта групповой оснастки (опорно-корпусные, фиксирующие, прижимные, крепежные, специальные);

$Q_{(gv)} - Q_1; Q_2; Q_3; Q_4, v = 4$ , детали и сборочные единицы групповой оснастки.

Таким образом, вся совокупность деталей и сборочных единиц групповой оснастки определяется совокупностью компонентов, входящих в четыре признака. Рассматривая все разнообразие конструкций групповой оснастки как произведение признаков, пред-

ставим эти конструкции в виде конечного множества  $n$  логических возможностей:

$$X_{(xi)} Y_{(yj)} Z_{(zu)} Q_{(gv)} = n.$$

Общее количество логических возможностей, исходя из имеющегося числа компонентов каждого признака, составляет  $i, j$  и  $v$ .

Состав и значимость кода признаков приспособлений, включенных в классификатор приспособлений, представлены на рис. 4.2.3.

	XX	XX	X	X	XX	XXX	X	X	XX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXXXX
1. Вид приспособления в зависимости от основной геометрической формы детали (класс)															
2. Вид приспособления в зависимости от наименования, функции и параметров детали (подкласс)															
3. Вид приспособления в зависимости от габаритных размеров детали															
4. Вид оснастки в зависимости от метода обработки детали															
5. Вид приспособления в зависимости от конструктивных и технологических особенностей детали (группа)															
6. Вид приспособления в зависимости от вида обрабатываемой поверхности заготовки															
7. Вид оснастки в процессе механической обработки в технологической системе															
8. Система агрегатирования приспособления															
9. Вид приспособления в зависимости от вида обработки															
10. Трудоемкость проектирования															
11. Трудоемкость изготовления															
12. Затраты на проектирование															
13. Затраты на изготовление															
14. Время на установку заготовки в приспособление															
15. Шифр приспособления															

Рис. 4.2.3. Состав и значимость кодов признаков станочных приспособлений

Таблицы классификации и кодирования приспособлений:

по признакам "вид станочного приспособления в зависимости от основной геометрической формы детали" и "вид станочного приспособления в зависимости от наименования, функции и параметров детали" - по два знака кода;

по признаку "вид станочного приспособления в зависимости от габаритных размеров детали" - один знак кода;

по признаку "вид оснастки в зависимости от метода обработки детали" - один знак кода;

по признаку "вид станочного приспособления в зависимости от конструктивных и технологических особенностей детали для подкласса "рычаги" - два знака кода;

по признаку "вид станочного приспособления в зависимости от вида обрабатываемой поверхности заготовки" - три знака кода.

Классификацию и кодирование осуществляют по группам приспособлений.

Табл. 4.2.2 - 4.2.4 классификатора позволяют классифицировать и кодировать приспособления по признакам, характеризующим их конструкцию.

Классификацию и кодирование оснастки по признаку "вид оснастки в процессе механической обработки в технологической системе" ведут в соответствии с табл. 4.2.2. В соответствии с этим признаком всю оснастку,

используемую при обработке деталей резанием, разделяют в зависимости от назначения на оснастку для установки заготовок (станочные приспособления), оснастку для установки инструмента и режущий инструмент. Кодирование оснастки по этому признаку выполняют одним знаком.

Классификацию и кодирование оснастки по признаку "система агрегатирования станочных приспособлений" выполняют в соответствии с табл. 4.2.3. Для оснащения операций обработкой резанием предусмотрено шесть систем станочных приспособлений: УБН, УНП, СНП, НСП, СРП, УСП. Кодирование компоновок приспособлений по этому признаку выполняют одним знаком.

Классификацию и кодирование оснастки по признаку "вид станочного приспособления в зависимости от вида обработки" ведут в соответствии с табл. 4.2.4.

Коды признаков "трудоемкость проектирования станочного приспособления" и "трудоемкость изготовления станочного приспособления" соответствуют трудоемкости проектирования и изготовления кодируемой компоновки приспособления (в часах).

Коды признаков "затраты на проектирование станочного приспособления" и "затраты на изготовление станочного приспособления" соответствуют затратам на проектирование и изготовление кодируемой компоновки приспособления (в рублях).

#### 4.2.2. Классификация и кодирование оснастки по признаку "вид оснастки в процессе механической обработки в технологической системе"

Вид оснастки в процессе механической обработки в технологической системе	Код
Оснастка для установки обрабатываемых заготовок (станочные приспособления)	1
Оснастка для установки инструмента	2
Режущий инструмент	3
·	·
·	·
·	9

#### 4.2.3. Классификация и кодирование приспособлений по признаку "система агрегатирования станочных приспособлений"

Система агрегатирования станочных приспособлений	Код
Универсальное безналадочное приспособление (УБП)	1
Универсальное наладочное приспособление (УНП)	2
Специализированное наладочное приспособление (СНП)	3
Неразборные специальные приспособления (НСП)	4
Сборно-разборные приспособления (СРП)	5
Универсально-сборные приспособления (УСП)	6
·	·
·	·
·	9

#### 4.2.4. Классификация и кодирование приспособлений по признаку "вид станочного приспособления в зависимости от вида обработки"

Вид приспособления в зависимости от вида обработки	Код	Вид приспособления в зависимости от вида обработки	Код
Токарное	01	Центровочное	14
Сверильное	02	Болторезное	15
Фрезерное	03	Резьбофрезерное	16
Строгальное	04	Зубошлифовальное	17
Долбежное	05	Программно-фрезерное	18
Протяжное	06	Программно-токарное	19
Шлифовальное	07	Программно-сверильное	20
Резьбонакатное	08	Автоматное	21
Зубофрезерное, зубозакругляющее	09	Револьверное	22
Шлицефрезерное	10	Зубодолбежное	23
Шлицешлифовальное	11	Фрезерно-центровочное	24
Отрезное	13	Токарно-копирвальное	25

Код признака "время на установку заготовки в станочное приспособление" соответствует времени на установку заготовки в рассматриваемую компоновку приспособления в минутах (время берется из операционной карты).

Код признака "шифр станочного приспособления" соответствует чертежному номеру приспособления, проставляемому в угловом штампе сборочного чертежа приспособления.

**Перенастраиваемая групповая технологическая оснастка.** При групповой обработке деталей с использованием станочных приспособлений предъявляются повышенные требования к их конструкциям. Групповые приспособления должны обеспечить:

установку, базирование и закрепление всей номенклатуры деталей, имеющих базовые поверхности;

снижение затрат времени на установку, снятие, выверку заготовок;

применение быстродействующих механизмов с целью сокращения вспомогательного времени;

использование управляемых элементов, особенно для оборудования с ЧПУ;

постоянство взаимного расположения инструмента и каждой обрабатываемой заготовки группы;

жесткость компоновки и крепежных элементов.

Групповые комплекты приспособлений содержат сборочные единицы, позволяющие в совокупности со сменными элементами-блоками компоновать высокопроизводитель-

ные приспособления повышенной жесткости для различных станков, в том числе для станков с ЧПУ. Групповая обработка заготовок в этих приспособлениях эффективна до габаритных размеров 1500×400×300 мм или Ø400××1500 мм и массой до 300 кг.

Базовые узлы групповой оснастки должны иметь минимальное число стыков и автоматизированный привод: гидравлический, пневматический, электромеханический, магнитный и комбинированный. Групповые комплекты оснастки делятся на базовые, установочные, прижимные, крепежные, а также на элементы привода, арматуру, исполнительные механизмы. К базовым сборочным единицам относятся плиты с пневмо- и гидрозажимом, электромеханическим или магнитным зажимом, гидрофицированные тиски и тисочные сменные губки, плиты магнитные, самоцентрирующие и плавающие зажимы. К установочным элементам относятся многоместные призмы и наладки к тисочным губкам, подставки и кронштейны к гидро- и пневмоцилиндрам, фиксирующие призмы. К прижимным элементам относятся усиленные прихваты, клиновые и торцовые и эксцентриковые зажимы, пневмо-, гидро-, электромеханические и магнитные зажимы.

К крепежным элементам относятся усиленные пазовые болты, пазовые сухари, цанговые стержни, магнитные прижимы. Приводы и арматура используются из комплектов, применяемых как к единичной оснастке, так и к УСП.

В токарные комплекты групповых приспособлений, в том числе для станков с ЧПУ,

входят переналаживаемые поводковые патроны и центры, комбинированные патроны с противовесами, центровые упоры, патроны с полкой, цанговый патрон, кулачковые оправки, приводы патронов и оправок.

Для сверлильных, фрезерных, строгальных и плоскошлифовальных комплектов групповых приспособлений применяют быстроналаживаемые плиты с пневмозажимом, гидрофицированные тиски со сменными губками и вкладышами, гидрофицированные подвижные губки со встроенным гидроцилиндром, магнитную плиту (с постоянными магнитами и электромагнитами), самоцентрирующие зажимы для обработки поверхностей относительно оси заготовки, плавающий зажим для двухместных приспособлений, многоместную и фиксирующую призмы, клиновые зажимы, универсально-наладочные приспособления со сменными элементами, комплекты столов-спутников (в том числе и для деталей типа фланцев).

Из универсально-безналадочных приспособлений в робототехнологических комплексах (РТК), гибких производственных модулях (ГПМ) применяют пневматические поворотные тиски, состоящие из основания и поворотного корпуса со встроенным пневмоцилиндром, электрораспределительного крана, рычага для перемещения губки и устройства прижима заготовки к неподвижной губке, а также блока подготовки воздуха. Быстрая переналадка подвижной губки осуществляется поворотом губки с помощью рукоятки закрепления против часовой стрелки; выступ планки выходит из паза корпуса тисков, а губка освобождается. Затем губку перемещают в требуемое положение с последующим введением выступа планки в паз корпуса и закреплением нового положения поворотом рукоятки по часовой стрелке. Размер обрабатываемой (зажимаемой) заготовки 20 ... 240 мм; ход губки - 20 мм.

Гидравлические тиски с пневмогидропреобразователем мод. РКВ7210-4231 предназначены для закрепления штучных заготовок и состоят из тисков с гидравлическим приводом, пневмо-, гидроусилителей и комплектного устройства подготовки и регулировки воздуха. Ход зажимной губки до 200 мм. Такие тиски не требуют переустановки губки.

Быстропереналаживаемые тиски изготавливают пяти типоразмеров с шириной губки 100, 125, 150, 200 и 300 мм, они состоят из основания с продольным Т-образным пазом, к которому посредством шпонки и двух винтов прикреплен неподвижная губка. Подвижная губка имеет вертикальный Т-образный паз, в который входит сферический конец винта, установленный в стойке. Стойка

посредством шаровой опоры контактирует с одним из гнезд, находящихся на дне Т-образного паза основания тисков. На выступающих концах запрессованного в стойки штыря выполнены лыски.

Быстрая переналадка подвижной губки осуществляется наклоном стойки влево. При этом шаровая опора выходит из гнезда основания, после чего стойку с подвижной губкой перемещают в требуемое положение, а шаровая опора входит в соответствующее гнездо основания. При повороте винта подвижная губка перемещается и закрепляет обрабатываемую заготовку. При этом стойка поворачивается относительно шаровой опоры и лыски штыря заклиниваются на направляющих Т-образного паза основания. Две наклонные губки контактируют с неподвижной и подвижной губками по наклонным плоскостям, что обеспечивает при закреплении заготовки прижим последней к опорной поверхности тисков.

Универсально-наладочные тиски с пружинно-гидравлическим приводом мод. 7202-0003, 7202-0008, 7202-0031, 7202-0018, 7202-0021 имеют ход губок 125, 200, 250, 320, 400 мм. Для станков мод. Р12РФ3, 6520Ф3 предназначены универсально-наладочные гидравлические приспособления для фрезерных работ мод. Д7206-4001, Д7206-4006, 7306-4002, 7306-4003, 7306-4005, соответственно.

Для станков мод. ИР200, ИР320, ИР500, ИР800 предназначены универсально-наладочные приспособления мод. КСС-1 (Ивановский завод тяжелого станкостроения). Для станков мод. ЛФ-260, 245ВМФ2 предназначены универсально-наладочные приспособления мод. С7081-4007, С7080-4001. Для станков мод. 2204ПФ4, 2206ПФ4 предназначены универсально-наладочные приспособления мод. РТУ-5022. Широко применяют универсально-сборные приспособления конструкции НИИПТмаш, систему гидрофицированных УСП мод. УСПМ-12ЧПУ и УСПМ-164ПУ.

Специальные неразборные одноместные приспособления используют для установки и закрепления заготовок при небольших циклах обработки, а многоместные приспособления - в случаях, когда не удовлетворяются требования производительности и точности обработки. Поскольку такие приспособления предназначены для единичного и мелкосерийного производства, то их создают упрощенными с использованием готовых элементов.

Для фрезерования граней многогранников, лысок, прямых канавок, шпоночных и шлицевых пазов, прямозубых цилиндрических и конических зубчатых колес, торцовых зубьев муфт, винтовых канавок, деления заготов-

ки по окружности, применяют *делительную головку*, в том числе управляемую от ЧПУ.

Делительные головки бывают шести типоразмеров: 160, 200, 250, 320, 400, 500 мм. Каждому размеру стола должен соответствовать определенный типоразмер делительной головки (например, для консольно-фрезерного станка с шириной стола 320 мм рекомендуется делительная головка диаметром 250 мм).

На чугунном основании со стяжными дугами установлен корпус. Его можно поворачивать на угол, определяемый по шкале и нониусу. На плоскости основания имеются два сухаря для крепления и фиксации в пазах фрезерного станка. В корпусе расположен шпиндель с резьбой и центрирующим пояском со сквозным отверстием, оформленным по концам в виде конуса Морзе. На одном из них установлен центр, а на другом - оправка дифференциального деления. На резьбе шпинделя закреплен трехлучковый самоцентрирующийся или поводковый патрон. На буртике шпинделя установлен лимб непосредственного деления с 24 отверстиями.

В средней части шпинделя расположено червячное колесо с круговой выпточкой на торце, в которую входит конец зажима. Колесо получает вращение от червяка, расположенного в эксцентрической втулке. Поворотом втулки рукояткой червяк можно ввести в зацепление или вывести из него. Делительный диск, находящийся на валу, собран в подшипниках скольжения, установленных в крышках корпуса и сцентрированных в расточке; крышки закреплены к основанию корпуса. К делительному диску пружиной прижат раздвижной сектор, состоящий из линеек и зажимного винта, обеспечивающий фиксацию линеек, установленных под требуемым углом. Пружинная шайба предотвращает самопроизвольный поворот сектора. Вал механического привода от станка закреплен в крышке и находится в зацеплении с коническим зубчатым колесом, установленным на валу делительного диска. Делительный диск фиксируется стопором.

Центр задней бабки можно перемещать в горизонтальном и вертикальном направлениях. В комплект делительной головки входит задняя бабка, в основании которой расположен корпус, связанный с рейкой с помощью штифта. Задняя бабка в требуемом положении крепится на столе станка. Люнет, входящий в комплект, служит дополнительной опорой при обработке нежестких валов. Дифференциальные делительные головки получают управление от ЧПУ: ими комплектуют многоцелевые станки, например мод. ОЦЗВ.

#### 4.2.3. ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМАЯ ОСНАСТКА

К вспомогательной групповой оснастке предъявляются следующие требования, обеспечивающие повышение качества и производительности обработки:

предварительная настройка вне станка на необходимые размеры (настройка режущего инструмента на заданный размер обработки);

быстроточность при переналадках; высокая точность и жесткость; унификация присоединительных размеров;

универсальность применения; возможность автоматического крепления;

обеспечение автоматической смены инструмента или пакета с заготовкой;

виброустойчивость;

минимальная погрешность установки.

На токарной группе оборудования применяются следующие типы вспомогательной групповой оснастки:

вспомогательный инструмент с цилиндрическим хвостовиком для установки режущего инструмента в револьверную головку;

вспомогательный инструмент с базировочной призмой для установки режущего инструмента в револьверную головку;

промежуточные втулки для регулируемых расточных резцов;

расточные головки;

расточные оправки;

сменные захватные устройства к промышленным роботам и манипуляторам;

сменные вкладыши для инструментальных поддонов или поддонов для заготовок;

патроны шестилучковые с автоматическим приводом.

На фрезерно-сверлильно-расточной группе оборудования применяют следующие типы вспомогательной групповой оснастки:

сборный вспомогательный инструмент с предварительным регулированием вылета инструмента;

хвостовики инструмента с конусностью 7:24 (40 или 50);

вспомогательный инструмент с унифицированными присоединительными поверхностями (оправки для насадных фрез, оправки предварительной настройки размера от торца до наибольшего диаметра конуса хвостовика; патроны цанговые; державки с регулируемыми втулками и оправками; оправки расточные сборные; оправки для подрезных пластин; головки расточные трехзубые; головки расточные групповые; патроны цанговые; патроны с хвостовиком, фиксированные в

державке; патроны шестикулачковые с предохранительным устройством для резьбы);

столы-спутники;  
инструментальные спутники (коробчатые и револьверные);  
загрузочные и разгрузочные устройства;  
накопители заготовок и инструмента;  
устройства удаления стружки;  
сменные захватные устройства к промышленным роботам и манипуляторам.

Групповыми устройствами для выверки заготовок в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно рабочих органов станка являются механические и механогидравлические домкраты (табл. 4.2.5) и распорки, в том числе винтовые домкраты ДК-5, ДК-10.

#### Технические характеристики механогидравлических распорок

Тип	РМГ-10
Развиваемое усилие, кН	10
Рабочий ход, мм	10-12
Точность установки, мм	0,02
Прикладываемый вращающий момент, Н·м	100
Длина, мм	600-2000
Масса, кг	17-30

Для установки и закрепления обрабатываемой заготовки широко применяются трехповоротные столы с дистанционным управлением с плавающими и силовыми опорами.

#### 4.2.5. Технические характеристики механогидравлических домкратов

Параметр	ДМГ-15	ДМГ-30
Грузоподъемность, кг	15	30
Прикладываемый вращающий момент, Н·м	80	150
Точность установки, мм	0,03	0,05
Высота подъема, мм, не более	15	25
Габаритные размеры, мм	455 × 170 × 176	525 × 225 × 230
Масса, кг	47	126

#### 4.2.6. Технические характеристики крепежных наборов

Параметр	КН1-1	КН1-2	КН1-3	КН11А-1	КН11А-2	КН11А-3
Ширина Т-образного паза, мм	18	22	28	18	22	28
Шаг перенастройки, мм	3,5	3,5	5	3,5	3,5	5
Высота закрепления, мм	46-140	46-140	62-225	10-100	5-140	0-200
Допускаемое усилие зажима, кН	30	50	100	30	50	50
Масса, кг	5	7,3	19,5	2,4	4,9	10,1

#### 4.2.7. Силовые механогидравлические зажимы, преобразующие вращательное движение в поступательное

Параметр	МЗ-10	МЗ-10А	МЗ-15	МЗ-15А	МЗ-25
Исполнение	1	2	1	2	1
Развиваемое усилие зажима, кН	100	100	160	160	250
Прикладываемый вращающий момент, Н·м, не более	50	50	50	50	50
Рабочий ход поршня, мм	10	10	7	7	4,5
Масса, кг	9,8	9,8	10,7	10,7	13,9

Для закрепления заготовок используются унифицированные крепежные наборы (табл. 4.2.6), применяемые в комбинации с жесткими опорами.

Силовые механогидравлические зажимы, преобразующие вращательное движение в поступательное с развитием усилия, приведены в табл. 4.2.7.

Для закрепления обрабатываемой заготовки и сменных кулачков на планшайбе используются гидравлические ключи (табл. 4.2.8) с гидродвигателем возвратно-поступательного движения и ключи с храповой муфтой.

Для закрепления заготовок при обработке на фрезерной, строгальной и сверлильной группах станков применяются переналаживаемые тиски с пневмоприводом и сменными вкладышами (табл. 4.2.9).

**Технические характеристики установочных приспособлений (групповых)**

Диаметр закрепляемой заготовки, мм	250-780
Масса устанавливаемой заготовки, кг, не более	1000
Усилие зажима, кН	100
Рабочая площадь стола, мм	800×600
Вертикальное перемещение стола, мм, не более	300
Мощность электродвигателя, кВт	2,8

Установка, выверка и закрепление заготовок на горизонтально-расточных станках выполняются с помощью приспособлений, имеющих сменные элементы для деталей тел вращения и плоских деталей.

Для безударного закрепления инструмента (оправок) в шпинделях горизонтально-расточных станков применяют гидравлические клинья (табл. 4.2.10).

На токарно-винторезных станках используют унифицированные переналаживаемые резцедержатели с набором вспомогательного и режущего инструмента. В комплекте с резцовыми головками выпускаются и поставляются резцовые блоки для расточных и отрезных работ, блок с внутренним конусом для установки сверл и зенкеров, а также комплекты расточных борштанг с набором резцовых головок и расточных головок (табл. 4.2.11).

Для растачивания отверстий с применением блокодержателей (табл. 4.2.12), борштанг и крестовин широко применяют однорезцовые блоки (табл. 4.2.13).

Для обработки торцовых поверхностей, подрезки уступов, растачивания канавок и цилиндрических поверхностей используют летучие суппорты (табл. 4.2.14).

Широко применяют конструкции навесных фрезерных (табл. 4.2.15), расточных, сверлильных, шлифовальных головок для черновой и чистовой обработки плоскостей, пазов, карманов, угловых уступов и углублений.

**4.2.8. Технические характеристики гидравлических ключей**

Параметр	КГ-40	КГ-50	КГ-70
Развиваемый вращающий момент, кН·м	400	500	700
Рабочее давление, МПа	5	5	5
Высота центров станка, мм	850-900	1000-1200	1200-2400
Квадрат винта кулачка, мм	36	36; 42	46
Масса, кг:			
гидродвигателя	5	6	7
муфты	7	7	7

**4.2.9. Технические характеристики пневматических тисков**

Параметр	ТП-2,7	ТП-4,5	ТП-7,0
Усилие зажима, кН	27	40	67
Ход зажимной губки, мм	19	19	19
Габаритные размеры, мм	360×575×270	440×785×280	510×820×305
Масса, кг	130	253	350

**4.2.10. Технические характеристики гидравлических клиньев**

Параметр	ГК-6	КК-80	ГК-900	ГК-120	ГК-140
Диаметр шпинделя станка, мм	110-125	125; 150	160; 175	200; 220	220; 250
Конус	Морзе 6	80	100	120	140
Развиваемое усилие, кН	4	5	8	11	12,5
Прикладываемый вращающий момент, Н·м	3	6	7	12	15
Рабочий ход, мм	6	7	10	10	10
Масса, кг	0,5	0,8	0,8	2	3

**4.2.11. Технические характеристики расточных головок**

Параметр	РГ-75	РГ-90	РГ-115
Диаметр, мм	90-150	150-200	200-400
Сечение державки резца, мм	20 × 20	30 × 30	40 × 40
Проходной диаметр, мм	75	90	115
Вылет оправки, мм	230	250	200
Присоединительный конус хвостовика	Морзе 6; 80	80, 100, 120	80, 100, 120, 140
Масса, кг	14 - 17	25 - 33	30 - 46

**4.2.12. Технические характеристики блокодержателей**

Параметр	Б-200	Б-250
Диаметр растачиваемого отверстия, мм	200-500	330-600
Проходной диаметр, мм	200	250
Сечение державки резца, мм	60×40; 40×40	30×30
Присоединительный конус хвостовика	80, 100	120
Масса, кг	38	63

**4.2.13. Технические характеристики односторонних блоков**

Параметр	ОБ-260	ОБ-290
Диаметр растачиваемого отверстия, мм	320-500	400-550
Длина, мм	260	290
Сечение державки резца, мм	30×30	30×30
Сечение корпуса, мм	60×60	60×60
Масса, кг	6,3	7

## 4.2.14. Технические характеристики летучих суппортов

Параметр	ЛС-175	ЛС-100	ЛС-50
Диаметр конуса, мм	120; 140	100; 120	80-100
Диаметр шпинделя, мм	200-250	160-250	125-200
Диапазон диаметров растачиваемых отверстий, мм	500-1000	300-600	190-350
Ход штанги, мм, не более	175	100	50
Радиальная подача на оборот, мм	0,125-0,25	0,125-0,25	0,125-0,25
Сечение резца, мм <sup>2</sup>	40×40	30×30	20×30
Масса, кг	162	91	31

## 4.2.15. Технические характеристики навесных фрезерных головок

Параметр	НФГ-400	НФГ-100
Допускаемый вращающий момент, Н·м	4000	1000
Допускаемые режимы резания стальных заготовок торцовыми фрезами:		
глубина резания, мм	8	5
минутная подача, мм	200	150
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	120-200	120-200
Масса, кг	340	220

## 4.2.4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА, ЗАЙМСТВОВАНИЯ И УНИФИКАЦИИ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ПРОЦЕССОВ

**Функционирование автоматизированной системы.** Система выбора, заимствования и унификации приспособлений входит в АСТПП, но имеет функциональную завершенность, которая позволяет использовать ее обособленно. На рис. 4.2.4 представлен алгоритм функционирования системы. Его структура включает выбор системы оснастки (блок 1) из перечня в п. 4.2.1. Результат выбора определяет содержание запросов на поиск оснастки, с которым обращаются к информационно-поисковой системе, выделенной на схеме штриховыми линиями. Она имеет два контура поиска: фактографический с определением кодов приспособлений и документальный, выдающий чертежи, спецификации, технические условия. Первый из них обязателен в процессе поиска, второй включается в дело по мере надобности. После завершения поиска решаются задачи: конструирование сменных частей к базовым типовым и групповым приспособлениям и дополнительных частей к их агрегатным вариантам (блок 9); конструирование унифицированных приспособлений

(блок 20); модернизация заимствованных конструкций (блок 26).

Информационно-поисковая система, состоящая из базы данных по приспособлениям и ее системы управления, является ядром алгоритма. Оно дополняется технологическим предварением и конструкторским завершением, расширяющими функции ядра до уровня проектирующей системы с развитой базой знаний, включающей автоматически выполняемые работы по расчетным и логическим алгоритмам, заключенным на схеме в прямоугольники, а также диалоговый режим, обозначенный на схеме ручными работами в трапециях. Система настраивается на данные конкретного производства путем накопления базы данных по применяемым приспособлениям, введения в алгоритмы норм, определяющих оптимальный выбор систем оснастки, типоразмеров ее, точностных параметров производительности.

Вертикальная структура схемы содержит пять столбцов блоков, в которых решаются различные технологические задачи. *Первый* из них (блоки 2-9) касается выбора и доработки типовых и групповых приспособлений в рамках специализированной наладочной и универсально-наладочной систем оснастки. Они

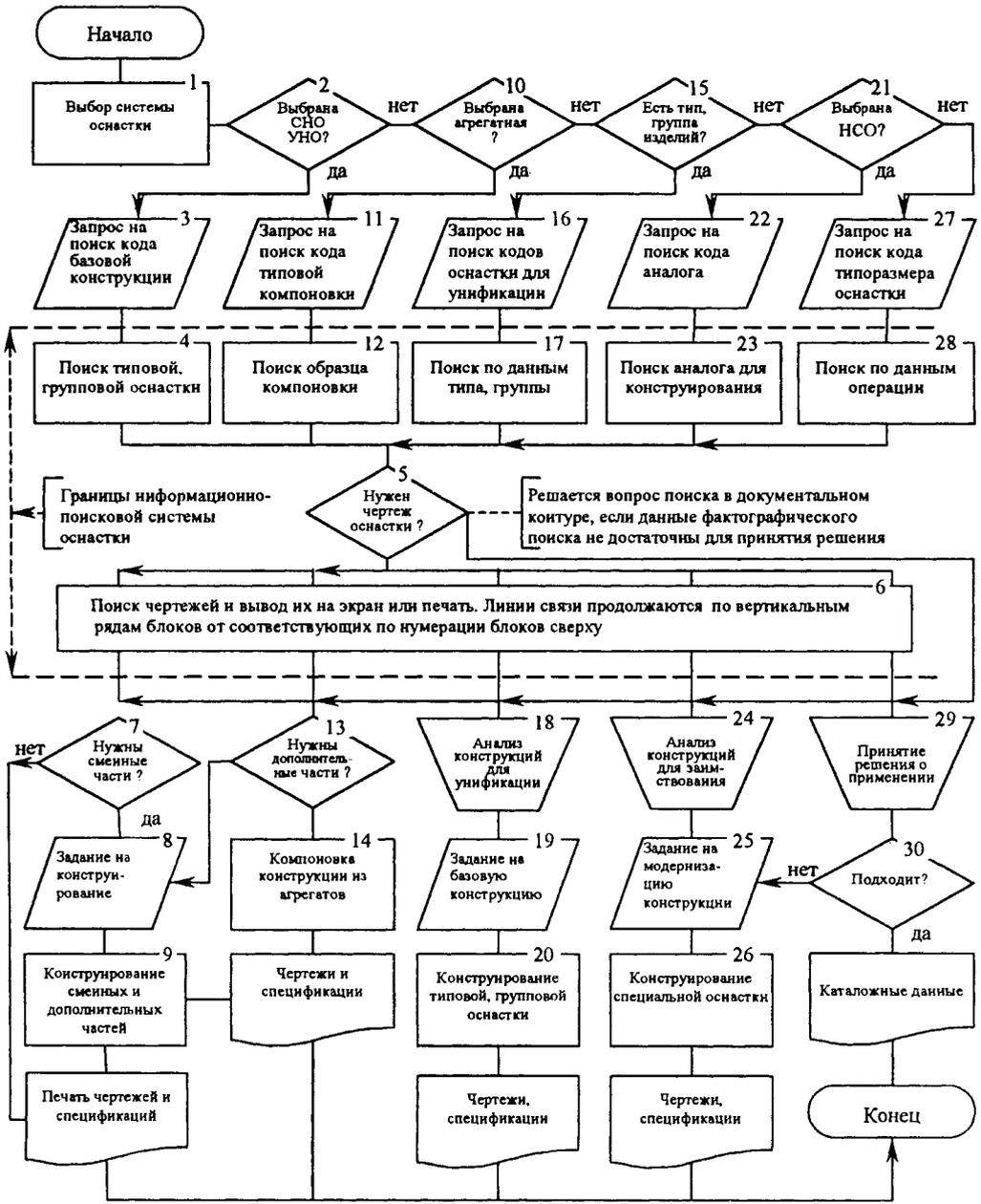


Рис. 4.2.4. Алгоритм функционирования системы выбора, заимствования и унификации приспособлений

применяются для комплектованных типов и групп, а также в единичных технологиях при наличии экономических обоснований. *Второй столбец* (блоки 10-14) охватывает агрегатные системы: УСНО, УСО, СРО. Первая из них в наибольшей степени отвечает унифицированной технологии, так как имеет устройства подналадки. Остальные также подходят для такой организации. Все они широко применяются в единичных технологиях для резкого подъема уровня оснащенности за счет компоновки специальных приспособлений из агрегатов. *Третий столбец* (блоки 15-20) решает задачу унификации оснастки для вновь создаваемых типов и групп. Унификация может вылиться в создание приспособлений для одной группы, в систему базовых конструкций, покрывающих потребности всех типов и групп, или в элементную базу агрегатов для компоновки нужных конструкций по мере надобности. *Четвертый столбец* (блоки 21-26) относится к конструированию неразборной специальной оснастки, для успеха которого нужно заимствовать лучший аналог и свести проект к модернизации его под новые требования. *Пятый столбец* содержит блоки поиска типоразмеров универсально-безналадочной оснастки по каталогам.

**Структура и процедуры системы выбора приспособлений.** Система выбора приспособлений представляет собой банк данных, включающий: базу данных приспособлений, программное обеспечение в виде системы управления базой данных, базу знаний по технологии и конструированию, технических средств для накопления, обновления и представления результатов поиска и проектирования.

База данных составляет информационную основу системы и содержит поля, записи, файлы. Поле - это наименьшая распознаваемая единица данных; совокупность связанных полей составляет запись, а последние компонуются в наборы данных. Эти структуры наполняются разным содержанием в зависимости от уровня представления данных.

Первый, внешний уровень, отвечает потребностям пользователя, в качестве которого может выступать специалист-проектировщик или проектирующая надсистема. Здесь данные о приспособлении представляются в форме, потребной для заполнения технологических карт, чертежей, спецификаций.

Второй, логический уровень, отражает структуру данных, приспособленную для накопления, поддержания, пополнения и исправления записей. Эта структура задается принятой системой управления базой данных.

Третий уровень - это физическое представление данных на магнитных носителях. Он задается характеристиками конкретной

ЭВМ, используемыми при программировании.

На каждом из уровней возможны варианты представлений. На первом используются записи для ручного поиска чертежей в архиве, графическое отображение чертежей на дисплее или бумаге. На логическом уровне применяются иерархические, сетевые и реляционные структуры данных.

Базы знаний представляются правилами (алгоритмами) решения конструкторско-технологических задач, выходящих за рамки поисковых процедур и требующих сложных вычислений и развитой логики. Соединение баз данных и знаний создает качественно новый уровень системы поиска, выводя его на проектирование и конструирование.

Системы управления базами данных могут быть универсальными или специальными относительно содержания записей. Первые хороши доступностью в приобретении, широкими возможностями, полным использованием потенциала ЭВМ, вторые - экономным использованием ресурсов, практической ориентацией и углублением в специфику данных. Выбор определяется соотношением получаемого эффекта от применения и затратами, а также техническими ограничениями в применении.

Наполнение базы данных представляет собой сложный процесс отбора сведений, которые понадобятся для решения текущих и будущих конструкторско-технологических задач, представления их в форме, удобной для ввода в ЭВМ, непосредственного введения данных с проверкой правильности. Каждый из этих этапов ответвлен и трудоемок, поэтому для их выполнения привлекаются технологи высокой квалификации и тщательно обосновываются вкладываемые единовременные затраты на создание базы данных.

Эксплуатация системы требует постоянного внимания, для чего вводится должность администратора базы данных, отвечающего за ее состояние и эффективное использование. Действующая система обеспечивает решение различных задач: поиск типовых и групповых приспособлений, а также аналогов для заимствования и в качестве прототипа при конструировании; получение данных по однородным видам оснастки для унификации их и разработки правил предпочтительного применения оптимальных вариантов приспособлений; определение пропускной способности производственных участков по видам работ и моделям оснащения; определение потребного оснащения для планируемой номенклатуры выпускаемых изделий по видам работ; прогнозирование перспективной потребности, а на ее основе формирование технической политики развития инструментального хозяйства.

Система выбора приспособлений используется в процессе проектирования технологических процессов следующим образом. Сначала решается вопрос о необходимости оснащения операции и определяются исходные данные для выбора приспособлений. Затем формируется поисковый образ, т.е. информационная модель нужного приспособления, базовой конструкции, набора агрегатов для компоновки. В ответ на запрос система выдает набор характеристик объекта с заданной подробностью вплоть до чертежа. Завершается процедура поиска определением пригодности выбора для конкретных условий применения по полученным данным. Эта работа обеспечивает успех проектирования и осуществляется с использованием достаточно сложных алгоритмов или знаний технолога, работающего в диалоговом режиме. Унификация конструкций приспособлений основывается на систематизации данных по признакам, интересующим проектировщика, например, по степени механизации, конструкторским решениям, видам работ. Поисковый образ формируется, исходя из условия задачи с таким расчетом, чтобы выбрать и представить в систематизированном виде данные для дальнейшей конструкторской проработки. Вопросы производительности выбираемых и конструируемых моделей оснащения решаются в системе за счет дополнения базы данных укрупненными нормативами времени выполнения типовых операций. Это дает возможность рассчитывать пропускную способность производственных участков по разным видам оснащения и, исходя из полученных данных, определять необходимую производительность, уровни механизации и автоматизации его. Основной процедурой становится адресование изделий к определенным видам оборудования с расчетами норм трудоемкости по изделиям и итоговой станкоемкости по планируемой номенклатуре их.

**Алгоритм выбора системы оснастки.** Полная реализация преимуществ унифицированной технологии достигается при обоснованном выборе системы оснастки (рис. 4.2.4). Оптимальное решение этого вопроса дает значительную долю эффекта от унификации, так как затраты на оснащение велики в сравнении с другими статьями. Алгоритм выбора приведен на рис. 4.2.5. Выбор делается среди шести видов систем, характеристики которых приведены в табл. 4.2.1. Оптимизация выбора обеспечивается последовательностью рассмотрения вариантов, которая задается расположением систем в ряд по эффективности, а следовательно по предпочтительности применения, от специальной НСО до универсальной УБО. Исходным для построения ряда принято экономически обоснованное стрем-

ление к повышению уровня специализации оснащения как к источнику получения наибольшего эффекта от сокращения технологической себестоимости, роста производительности, экономии материалов, повышения точности и от снижения затрат на приспособление. За обобщенный признак эффекта принимается коэффициент загрузки единицы технологической оснастки

$$K_3 = T_{шт} \Pi / \Phi,$$

где  $T_{шт}$  - штучное время операции;  $\Pi$  - программа выпуска изделия на плановый период;  $\Phi$  - фонд рабочего времени оснастки на плановый период.

Затраты на оснащение операции рассчитываются по соответствующим формулам:

$$\text{для НСО: } Z_{н.с} = C_{н.с} + C_y,$$

где  $C_{н.с}$  - себестоимость оснастки;  $C_y$  - затраты на установку наладки;

$$\text{для СНО, УНО: } Z_{с.н.} = C_n + C_y P + A_n / H,$$

где  $C_n$  - себестоимость изготовления сменной части наладки;  $P$  - количество установок наладки в плановом периоде;  $A_n$  - амортизационные отчисления за постоянную часть;  $H$  - количество оснащаемых операций за плановый период;

$$\text{для УСПО, УСО: } Z_{у.с} = (C_c + C_y) K + C_3,$$

где  $C_c$  - стоимость сборки;  $K$  - количество компоновок за плановый период;  $C_3$  - стоимость проката агрегатов;

$$\text{для СРО: } Z_{с.р} = C_n + (C_c + C_y) K + A_n.$$

Алгоритм начинается с просмотра возможности использования специальной оснастки по соответствию нормативу загрузки (блок 1), а также применимости ее по уровню затрат и сроку оснащения (блок 2). Затем рассматривается возможность применения специализированной оснастки для типовой технологии (блок 4) и наладочной для групповой технологии (блок 9) с соответствующим контролем пригодности (блок 5), загрузки (блок 6) и применимости (блоки 7, 10). При формировании групп деталей ведется контроль загрузки и пригодность оснащения, поэтому эти проверки в алгоритм не включены. До блока 12 рассматриваются системы оснастки, обеспечивающие повышенную точность изготовления за счет безззорных соединений в конструкциях. Этим качеством не обладают некоторые последующие системы. Они выделяются в блоках 12 и 17. Сначала отделяется УСПО, обладающая повышенной точностью за счет безззорного соединения агрегатов. Затем СРО, обеспечивающая среднюю точность при использовании соединений с зазором по отверстиям и пальцам. УСО

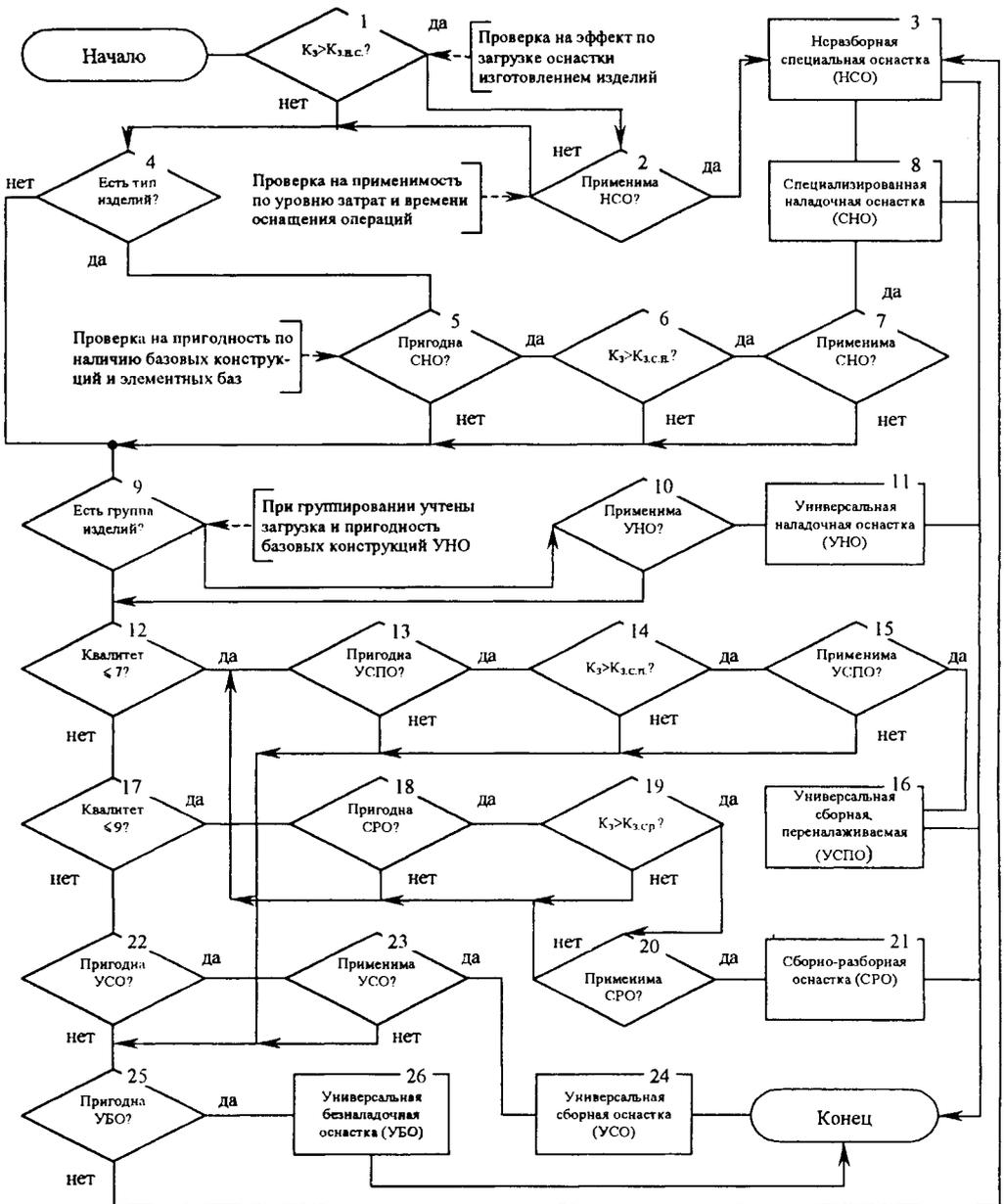


Рис. 4.2.5. Алгоритм выбора системы оснастки

имеют пониженную точность из-за шпоночных соединений. Для них делают те же, что и раньше, проверки эффективности и, если они не выдерживаются, то рассматривается универсальная оснастка (блок 25). Невыполнение требования пригодности для конкретной операции приводит снова к специальной оснастке по линии связи от блока 25 к блоку 3. Рассмотренный алгоритм является прототипом многих других, которые необходимы в системе выбора, заимствования и унификации приспособлений, но отсутствуют в универсальных системах управления базами данных. Все вместе они составляют базу знаний. Соединение базы данных с базой знаний создает наиболее совершенный вариант системы проектирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соколов Е.В.** Выбор станочных приспособлений на основе классификаторов деталей и оснастки: Учебное пособие / Ун-т технического прогресса в машиностроении. М.: Машиностроение, 1986. 44 с.
2. **Универсально-сборная** и переналаживаемая оснастка / А.И. Жабин, Г.П. Холод, В.А. Здор и др. Киев: Техника, 1982. 260 с.
3. **Станочные** приспособления: Справочник. В 2-х т. / Т. 1. Под ред. Б.Н. Вардашкина и А.А. Шатилова / Т. 2. Под ред. Б.Н. Вардашкина и В.В. Данилевского. М.: Машиностроение. 1984.

### Глава 4.3

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 4.3.1. МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Основой для разработки и модернизации оборудования являются сгруппированные предметы труда, их объемные показатели, усовершенствованный типовой или групповой технологический процесс и технические средства [станки, *промышленные роботы* (ПР), вспомогательное оборудование].

Цель создания - использование действующего оборудования с проведением проектных работ по его модернизации. Условия для создания гибких производственных модулей (ГПМ) или робототехнических комплексов (РТК) следующие:

автоматизация операций с легко изменяемой обработкой заготовок;

автоматизация операций загрузки-разгрузки заготовок различной номенклатуры;

автоматизация операции смены инструмента для переточки или при смене заготовок;

автоматизация контроля износа инструмента и контроля обрабатываемых поверхностей заготовок (при необходимости) с обеспечением коррекции управляющих программ;

оснащение устройствами и механизмами базирования заготовок, очистки базовых поверхностей устройств и механизмов, а также ограждение зоны обработки;

автоматизация операции удаления стружки из зон резания и сбора в специальные емкости для накопления.

На различных предприятиях эти условия обеспечиваются различными техническими средствами. Операции загрузки и разгрузки заготовок выполняют ПР или манипуляторы, механические захватные устройства которых захватывают заготовки с большим диапазоном размеров.

При автоматизации операции смены инструмента используют способ смены резцов из магазина с помощью манипулятора или конструктивных решений, принятых для станка ЛФ-260Ф3. При автоматизации операции удаления стружки применяют прерывистое точение (для сливной стружки), обильную подачу СОЖ в зону резания и места прохождения стружки по конструктивным элементам станка; оснащают зону резания наклонными склизми для вывода стружки скребковой вращающейся сметкой или стружкосборником со шнековым или ленточным конвейером, перемещающим ее в тару, расположенную на поворотном столе в двух местах: для накопления, удаления загруженной тары и установок пустой.

Типовое устройство удаления стружки мод. 6574 включает гидравлический укладчик, роликовый конвейер, устройство сбора стружки с кантователем и контейнером, поддоны, струженную емкость. Применяют спутники для использованной и неиспользованной оснастки, концевое устройство к сверльно-фрезерным станкам, инструментальную тележку и ящичную тару (поддоны).

Для контроля износа инструмента применяют измерительные головки (датчики) БВ-4272, БВ-4281, а также растровые датчики 19000. Для преобразования измеряемых величин используют преобразователь и устройство ЧПУ 2С43 или модернизированное устройство 2Р32М (ГОСТ 15.001).

Вспомогательное оборудование модуля включает загрузочно-разгрузочные устройства для заготовок, инструмента и стружки; эти устройства должны быть связаны с модулем как конструктивно, так и информационно. Все команды они получают от устройства

ЧПУ или устройства управления ПР. Обычно применяют простые столы, оснащенные концевыми выключателями, для установки на них поддонов и штучных заготовок; кроме того, применяют тактовые столы и накопители, обеспечивающие встраивание модуля в систему более высокого уровня.

При компоновке необходимо минимизировать пути перемещения заготовок и деталей, обеспечить наиболее выгодное взаимодействие машин, устройств и механизмов системы, а также возможность перестраивания комплекса.

Одной из основных задач, решаемых при модернизации оборудования, является выбор его компоновочной схемы. При этом необходимо учитывать не только технологические характеристики обслуживаемого *технологического оборудования (ТО)*, *средств технического оснащения (СТО)*, вспомогательного оборудования, но и степень их автоматизации, вид исполнения и другие параметры.

Выбор рациональной компоновки ГПМ, РТК, главным образом, зависит от правильного выбора и расположения ПР, способного обеспечить манипулирование заготовками в рабочем пространстве ТО и СТО. В СТО кроме устройств *инструментального оснащения (ИО)*, контроля управления, информации, измерения и регулирования входит загрузочно-разгрузочное устройство.

При проектировании РТК применяют принцип модульного построения. Построенные по этому принципу РТК на базе ПР, ТО, СТО и ИО наиболее полно отвечают требованиям решения конкретной технологической задачи и не обладают избыточной функцией. В целом применение принципа модульного построения ПР и РТК позволяет: сократить номенклатуру ПР, ГПМ, РТК и организовать их специализированное производство; сократить сроки проектирования и освоения ПР, ГПМ, РТК; компоновать модули различных исполнений с учетом условий производства.

В зависимости от типа производства ГПМ, РТК могут быть специальными, специализированными и универсальными. Для единичного и мелкосерийного производства, характеризующегося частой сменой номенклатуры деталей, применяют универсальные ГПМ и РТК, для среднесерийного производства - специализированные, а для крупносерийного и массового производства - специальные. При выборе рациональной компоновки комплексов следует в каждом случае рассматривать связь ПР с ТО, которое он обслуживает.

Возможны четыре варианта связи ТО с ПР: 1) ТО с горизонтальной осью расположения шпинделя и напольного ПР; 2) ТО с го-

ризонтальной осью расположения шпинделя и встраиваемого и навесного ПР; 3) ТО с вертикальной осью расположения шпинделя и напольного ПР; 4) ТО с вертикальной осью расположения шпинделя и встраиваемого и навесного ПР.

Навесные и встраиваемые ПР рассматривают вместе, так как их исполнения различают лишь тем, что навесные ПР монтируют на отдельном портале, а встраиваемые - на несущей конструкции ТО. Структуры СТО и ИО определяются в зависимости от выбранной связи ТО и ПР.

Сложные относительные перемещения заготовок в рабочем пространстве ТО состоят из простых перемещений: поступательных и вращательных. Теоретически относительное перемещение с любой траекторией может быть составлено не более чем из шести элементарных перемещений: трех поступательных вдоль ортогональных осей и трех вращательных относительно тех же осей. Очевидно, что каждое перемещение характеризуется степенью подвижности.

Если выбрать прямоугольную систему координат, ориентированную в неподвижном пространстве и принять положение одной из осей за ось расположения детали в ТО ( $x$  - горизонтальная ось,  $z$  - вертикальная ось), то всю совокупность компоновок ПР можно описать с помощью множества структурных формул с определенным количеством набора модулей, где каждый модуль соответствует определенной степени подвижности ПР. Обозначение модулей ПР:  $X$  - модуль поступательного перемещения вдоль оси  $x$ ;  $Y$  - модуль поступательного перемещения вдоль оси  $y$ ;  $Z$  - модуль поступательного перемещения вдоль оси  $z$ ;  $A$  - модуль вращательного перемещения относительно оси  $x$ ;  $B$  - модуль вращательного перемещения относительно оси  $y$ ;  $C$  - модуль вращательного перемещения относительно оси  $z$ .

Степени подвижности захватов ПР во внимание не принимают. В зависимости от типоразмеров деталей выбирают рабочее пространство, следовательно, и тип (модель) ТО.

При анализе ПР, применяемых в РТК для механической обработки деталей типа тел вращения, выявлены пять модулей:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $B$ ,  $C$ . Модуль  $A$  применяют редко из-за необоснованного увеличения габаритных размеров ПР, сложности углового программирования и неудобства встраиваемости ПР в РТК. Число возможных компоновок ПР (при использовании закона сочетаний) равно:  $n = k! = 5! = 1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 = 120$ , где  $k$  - число модулей ПР.

Формализация компоновок в виде условной записи позволяет рассмотреть все

возможные множества вариантов компоновок путем формальной перестановки символов в структурной формуле.

При анализе матрицы множества компоновок ПР обнаружено, что у большинства ПР с четырьмя и пятью степенями подвижности (70%) возникают избыточные степени подвижности (если рассматривать перемещение модулей ПР в той последовательности, в которой они представлены в структурных формулах). Следовательно, целесообразным является выбор ПР, имеющих две и три степени подвижности. Рассматривая такие ПР в сочетаниях из пяти модулей, следует обратить внимание на критерии оптимальности, которые в совокупности способствуют выявлению рациональной компоновки ПР по структурным признакам связи с ТО. Среди таких критериев следует выделить: наличие модуля  $X$  в ПР, обслуживающего ТО с горизонтальной осью расположения заготовок в ТО; наличие модуля  $Z$  в ПР, обслуживающего ТО с вертикальной осью расположения заготовок в ТО; наличие модуля с большим перемещением (критерий металлоемкости и энергоемкости).

#### 4.3.2. ОБОРУДОВАНИЕ С ЧПУ

Оборудование с ЧПУ включает: узлы и системы оборудования (станка), рабочие органы, главный привод и приводы рабочих органов, электрооборудование, гидрооборудование, средства автоматизации, устройство автоматической смены инструмента, в том числе с магазином, устройство автоматической смены заготовок, устройство автоматической подачи СОЖ, сбора СОЖ и отвода стружки, устройство ЧПУ. Рекомендуемые промышленные роботы, применяемые в различных системах, приведены в табл. 4.3.1, гибкие производственные модули на базе станков с ЧПУ приведены в табл. 4.3.2, а устройства ЧПУ (УЧПУ) - в табл. 4.3.3.

#### 4.3.3. АГРЕГАТИРОВАННОЕ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Если в прямоугольной системе координат, ориентированной в неподвижном пространстве, принять положение одной из осей за ось расположения детали в технологическом оборудовании (ТО) ( $x$  - горизонтальная ось;  $z$  - вертикальная), то можно всю совокупность компоновок ГПМ или РТК описать с помощью множества структурных формул с определенным числом модулей, где каждый модуль соответствует определенной степени подвижности. Обозначим модули ПР:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  - модули поступательного перемещения вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  - модули вращательного перемещения относительно

осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно. В зависимости от типоразмера деталей выбирают рабочее пространство, следовательно и тип (модель) ТО, ПР и вспомогательное оборудование (ВО).

При этом следует соблюдать *три критерия выбора* (оптимальности):

- 1)  $Y > C > Z > B > X$  - для горизонтальной оси расположения детали в ТО с ПР напольного исполнения;
- 2)  $X > Y > Z > B > C$  - для горизонтальной оси расположения детали в ТО с ПР навесного или встраиваемого исполнения;
- 3)  $X > Y > C > B > Z$  - для вертикальной оси расположения детали в ТО с ПР напольного, навесного или встраиваемого исполнения.

Критерием функциональной связи является совмещение функций ПР с ТО, которое обеспечивается отсутствием во время обработки в рабочей зоне ТО модулей ПР.

На рис 4.3.1 изображены возможные компоновки ПР, описанные с помощью структурных формул в виде матрицы. Формализация компоновок в виде условной записи позволяет рассмотреть все возможные множества вариантов компоновок путем формальной перестановки символов в структурной формуле. Столбцы матрицы характеризуют положение того или иного модуля ПР, начиная с первого, а строки - взаимное расположение модулей ПР.

Применение структурных формул для обозначения компоновок ПР позволяет проводить их анализ не только аналитически, но и графически на основе структурных кинематических схем и деревьев расположения модулей. Для определения совокупности возможных компоновок ПР рассматривают последовательное расположение модулей по соответствующим степеням подвижности, начиная с захватного устройства.

Рациональная компоновка ГПМ (РТК) механической обработки выбирается исходя из их кооперационной законченности и встраиваемости в систему по следующим критериями: длительности цикла, экономической эффективности, габаритным показателям, схемам перемещения предметов труда. Первым этапом при выборе компоновки является структурный анализ ПР, ТО, ВО, в результате которого определяется состав системы. Вторым этапом определяется кооперационная и переходная законченность технологического процесса, обеспечиваемую функциями ГПМ или РТК с помощью составных элементов и их элементарных перемещений. Таким образом, определяется качественный и количественный состав компоновочных решений. После этого рассматривается вопрос встраиваемости ГПМ в ГПС в целях совместного функционирования со складами, транспортном, другими ГПМ и т. д.

### 4.3.1. Промышленные роботы, применяемые в различных системах ГПС

Модель робота	Подвижность корпуса	Грузоподъемность, кг	Система координат	Тип привода	Ход манипуляторов			Быстродействие		Тип управления	Точность позиционирования, мм ±	Примечания (число рук более одной)
					вертикальный, мм	горизонтальный, мм	поворот, °	линейное, м/с	угловое, %/с			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>В складских системах</b>												
МРУ-901	Неп.	0,02	Цил.	ЭМ	10	150	90	0,1	130	Цикл.	0,02	
РФ-204М	Под. П	0,5	Прям.	ЭМ+Пн.	30	200+Л	120	0,7	180	Поз.	0,1	2
Импульс	»	0,7	»	ЭМ	40	450	90	0,8	180	Цикл.	0,1	3
РКТБ	Неп.	7	Цил.	ЭМ	600	600	270	0,8	180	»	0,1	
Р-5	»	5	»	ЭМ	300	600	270	0,7	180	Конт.	0,1	
ПРЭМ-5	»	5	Анг.	ЭМ	5000	1 200	310	0,7	180	Поз.	0,5	
М-31	Под. П	5	Прям.	ЭМ	600	10 000	90	0,7	120	»	0,5	
Колер	Неп.	3	Анг.	Гид.	2000	2 080	75	0,5	120	Конт.	3	
Контур-002	»	15	»	Гид.	2500	2 600	120	0,5	120	»	3	
Универсал-15.04.П	Под. Н	15	Сф.	Гид.	900	2044+Л	330	0,8	120	»	1	
МП-8 с ТЗ	Неп.	15	Цил.	Пн.	250	800	270	0,5	120	Поз.	2	
ПРЭМ-25	»	25	Анг.	ЭМ	1000	1 750	320	0,7	120	»	1	
РПМ-25	»	25	»	ЭМ	1500	1 750	110	0,7	120	»	0,5	
	(под. П)											
НЦ-ТМ-03	Неп.	50	Цил.	ЭМ	600	600	340	0,1	45	»	2	
МАК-1-50	Под. П	50	Прям.	Гид.	800	6 000	90	0,5	90	Поз.	5	
11ТТР-50-030	»	50	»	ЭМ	2300			0,5	—	»	1	Угол подъема 30°
Универсал—60.02	Неп.	60	Сф.	Гид.	800	2 044	340	0,7	120	»	3	
ПРЭМ-100	»	100	Прям.	ЭМ	1000	1 500	320	0,7	120	»	3	
ПРТС-02-110	Под. П	110	»	»	1000	+Л	110	0,5	90	»	5	
И 120.01.00.00	»	150	»	»	1400	2 500	15	0,5	90	»	10	

Продолжение табл. 4.3.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>В транспортных системах</b>												
РФ-204М	Под. П	0,5	Прям.	ЭМ+Пн.	30	200+Л	120	0,7	180	Поз.	0,1	2
Марс-2	»	5	»	ЭМ	1200	16 000	—	0,5	120	»	1	
094.0061	Неп.	25	Цил.	Пн.	600	700	240	0,5	120	»	1	
094.0062	Под. П	15	Прям.	ЭМ	1000	5 000	240	0,5	120	»	1	
Универсал-15.06Тр	»	15	Сф.	Гид.	400	2000+Л	340	0,5	120	»	3	
МП-14Т, МП-15Т	Под. Н	25	Цил.	ЭМ	400	1200+Л	340	0,8	120	»	1	
МАК-1-50	» П	50	Прям.	Гид.	800	6 000	90	0,5	90	Цикл.	5	
НЦ-ТМ-15	Под. Н	50	Цил.	ЭМ	300	1000+Л	320	0,1	45	Поз.	3	
Телер. 20/500	»	20	Сф.	»	600	800+Л	320	0,4	90	»	3	
Универсал-60.02Т	»	60	»	Гид.	800	2 044	340	0,7	120	»	3	
ТРТ-П-250	Под. П	250	Прям.	ЭМ	3200	Л	180	0,5	90	»	5	
НЦ-ТМ-2,5	Под. Н	250	Цил.	»	100	»	120	0,1	45	»	5	
МАК-2-320	Под. П	320	Прям.	Гид.	650	»	180	0,5	90	Цикл.	10	
<b>В технологическом оборудовании</b>												
РФ-202М	Неп.	0,4	Цил.	Пн.	30	200	120	0,8	120	Цикл.	0,1	2
МП-11	»	0,5	»	»	60	180	120	0,8	120	»	0,1	2
РФ-204М	Под. П	0,5	Прям.	ЭМ+Пн.	30	200+Л	120	0,7	180	Поз.	0,5	2
ПРЭМ-5	Неп.	5	Анг.	ЭМ	500	1 200	310	0,7	180	»	0,5	
Марс-2	Под. П	5	Прям.	Пн.	1200	1 600	15	0,5	120	»	1	
НЦ-ТМ-01	Неп.	5	Цил.	ЭМ	300	500	180	0,01	5	»	0,5	
РМ-01	»	5/25	Анг.	ЭМ	600	600	340	0,8	120	Конт.	0,1	
М-31	Под. П	5	Прям.	ЭМ	600	10 000	90	0,7	120	Поз.	0,5	
РМ-1.04	Неп.	5/5	Сф.	ЭМ	650	800	270	0,5	120	»	0,1	2
ТУР-2,5	»	2,5	Сф.+Цил.+ +Пр.	ЭМ	250	600	320	0,8	120	Поз.+ +Конт.	0,1	4
ТУР-10	»	10	Анг.	ЭМ	600	850	320	0,8	120	Конт.	0,1	
М10П.62-01	»	10	Цил.	ЭМ	600	600	180	0,5	120	Поз.	0,5	
МП-8	»	15	»	Пн.	250	800	270	0,5	120	»	1	
РС-20	»	15	»	Гид.	400	2 400	15	0,5	120	»	1	
МП-12Т, МП-14Т	Под. П	20	»	ЭМ	400	1200+Л	340	0,5	120	»	1	
7607	Неп.	25	»	Гид.	300	700	340	0,7	180	»	3	

Продолжение табл. 4.3.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ПРЭМ-25	Неп.	25	Анг.	ЭМ	1000	1 750	320	0,8	180	Поз.	2	
РПМ-25.02	Неп.	25	»	ЭМ	1000	1 750	350	0,8	180	»	3	
РС-25П	Под. П	25	Цил.	Гид.	400	2 400	90	0,7	120	Цикл. + Поз	3	
М20П.41.01	Неп.	20	»	ЭМ	400	1 000	320	0,8	180	Поз.	0,1	
094.00.62	Под. П	25	»	ЭМ	1000	5 000	240	0,7	120	»	3	
094-00.63	Под. П	25	»	ЭМ	1000	5 000	240	0,7	120	»	3	
ПР-35	Неп.	35	Анг.	Гид.	940	1 000	236	0,8	180	Поз.+ + Цик.	3	
РС-40П	Под. П	40	Цил.	Гид.	400	2 400	90	0,7	120	Поз.	5	
СМ40Ц 4301	Неп.	40	Прям.	»	500	1 000	340	0,5	180	»	0,3	
СМ 40 Ф2.8001	Под. П	40	»	»	1900	10 000	90	0,5	120	»	0,3	2
НЦ-ТМ-03	Неп.	50	Цил.	ЭМ	600	600	340	0,01	5	»	1	
ПРЭМ-100	»	100	Прям.	ЭМ	1000	1 500	320	0,8	180	»	5	
УМ.160.Ф2.8101	Под. П	160	»	Гид.	2300	16 000	90	0,5	180	»	3	
СМ.160.Ф2.0501	»	160	»	»	1800	8 900	60	0,5	180	»	3	2
СМ 320 Ф2	»	320	»	»	2000	16 000	60	0,5	180	»	5	
<b>В контрольных системах</b>												
ПРЭМ-5	Неп.	5	Анг.	ЭМ	500	1 200	310	0,7	180	Поз.	0,5	
ТУР-2,5	»	2,5	Цил.	ЭМ	250	600	320	0,8	120	Поз. + + Кон.	0,1	
РМ-01	»	3	Анг.	ЭМ	600	600	340	0,8	120	Конт.	0,1	
ТУР-10	»	10	Цил.	ЭМ	600	850	320	0,8	120	»	0,1	
МП-8 с ТЗ	»	15	»	Пн.	250	800	270	0,5	120	Поз.	1	
МП-14Т, МП-15Т	Под. Н	20	»	ЭМ	400	1200+Л	360	0,8	180	»	1	
ПРЭМ-25	Неп.	25	Анг.	ЭМ	1000	1 750	320	0,8	180	»	1	
Р-7	Под. П	25	Цил.	Пн.	170	300	—	0,5	120	»	1	
РПМ-25	Неп.	25	Анг.	ЭМ	1500	1 750	110	0,7	120	»	1	

Продолжение табл. 4.3.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>В инструментальном обеспечении</b>												
ЭТ-1-5	Под. П	1	Цил.	Пн.	600	5 000	180	0,5	120	Поз.	0,5	
ТУР-2,5	Неп.	2,5		ЭМ	250	600	320	0,8	120	Поз.+ + Конт.	0,1	
ПРЭМ-5	Неп.	5	Анг.	ЭМ	500	1 200	310	0,7	180	Поз.	0,5	
М-31	Под. П	5	Прям.		600	10 000	90	0,7	120		0,5	
ТУР 10	Неп.	10	Анг.		600	850	320	0,8	120	Конт.	0,1	
Универсал-15.04		15	Сф.	Гид.	900	2 044	330	0,8	180	Поз.	1	
МП-14Т, МП-15Т	Под. П	25	Цил.	ЭМ	400	1 450	360	0,8	180		1	
НЦ-ТМ-03	Неп.	50		ЭМ	600	600	340	0,01	5		1	
Телер 20/500	Под. Н	50		ЭМ	400	700	340	0,7	120		1	
ПРЭМ-100	Неп.	100	Прям.	ЭМ	1000	1 500	150	0,8	180		2	
<b>В удалении отходов производства</b>												
МП-12Т	Под. П	20+250	Цил.	ЭМ	400	1250+Л	360	0,8	180	Поз.	1	
МАК-1-50	»	50	Прям.	Гид.	800	600	90	0,5	90	Цикл.	5	
НЦ-ТМ-1-2	»	50	Цил.	ЭМ	600	1000+Л	320	0,01	5	Поз.	1	
Телер 20/500	»	50	»	ЭМ	600	1000+Л	320	0,1	45	»	1	
ИТПР-5-030	»	50	Прям.	ЭМ	3000	Л	180	0,5	120	»	3	
ПРЭМ100	Неп.	100	»	ЭМ	1000	1 500	180	0,7	120	»	5	
ПРТС-ОФ-110	Под. П	110	»	ЭМ	2600	1000+Л	180	0,5	90	»	5	
ТРТ-11-250	»	250	»	ЭМ	3200	Л	180	0,5	90	»	5	
НЦ-ТМ-2,5	Под. Н	250	Цил.	ЭМ	600	Л	180	0,1	9	»	5	
МАК-2-320	Под. П	320	Прям.	Гид.	650	Л	180	0,5	120	»	10	

Примечание. В таблице приведены следующие сокращения: ЭМ — электромеханический; Пн. — пневматический; Гид. — гидравлический; Неп. — неподвижное исполнение; Под. П и Под. Н — подвижное подвесное и напольное исполнение; Цикл. — цикловое устройство управления промышленным роботом; Поз. — позиционное; Конт. — контурное; Цил. — цилиндрическая; Сф. — сферическая; Прям. — прямоугольная; Анг. — ангулярная (угловая); Л — любая длина (определяется длиной трассы).

#### 4.3.2. Рекомендуемые гибкие производственные модули (ГПМ)

ГПМ	Модель	Главный параметр: диаметр прутка детали над суппортом; диаметр / длина; длина × ширина × высота; длина × ширина, мм	Частота вращения, мин <sup>-1</sup> ; скорость, м/с	Мощность, кВт	Масса, т
1	2	3	4	5	6
Многоцелевой токарный прутковый	11Б16ВФ4М	16	100—7500	5,5	3,0
	11Б25ВФ4М	25	100—6000	6	3,8
Многоцелевой токарный прутково-патронный	11Б40ПФ4М	40, 125	50—4000	16	6
	11Б60ПФ4М	60, 125	50—4000	15	8
Токарный прутково-патронный	1В340В30РМ (БР.СК-01)	40, 200	45—2000	8,5	5,8
Многоцелевой токарный прутково-патронный	1П420ПФ40РМ	50, 200	25—2500	30	9,5
Токарный патронный	АТПУ-125 ВАРМ	125/100	50—4000	3	2,8
Токарный патронно-центровой	АТКОВ 120-500	124/510	50—4000	8	12
	УТ16Ф3РМ	125/640	30—2500	19	2,2
	16Б16Т1РМ	125/500	25—2500	7,1	4
	1И611ПМФ3Р	130/770	50—2000	4	1,9
Многоцелевой токарный фрезерно-сверильный	ТОЦ-180	180	25—4000	20	8
	ИРТ-180Ф4М	200	25—4000	20	8
Токарный патронно-центровой	1716ПФ4РМ	200/500	4000	8	4
	КТ141ПРМ	200	56—2500	15	6
	ИТ-250МФ4Р	200	63—3150	14	3,2
	16К20Ф3РМ (Т1)	200/750	22,4—2240	11	5,5
Токарный патронный	АТМ-220	220	50—4000	8	8
	СТП-220 КРМ	220	56—2500	15	7
	1П620ПФ40РМ	250/750	3200	35	15
Токарно-револьверный	1П426Ф3РМ	250	25—2000	10	9
Токарный патронный	17В05АРФ30РМ	250/500	3200	10	13
	16К30Ф3РМ	320/1200	2000	30	10

1	2	3	4	5	6
Токарный вертикально-патронный	1В731Ф3М	320	1600	30	17
» двухшпиндельный патронный	1732ПФ30РМ	320	12,5—2000	30	12
» патронно-центральной	1725РФ3РМ	400/750	25—2500	12	8
» патронный	1П756ДФ4РМ	500	2000	40	18
» вертикальный патронный	1В751Ф3М	500	1000	45	27
Токарно-карусельный	1А512МФ3М	1200	1—335	75	25
	1А512МФ3М	1600	1,5—320	80	30
Отрезной методом сдвига	ТОС-МП-01	80/6000	30 МПа	15	7,7
Сверлильно-фрезерный расточный корпусных деталей	ИР200АМ1Ф4М	200 × 200 × 200	13—5000	7,5	8,5
	ОФ2Г02ПМФ4М	200 × 200 × 200	40—4000	1,5	3
	МС12-250М1-2	250 × 250 × 200	45—2000	7,8	2
	ВТ 12-250 РК	300 × 250 × 220	45—2000	4,5	3
	ИР 320ПМ1Ф4М	320 × 320 × 320	13—5000	7,5	10,1
	ВФ2Г03АМФ4М	320 × 320 × 320	30—5000	8	11
	ГД 20Г04ПМФ4М	400 × 400 × 400	30—3000	10,5	13
	ВОПМ2М04АМФ4М	400 × 400 × 400	40—5000	10	10
Многооперационный фрезерно-сверлильный	ВР12-500	500 × 320 × 400	50—5600	6,5	3
	ВМ12-500	500 × 320 × 400	80—4000	6,5	3
Многооперационный сверлильно-фрезерно-расточный	СГ-400 Ф4,5	400 × 400 × 400	30—3000	26	8
	СМ-400 Ф4,5	400 × 400 × 400	30—3000	26	8
Сверлильно-фрезерно-расточный корпусных деталей	В-ИР500ПМ1Ф4М	500 × 500 × 500	21,2—3000	15	15
Многооперационный глубокого сверления	ГС3-12 Ф4,5	630 × 475 × 630	200—8000	5,3	8
Многоцелевой ОЦ	ОЦ-3В, ОЦ-4В	630 × 630 × 630	20—3000	15	8,2
	ОЦ1И12	630 × 630 × 630	20—2500	18,1	5,6

1	2	3	4	5	6
Сверлильно-фрезерно-расточный корпусных деталей	МА2765МЗФ4М	630 × 630 × 630	50—10000	20	20
	ВШ2М06АМФ4М	630 × 630 × 630	20—3500	15	15,6
	В/ИР800ПМ1Ф4М	800 × 800 × 800	20—3000	15	7
	ЛР2Г12ПМФ4М ЛР400ПМФ4М	1250 × 1250 × 1250	12,5—3150	25	38,3
	ЛР2Г20ПМФ4М	2000 × 2000 × 2000	6,3—1600	37	40
	ЛР500МФ4М	2000 × 2000 × 2000	6,3—1000	37	40
Сверлильно-фрезерно-расточный плоских деталей	2254ВМФ4М	400 × 630	40—2500	8	8
	ГД3804ПМФ4М	400 × 630	30—3000	5,5	5,5
	21105П7Ф4М	500 × 800	25—2500	6	13
	М2В06АМФ4М	630 × 1000	10—1500	7	10,5
	2560ПМФ4М	1600 × 4000	16—3000	15	22
	2570ПМФ4М	2500 × 4000	16—3000	15	30
Универсальный круглошлифовальный для валов	3М153ВФ20РМ	140/710	50	7,5	4,5
	3К151ВФ20РМ	200/710	50	11	9,7
	3Т161ВФ20РМ	280/1000	50	18	15
Универсальный круглошлифовальный для ступенчатых валов	3М163Ф2РМ	280/1400	50	15	10
Многоцелевой шлифовальный для тел вращения	МЕ280РМ	280	50	12	4,5
Круглошлифовальный бесцентровой	В-3Е183КВФ2РМ	40	60	11	3,5
	В-3Е184Р (К) ВФ2РМ	80	60	30	6,8
Внутришлифовальный	3М227ВФ20РМ	200/200	35	4	5
Плоскопрофилешлифовальный	ОШ 320РМ	320 × 630	35	10,2	6
Зубошлифовальный	5Д833ДФ4М	320, $m = 6$	31,5	5,5	14

Продолжение табл. 4.3. 2

1	2	3	4	5	6
Зубофрезерный	ВО53160Ф4М	160, $m = 3$	80—500	8,5	7
» адаптивный	53В30ПФ2М	200, $m = 4$	800—530	8,5	8
Зубдолбежный	К35116Ф4М	160, $m = 4$	200—1200	7	9
Зуборезный конических колес	СТ5232Ф4М	320, $m = 8$	80—600	8,5	9
Сверлильно-фрезерно-расточный	6Д12МФ4РМ	320 × 630	5—2000	8	5
	6Т13МФ4РМ	400 × 630	5—2000	12	8
Сверлильно-фрезерно-расточный плоских деталей	65А60МФ4М	500 × 630 × 250	5—2000	20	22
Фрезерно-сверлильный расточный базовых и плоских деталей	6М610МФ4М	800 × 1600 × 400	5—1500	28	45
Консольно-фрезерный	СФ30Ф.3РМ	320 × 1250 × 400	345—1600	6,5	3,5
	ВМ141Ф30М	400 × 1600 × 420	40—2000	12,5	4,5
Фрезерный для пазов на валах	ДФ100Ф4М	100 × 2600	40—1500	10	5
Адаптивный электроэрозионно-копировально-прошивочный	4Л721Ф3М	200 × 360	$Q = 250$	5,5	1,0
	4Л723Ф3М	400 × 630	$Q = 1000$	30,0	3,0
	4Л724Ф3М	800 × 1200	$Q = 2000$	30,0	5,5
Электроэрозионный вырезной	4735Ф3М	400 × 250 × 1600	$Q = 35$	5	3

Обозначения:  $m$  - модуль;  $Q$  - съём металла, мм<sup>3</sup>/мин.

### 4.3.3. Основные характеристики УЧПУ

Параметр	2М43	2С42	2С85	2У32-61	2М30	Н33-1М	«Координата С70-3»	П32-34	2ПТ-71	Н55
Тип УЧПУ	Контурное		Позиционно-контурное	Контурное			Позиционное		Контурное	
Задание размеров в программе	По ГОСТ 13054			—	—	В приращениях	В абсолютных значениях		В приращениях	В абсолютных значениях
Число управляемых координат	3	8	8	3	3	3	3	6	3	5
Число одновременно управляемых координат	3	3	5	3	1	3	2	2	2	2; 5
Скорость ввода программы с перфоленты, строк/с	300	300	300	300	—	300	45	75	700	300
Дискретность обработки по координатам, мм	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01	0,005	0,01	0,01	0,01
Тип привода	Шаговый ЭГ	Следящий шаговый ЭГ	Следящий шаговый	Следящий	Шаговый ЭГ	Шаговый или следящий	Шаговый	Ступенчатый регулируемый	Шаговый	Шаговый или следящий
Тип измерительного преобразователя привода	ДЛМ	ДЛМ	ДЛМ	ДЛМ	ДЛМ	ДЛМ, ВТМ-1В	ДЛМ	ДЛМ, ВТМ	ДЛМ	ДЛМ, ВТМ
Прием информации от станка	64	64	256	80	64	—	—	—	3	65
Выдача информации на станок	64	64	256	48	64	—	—	—	3	65
Объем оперативной памяти без сохранения информации, байт	4 К	16 К	16 К	8 К	—	—	—	—	—	2048 × 76 р. слов
Объем оперативной памяти с сохранением информации, байт	1 К	2 К	2 К	16 К	16 К	—	—	—	—	128 × 26 р. слов
Число каналов обмена	64	240	256	192	64	99	72	76	99	40

XYZBC	YXZBC	ZXYBC	BXYZC	CXYZB
XYZCB	YXZCB	ZXYCB	BXYCZ	CXYBZ
XYZBC	YXBZC	ZXBYC	BXZYC	CXZYB
XYBCZ	YXBCZ	ZXBCY	BXZCY	CXZBY
XYCZB	YXCZB	ZXCYB	BXCYZ	CXBYZ
XYCBZ	YXCBZ	ZXCBY	BXCZY	CXBZY
XZYBC	YZXBC	ZYXBC	BYXZC	CYXZB
XZYCB	YZXCB	ZYXCB	BYXCZ	CYXBZ
XZBYC	YZBXC	ZYBXC	BYZXC	CYZXB
XZBCY	YZBCX	ZYBCX	BYZCX	CYZBX
XZCYB	YZCXB	ZYCXB	BYCXZ	CYBXZ
XZCBY	YZCBX	ZYCBX	BYCZX	CYBZX
XBYZC	YBXZC	ZBXYC	BZXYC	CZXYB
XBYCZ	YBXCZ	ZBXCY	BZXCY	CZXYB
XBZYC	YBZXC	ZBYXC	BZYXC	CZYXB
XBZCY	YBZCX	ZBYCX	BZYCX	CZYBX
XBCYZ	YBCXZ	ZBCYX	BZCXY	CZBXY
XBCZY	YBCZX	ZBCXY	BZCYX	CZBYX
XCYZB	YCXZB	ZCXYB	BCXYZ	CBXYZ
XCYBZ	YCXBZ	ZCXBY	BCXZY	CBXZY
XCZYB	YCZXB	ZCYXB	BCYXZ	CBYXZ
XCZBY	YCZBX	ZCYBX	BCYZX	CBYZX
XCBYZ	YCBXZ	ZCBXY	BCZXY	CBZXY
XCBZY	YCBZX	ZCBYX	BCZYX	CBZYX

Рис. 4.3.1. Матрица структурных формул компонок ПР

Связь ГПМ или РТК с другими техническими средствами осуществляется транспортом через загрузочно-разгрузочные устройства (ЗРУ). ЗРУ обеспечивают взаимодействие между транспортной системой и перемещениями предметов внутри ГПМ (РТК) с помощью ПР и (или) манипуляторов. В зависимости от предметов труда и вида производства это могут быть поддоны, кассеты, магазины-кантователи, устройства поштучной выдачи, спутники, машинные тиски, делительные головки. ЗРУ может не иметь степеней подвижности или иметь несколько степеней с обозначениями  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$ ,  $A''$ ,  $B''$ ,  $C''$ , соот-

ветствующими модулям исполнительных механизмов устройства.

На основе таблиц структурного анализа в соответствии с функциями ГПМ или РТК можно получить ряд компонок, отвечающих требованиям кооперационной законченности и встраиваемости в ГПМ. Выделены четыре группы компонок ГПМ для обработки деталей типа тел вращения: с горизонтальной осью расположения детали в ТО и ПР напольного исполнения ( $n = 1 \dots 7$ ); с горизонтальной осью расположения детали в ТО и ПР встраиваемого или навесного исполнения ( $n = 8 \dots 17$ ); с вертикальной осью рас-

положения детали в ТО и ПР напольного исполнения ( $n = 18 \dots 27$ ); с вертикальной осью расположения детали в ТО и ПР встраиваемого и навесного исполнения ( $n = 28 \dots 40$ ).

Компоновки ГПМ для изготовления одних и тех же деталей сравнивают по машинному времени ТО и времени перемещения (манипулирования) в модулях, входящих в ПР и ЗРУ. Минимальное время определяют с помощью формальных циклограмм.

Для построения характеристик ГПМ или РТК по циклограмме компоновок необходимо определить функцию числа тактов  $k$ , характеризующую длительность обработки, и число компонентов единиц оборудования ГПМ.

При выборе компоновки  $n$  минимизируется длительность цикла обработки, которая характеризуется интенсивностью использования оборудования  $v$ :  $v = k'/k$ , где  $k'$  - число компонентов ГПМ или РТК, выраженное условным временем работы оборудования;  $k$  - число тактов, выраженное суммарным временем перемещения и обработки в ГПМ или РТК. Очевидно, что чем меньше значения  $v$  и  $k$ , тем выше производительность работы и надежность.

По результатам анализа выявляются оптимальные компоновки ГПМ или РТК для каждой структурной группы.

Согласно циклограмме работа в ГПМ осуществляется в следующей последовательности. Тара с заготовками устанавливается на магазин заготовок. Заготовки поштучно перемещаются по оси на конвейере, который транспортирует их в зону ПР и ТО. ПР захватывает заготовку и устанавливает ее на ТО. Затем рука ПР выводится из зоны обработки ТО и начинается механическая обработка. По окончании обработки ПР захватывает заготовку с одной обработанной плоскостью, поворачивает ее на  $90$  или  $180^\circ$  относительно оси  $u$  и опять устанавливает на ТО. Далее рука ПР выводится из зоны обработки ТО и начинается механическая обработка другой стороны заготовки. По окончании обработки ПР захватывает деталь и устанавливает на конвейер, который перемещает ее к магазину готовых деталей. В магазине готовые детали, поочередно перемещаясь по координате  $x$ , укладываются в тару для изделий. Далее цикл работы ГПМ повторяется.

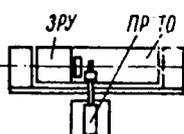
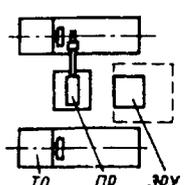
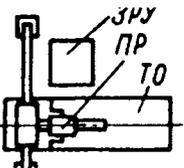
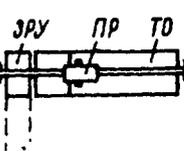
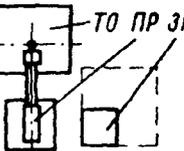
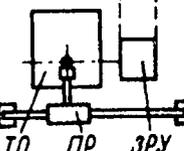
ГПМ (РТК) с параллельной компоновкой ТО, в состав которого входят ПР со структурой ХС или ХЗС, две единицы ТО и ЗРУ со структурой Х'У'З' или Х'У' (в зависимости от исполнения ПР), работает в следующей последовательности. Тара с заготовками устанавливается на ЗРУ, которое, пере-

мещаясь по осям  $x$  и  $u$  в горизонтальной плоскости, обеспечивает выход заготовки в нужную позицию. ПР захватывает заготовку, переносит ее в зону обработки первого ТО, устанавливает и возвращается в исходное положение. После механической обработки ПР забирает заготовку, обработанную с одной стороны, устанавливает ее на втором ТО и возвращается в исходное положение. Готовую деталь ПР устанавливает в пустую ячейку тары, в которой ранее находилась заготовка. Тара, установленная на ЗРУ, перемещается, выводя в исходную точку позиции захвата ПР следующую заготовку, цикл повторяется до тех пор, пока не будут обработаны все заготовки в таре. Затем на место тары с изделиями устанавливается тара с заготовками.

ГПМ или РТК, скомпонованный из ПР подвешенного исполнения со структурой ВХУ или СХУ, ТО и ЗРУ со структурой З', работает следующим образом. Тара с заготовками устанавливается на ЗРУ, которое перемещает ее вертикально вверх в зону схвата ПР. ПР захватывает одну из заготовок и выдает команду на перемещение ЗРУ с тарой вниз. Далее ПР устанавливает заготовку в "центры" или патрон ТО и возвращается в исходное положение. Начинается механическая обработка. Затем заготовка, обработанная с одной стороны, захватывается схватом ПР, отводится вдоль оси  $x$ , переворачивается и вводится в ТО; ПР возвращается в исходное положение. После окончания обработки ПР захватывает обработанную деталь и переносит ее к ЗРУ. ЗРУ с тарой сначала перемещается вверх, где ПР устанавливает обработанную деталь в пустую ячейку тары, затем вниз. ПР выходит на следующую позицию для захвата следующей заготовки. Цикл повторяется до тех пор, пока все заготовки в таре не пройдут механическую обработку.

Последовательность работы ГПМ (РТК), состоящего из ПР подвешенного исполнения со структурой ВЗХ, СЗХ или СВХ, ТО и ЗРУ со структурой У', следующая. Тара с заготовками устанавливается на ЗРУ, которое перемещается в рабочую зону ПР. ПР захватывает одну из заготовок, расположенных в первом ряду тары, поднимает, смещает параллельно оси ТО до центра зоны обработки, опускает до оси и устанавливает ее на ТО и выходит из рабочей зоны ТО. Начинается механическая обработка. Заготовка, обработанная с одной стороны, захватывается ПР, отводится, переворачивается на  $180^\circ$  и устанавливается на ТО. После обработки второй стороны деталь захватывается ПР, переносится в зону ЗРУ и устанавливается в пустую ячейку тары. Этот

## 4.3.4. Типовые компоновки ГПМ и характеристики обрабатываемых деталей

ГПМ (РТК)	Деталь			Расположение
	Масса, кг	Диаметр/длина, мм		
		валообразные	дискообразные	
	До 10	50/500	—	Горизонтальное
		—	160/200	
	До 10	30/300	—	
	10—40	80/1000	160/200	
	40—80	125/1100	250/200	
	80—160	160/1400	320/260	
	160—250	—	400/250	
	До 10	50/500	—	Вертикальное
	10—40	—	160/200	
	40—80	—	250/200	
	80—160	—	320/250	
	160—250	—	400/250	
	До 10	50/500	—	
	10—40	—	160/200	
	40—80	—	250/200	
	80—160	—	320/250	
	160—250	—	400/250	

процесс происходит до тех пор, пока весь первый ряд заготовок в таре не будет обработан. Далее ЗРУ перемещает тару и проводится обработка второго ряда заготовок, и т.д.

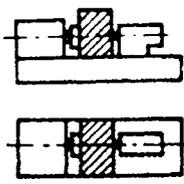
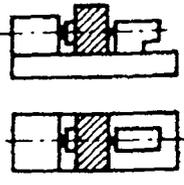
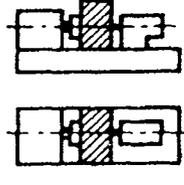
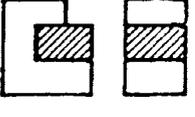
ГПМ (РТК), сконструированный из ПР напольного исполнения со структурой ZBC, ТО и ЗРУ со структурой X'Y', работает в следующей последовательности. Тара с заготовками устанавливается на ЗРУ и перемещается в рабочую зону ПР. ПР захватывает заготовку, расположенную в таре, поворачивает руку на 90°, вводит ее в зону обработки и устанавливает на ТО, затем возвращается в исходное положение. Начинается механическая обработка, после окончания которой заготовка, обработанная с одной стороны, захватывается ПР, переворачивается и устанавливается на

ТО. Далее ПР возвращается в исходное положение; после обработки ПР захватывает деталь, перемещает ее и устанавливает в пустую ячейку тары. Далее цикл работы повторяется. На место тары с обработанными деталями устанавливается тара с заготовками.

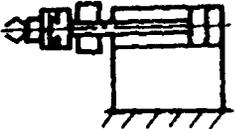
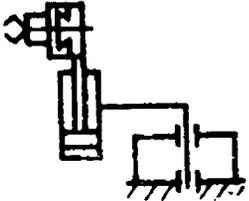
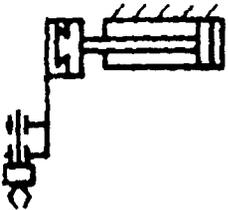
На основе структурных схем и циклограмм составлен типаж ГПМ (РТК) механической обработки. Из анализа компоновок ГПМ и номенклатуры деталей типа тел вращения массой до 250 кг, диаметром до 160 мм, длиной до 1400 мм и дисков диаметром до 400 мм, длиной до 250 мм получены типовые компоновки, представленные в табл. 4.3.4 - 4.3.7.

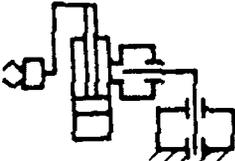
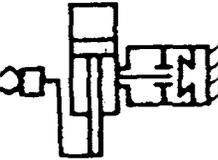
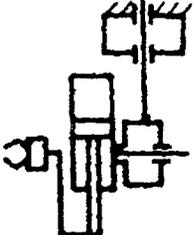
Обработка в ГПМ осуществляется путем взаимодействия заготовки с ТО, ПР и ЗРУ

4.3.5. Технологические оборудование в типовых компоновках ГПМ

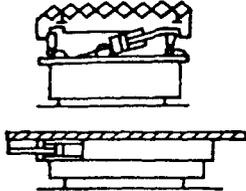
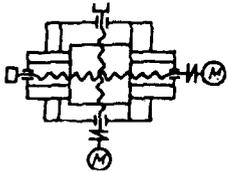
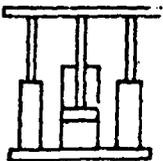
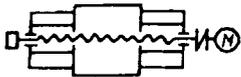
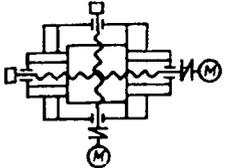
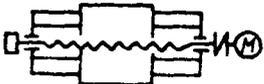
Зона загрузки	Диаметр детали, мм			
	над станиной	над суппортом	в центрах	в патроне
	320	200	25—80	—
	320	200	—	25—250
	320	200	25—80	25—250
	400	250	32—100	32—315
	500	400	40—125	40—400
	630	400	50—160	50—500
	630	400	—	50—500
	320	200	25—80	25—250
	400	250	—	32—315
	500	400	—	40—400
	630	400	—	50—500

### 4.3.6. Промышленные роботы в типовых компоновках ГПМ

Структурная схема	Структурная формула	Максимальное перемещение модулей ПР, мм (°)					Грузоподъемность, кг	Исполнение	Тип привода	Система управления
		X	Y	Z	B	C				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	XBY	100	600	—	180°	—	10	Напольное неподвижное	Электромеханический. Пневматический	Цикловая
	XZC	100	—	200	—	180°	10	То же	То же	Цикловая позиционная
	CXY	600 1000 1500 1500 1500	1500 2000 2500 2500 3060	—	—	180°	10 40 80 150 250	Навесное подвижное	Электромеханический. Пневматический  Гидравлический. Комбинированный	Позиционная

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	CZX	5000 4000 5000 5000 6000	—	600 600 600 1000 1000	—	180°	10 40 80 160 250	Навесное подвижное	Гидравлический. Комбинирован- ный	Позиционная
	ZBC	—	—	100 200 300 350 400	180°	90°	10 40 80 150 250	Напольное неподвижное	То же	Цикловая
	ZBX	2000 3000 3000 3500 4000	—	100 200 300 350 400	180°	—	10 40 80 160 250	Навесное подвижное	»	Позиционная
	ZBC	—	—	100 200 300 350 400	180°	90°	10 40 80 160 250	Навесное неподвижное	»	Цикловая

## 4.3.7. Загрузочно-разгрузочные устройства в типовых компоновках ГПМ

Структурная схема	Структурная формула	Тип привода	Система управления	Вместимость	
				валы	диски
	$2M(y) \cdot T(x)$	Пневматический	Цикловая	8	—
	$X'Y'$	Электро-механический	Позиционная	12	—
	$Z'$	Пневматический	Цикловая	8 10 10 8 8 8 10	12 20 30 20 20 12 20
	$Y'$	Электро-механический	Позиционная	10 8 8 —	30 20 20 20
	$X'Y'$	То же	То же	— — — 8 —	30 20 20 12 20
	$Y'$	»	»	— — — 8 —	30 20 20 12 20

**4.3.4. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ И ТРАНСПОРТНО-НАКОПИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

**Шиберные подающие устройства** (рис. 4.3.2, *a*) применяют при обработке заготовок с размерами в плане от 70×70 до 250×250 мм, толщиной не менее 1,0 мм при допуске отклонения от плоскостности заготовок 2 мм. Шиберные подающие устройства имеют габаритные размеры в плане 500×700 мм. Приводы подачи имеют исполнительный орган - шибер, совершающий возвратно-поступательное движение. Подача заготовок осуществляется за счет сдвига шибером нижней заготовки на исходную позицию для захвата ПР; при этом заготовка всегда находится на постоянной высоте. Сверху в любое время можно докладывать полосы, карты или штучные заготовки. Конструкция механизма, преобразующего

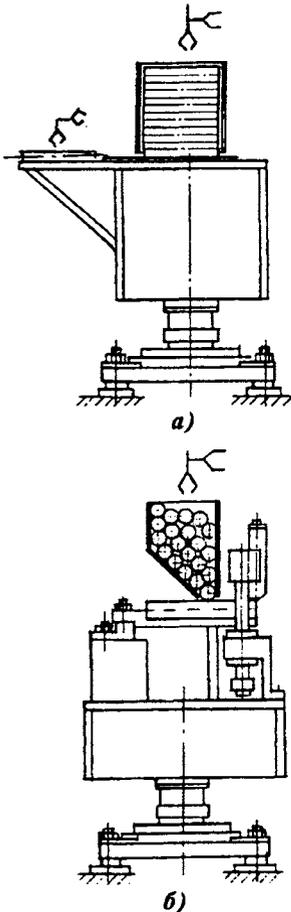


Рис. 4.3.2. Шиберное подающее устройство

возвратно-поступательное движение, зависит от размера заготовок и хода шибера (рис. 4.3.2, *б*). Расчетная сила проталкивания заготовки из стопы

$$P = P_{\text{пр}} + P_{\text{д}},$$

где  $P_{\text{пр}}$  - сила проталкивания;  $P_{\text{пр}} = \beta 2F = 2\beta \mu G_N$ ;  $\beta$  - коэффициент слияния заготовок;  $\beta = 1,6 \dots 1,9$ ;  $F$  - сила трения при движении заготовок;  $\mu$  - коэффициент трения (для стали - 0,12 ... 0,15; для латуни - 0,10 ... 0,12; для алюминия - 0,08 ... 0,10);  $G_N$  - нормальная составляющая силы тяжести заготовки;  $P_{\text{д}}$  - динамическая сила, возникающая в момент разгона шибера,  $P_{\text{д}} = G_{\text{ш}} a / g$ ;  $a$  - ускорение разгона шибера; зависит от типа привода (пнеumo-, гидро-, электропривод);  $g$  - ускорение свободного падения.

**Магазинные подающие устройства** (рис. 4.3.3, *a*) применяются при обработке заготовок с размерами в плане от 70×70 до 500×500 мм и с неограниченной толщиной. Подача заготовок осуществляется с верхнего уровня; для бесперебойной работы требуется поддерживать постоянную высоту заготовки. После обработки всех заготовок требуется смена магазина.

Масса стопы заготовок не превышает 250 кг. Толщины заготовок находятся обычно в пределах 0,2 ... 1,6 мм при допустимом отклонении от плоскостности 2 мм. Устройства имеют возможность регулировать захват по высоте, во взаимоперпендикулярных направлениях, по углу (рис. 4.3.3, *б*). Габаритные размеры устройства в плане 500×500 мм.

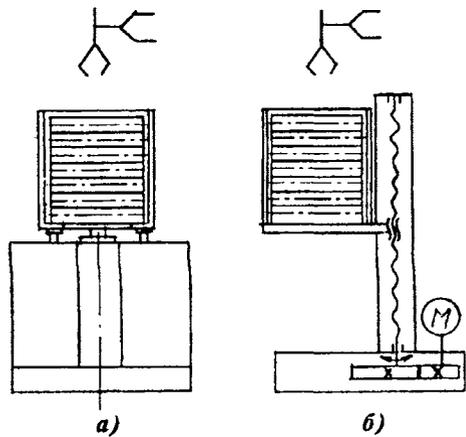


Рис. 4.3.3. Магазиные подающие устройства

Подающие устройства штучных заготовок, обеспечивающие подачу непосредственно на рабочую позицию. Тип подачи зависит от вида заготовки, требуемой точности подачи, характера траектории перемещения, ее длины и компоновочных схем.

Револьверные устройства (рис. 4.3.4) в ГПМ применяют для захвата и перемещения заготовок в рабочую зону. Приводы револьверных подач могут быть пневматическими, гидравлическими и электромеханическими. Для преобразования периодического движения револьверного диска применяются храповые, мальтийские механизмы. Время поворота диска на один шаг

$$T_{\text{пов}} = 60/(zn),$$

где  $z$  - число гнезд (магазинов) в диске;  $n$  - частота вращения револьверного диска,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $n = v_{\text{кас}}/60(\pi D)$ ;  $v_{\text{кас}}$  - скорость касательная,  $v_{\text{кас}} = 0,5 \dots 0,8 \text{ м/с}$ ;  $D$  - диаметр стоп деталей в гнездах (магазинах).

Грейферные подающие устройства предназначены для транспортирования в ориентированном положении штучных заготовок размерами  $30 \dots 450 \text{ мм}$  в рабочую зону: в ГПМ и РТК применяют, как правило, приставные (рис. 4.3.5) и стационарные модульные устройства. Наиболее целесообразно устанавливать грейферные подачи на универсальных блоках со сменными пакетами для групп деталей.

В грейферных подающих устройствах применяют толкающие и клещевые захватные устройства. Толкающие захватные устройства состоят из жестко взаимосвязанных продольных и поперечных планок, перемещающих

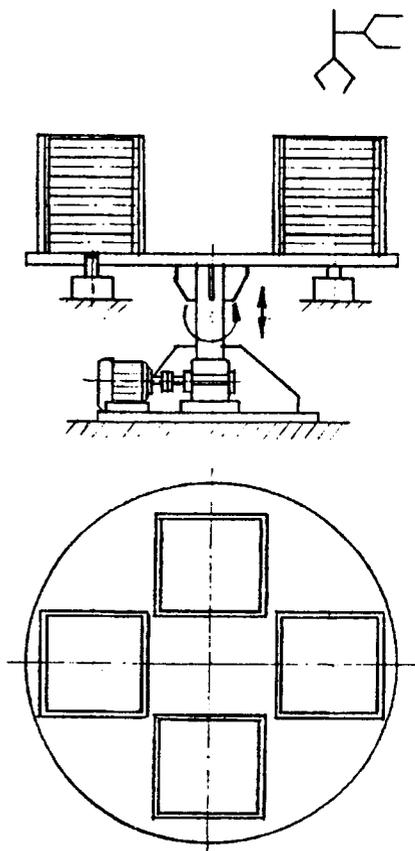


Рис. 4.3.4. Револьверные устройства

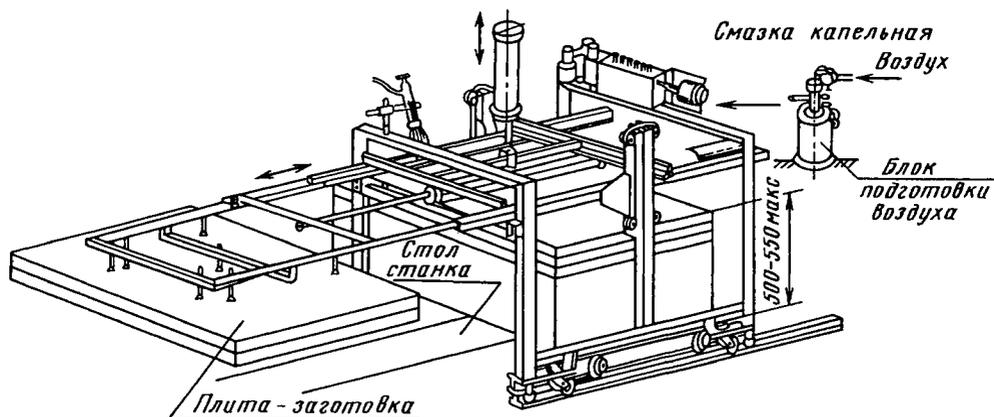


Рис. 4.3.5. Приставное модульное устройство

заготовки на один шаг. Клешевые захватные устройства предназначены для захвата и перемещения заготовок больших габаритных размеров (например, кабины автомобиля). Они могут иметь дополнительные движения за счет добавления элементов захвата для перемещения заготовок при понижении уровня. Движение привода преобразуют клиновые, рычажные, реечные и другие механизмы.

**Механические руки** применяют для перемещения заготовок сложной конфигурации крупных размеров (например, капотов автомобилей, боковин кабин тракторов, комбайнов) по сложной траектории в одной плоскости. Приводы бывают пневматическими, гидравлическими и электромеханическими, а также зависимыми, соединяемыми с элементами оборудования. Конструкция захватного устройства определяется геометрической формой заготовки. Заготовки из кассеты поочередно подаются шибером, приводимым в действие пневматическим цилиндром, который действует синхронно с оборудованием. Захватное устройство механической руки с вакуумным присосом или магнитным захватом переносит заготовку в рабочую зону штампа.

Усилие привода механической руки

$$P_{пр} = G + Q_{ин} + Q_{т} = (G + \beta G_{т})(1 + a / g),$$

где  $G$  - сила тяжести захватного устройства;  $Q_{ин}$  - сила инерции, развиваемая при подъеме захватного устройства;  $Q_{т} = G \cdot a / g$ ;  $\beta$  - коэффициент, учитывающий сцепление заготовок,  $\beta = 1,6 \dots 1,9$ ;  $a$  - максимальное ускорение, развиваемое при подъеме;  $g$  - ускорение свободного падения.

**Ориентирующие устройства** предназначены для ориентирования и поштучной выдачи магнитных и немагнитных заготовок, в том числе для разделения заготовок на потоки. Магнитные заготовки ориентируются и подаются традиционным способом - постоянным магнитным потоком.

**Устройство для ориентирования и поштучной выдачи немагнитных токопроводящих заготовок** состоит из механизмов подачи, двух электромагнитов и источника питания. Ориентирование происходит в межполюсном пространстве за счет взаимодействия переменного магнитного поля с токами, индуцируемыми в заготовке. Заготовка отсекается от потока при выходе из межполюсной зоны за счет резкого убывания поля, а также взаимодействия токов, наводимых в соседних заготовках. Конструктивное исполнение электромагнита и его положение в ориентирующем устройстве совместно с подающими и отводящими механизмами могут быть различными. Преимущество данного метода заключается в возможности определения заготовки по

различным внешним и внутренним скрытым признакам.

Устройство, в котором скомпонованы электромагниты с вибробункером и виброролотком, имеет следующие технические характеристики:

Производительность, дет./мин	250 ... 300
Размеры заготовок, мм, не более	5,0 ... 15,0
Материал заготовок	Медь, алюминиевые сплавы, бронза, латунь
Питание	220В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	250
Габаритные размеры, мм	420×400×500
Масса, кг	60

**Устройство для ориентирования в плоскости асимметричных пластинчатых заготовок с активным электродинамическим методом** служит основой для автоматических загрузочных и контрольно-сортировочных установок. Для разделения заготовок используется разность электродинамических усилий по плоскостям, образующимся в результате взаимодействия электромагнитного поля с различной эквивалентной электрической проводимостью плоскостей. Преимуществом устройства является ориентирование заготовок в процессе свободного падения в зоне электромагнита с выраженным градиентом электромагнитного поля.

Устройство имеет следующие технические характеристики:

Производительность, дет./мин	350 ... 400
Размеры заготовок, мм, не более	2,6×10×10
Материал заготовок	Алюминий, медь, латунь, бронза и др.
Питание	220В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	50
Габаритные размеры, мм	360×250×350
Масса, кг	15

**Устройство электромагнитного ориентирования и автоматической загрузки асимметричных уголков** состоит из электромагнита с источником питания - генератора, вибробункера и отсекателя; имеет следующие технические характеристики:

Производительность, дет./мин	100 ... 200
Размеры заготовок, мм, не более	5×5×10
Материал заготовок	Латунь
Питание	220В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	120
Габаритные размеры, мм	200×200×250
Масса, кг	8

Устройство для электродинамического разделения заготовок на ориентированные потоки предназначено для загрузки технологического оборудования симметричными стержневыми, пластинчатыми немагнитными токопроводящими заготовками и для сортировки и контроля деталей. Устройство состоит из электромагнита, источника питания и лотковой системы. Разделение деталей на ориентированные потоки достигается воздействием на оба конца детали переменными магнитными полями. Устройство может активно воздействовать на детали с внешними и внутренними скрытыми признаками и имеет следующие технические характеристики:

Производительность, дет./мин	200
Размеры заготовок, мм, не более	10×10×60
Материал заготовок	Алюминий, медь, бронза, латунь
Питание	220В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	250
Габаритные размеры, мм	150×300×500
Масса, кг	1,0

**Автоматические бункерные загрузочно-ориентирующие устройства** (рис. 4.3.6) предназначены для ориентации и поштучной выдачи мелких заготовок простой геометрической формы. Заготовки загружаются в бункер навалом. В процессе передачи заготовок ориентируются во времени и пространстве, а затем подаются в зону захвата. Устройство состоит из бункера с органом для захвата, устройств ориентации и переориентации, преобразующего механизма, привода, системы управления и блокирования. В зависимости от вида органа захвата бункерные устройства делятся

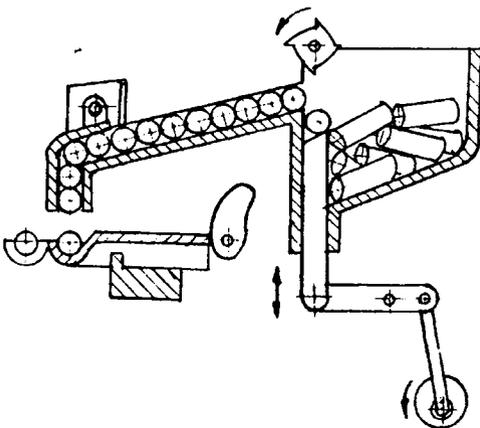


Рис. 4.3.6. Автоматическое бункерное загрузочно-ориентирующее устройство

на крючковые, карманчиковые, наклонные, карманчиковые вертикальные, шелевые, секторные, барабанные, вибрационные, с неподвижными полувтулками и др. Приводом подвижных частей служит электродвигатель. Для преобразования вращательного движения вала в соответствующее движение элементов устройств применяются редукторы различного типа, дисбалансы и другие виды передающих и преобразующих механизмов. Производительность (дет./мин) устройства  $\Pi = Zm\eta$ , где  $Z$  - число захватных устройств;  $n$  - число циклов (полных ходов или оборотов) в мин;  $\eta$  - коэффициент выдачи (в зависимости от конструкции механизмов  $\eta = 0,3 \dots 0,6$ ).

К бункерно-загрузочным устройствам с возвратно-поступательным движением захватного органа относятся бункеры с ножевым захватом. Ползун-нож при движении вверх сквозь беспорядочно расположенные заготовки своим скошенным участком захватывает одну или несколько заготовок, которые оказываются на его пути и становятся ориентированными, и выносит их наверх. В верхнем положении нож останавливается на время, достаточное для перемещения заготовки в отводной лоток. Верхняя часть ножевого захвата представляет собой продолжение или составную часть отводного лотка. Производительность устройства (дет./мин):

$$\Pi = n_x \frac{L}{l} k,$$

где  $n_x$  - число двойных ходов ножа в минуту;  $L$  - длина рабочей поверхности ножа, мм;  $l$  - длина заготовки, мм;  $k$  - коэффициент вероятности захвата (для ножевого бункера  $k = 0,5 \dots 0,7$ ).

Широко распространено устройство с вибробункером, имеющим вертикальный электромагнитный вибратор. Устройство состоит из бункера, на внутренней поверхности которого укреплен сменный спиральный лоток. Лоток начинается у дна бункера и поднимается по спирали. Снаружи чаши бункера укреплен отводной лоток. Основание бункера закреплено на трех наклонных цилиндрических пружинах; к нему прикреплен якорь электромагнита. Корпус электромагнита укреплен на массивной горизонтальной плите. Питание электромагнита осуществляется от сети переменного тока.

Под действием изменяющегося магнитного поля якорь периодически сжимает пружины, а затем они разжимаются. При этом создаются крутильные колебания бункера с находящимися в нем деталями. Вибрационные крутильные колебания имеют небольшую амплитуду. В результате заготовки движутся по наклонному коническому дну к стенкам

бункера, попадают в лоток и поднимаются по нему. Амплитуда колебания, от которой зависит скорость перемещения деталей по винтовому лотку, а значит и производительность бункера, могут регулироваться реостатом, изменяющим силу тока. Для виброизоляции бункера его устанавливают на резиновые амортизаторы. Электромагниты закрывают кожухом. В вибробункере удастся ориентировать детали по двум осям.

Разновидностью вибробункеров являются *вибрлотки прямолинейного типа*. По ним детали могут перемещаться горизонтально или под небольшим уклоном вверх или вниз.

**Приемно-передающее устройство ППУ-3** предназначено для межоперационного транспортирования тары с изделиями.

Устройство работает в ручном и автоматическом режимах, позволяет накапливать межоперационный задел и имеет следующие технические характеристики:

Потребляемая мощность, кВт . . . . .	0,6
Скорость перемещения тары, м/мин . . . . .	10 ... 13
Точность позиционирования тары, мм, в зоне:	
РТК или ГПМ . . . . .	±1,5
транспорта . . . . .	±5,0
Габаритные размеры, мм:	
устройства . . . . .	900×952×1197
тары . . . . .	455×356×100
Масса, кг:	
устройства . . . . .	180
тары . . . . .	50

**Магазинные устройства МУПР-1 и МУПР-2** представляют собой подъемник с устройством накопления заготовок, имеющим две позиции: одна из них служит для загрузки заготовок, а вторая - для их выдачи на уровень захвата руки робота. Технические характеристики устройств приведены ниже:

Размеры заготовок, мм:		
наибольшие . . . . .	250×250	500×500
наименьшие . . . . .	100×100	250×250
Толщина заготовки, мм, не менее . . . . .	0,5	0,5
Высота стопы заготовок, мм, не более . . . . .	250	250
Масса стопы заготовок, кг, не более . . . . .	120	400
Расстояние от пола до плоскости захвата заготовки, мм . . . . .	800 ... 1000	800 ... 1000
Привод . . . . .	Пневмо-гидравлический	
Нормальное давление воздуха, МПа, не менее . . . . .	0,45	0,45
Размеры, в плане, мм . . . . .	920×580	1450×690
Масса, кг . . . . .	300	600

**Шаговый транспортер ШТПР-1** представляет собой планшайбу, имеющую горизонтальное и вертикальное движения и поворот относительно вертикальной оси. Он предназначен для поштучного приема заготовок (деталей) от оборудования и передачи их в ориентированном положении на позицию захвата робота для последующей операции. Транспортер имеет следующие технические характеристики:

Размеры заготовок, мм:	
наибольшие . . . . .	500×500
наименьшие . . . . .	50×50
Масса заготовки, кг, не более	5
Наибольшее перемещение заготовки в горизонтальной плоскости, ° . . . . .	180
Расстояние от пола до плоскости захвата заготовки, мм . . . . .	800 ... 1000
Привод . . . . .	Пневматический
Нормальное давление воздуха, МПа . . . . .	0,45
Размеры в плане, мм . . . . .	1300×560
Масса, кг . . . . .	600

Для автоматической смены инструмента, широко распространены в ГПМ на основе **обрабатывающих центров (ОЦ) устройства замены инструмента: пирамидные (двухрядные) и револьверные (горизонтальные)**. Замена инструмента осуществляется манипулятором ОЦ с помощью шпинделя, который поочередно забирает инструмент с устройства, установленного на спутник ГПМ. На рис. 4.3.7 изображено устройство замены инструмента в ГПМ "Модуль-800".

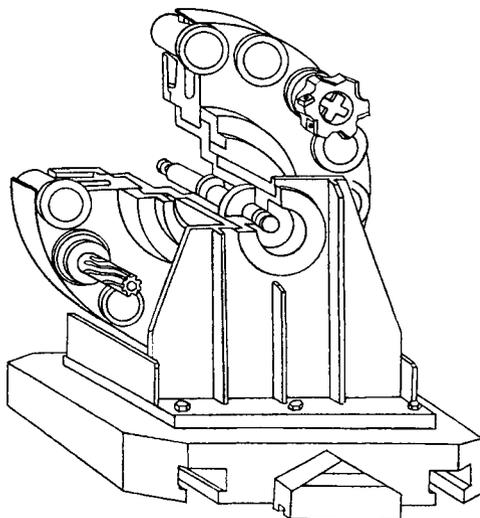


Рис. 4.3.7. Устройство замены инструмента

**Транспортно-складские системы.** Структура системы транспортирования и складирования характеризует распределение и взаимодействие различных элементов системы при выполнении операций погрузки, выгрузки, перегрузки предметов труда (деталей, заготовок, полуфабрикатов, материалов) и перемещения грузов с учетом взаимного расположения ГПМ или РТК, вспомогательного оборудования, устройств, тары, связанных общей программой взаимодействия. Функциями автоматической транспортно-складской системы (АТСС) являются обеспечение производства необходимыми предметами труда, поддержание их запасов и осуществление перемещения предметов труда в ходе производственного процесса.

В состав автоматических складских систем входят: стеллажные и элеваторные конструкции; роботизированные, автоматические штабелирующие машины; ПР; тара; устройство перегрузки тары; напольные накопители (приемные, выдающие); устройства передачи с накопителя в транспортную систему и приемные столы склада, координатные столы комплектации и загрузки; устройства управ-

ления складом (на базе микроЭВМ "Электроника-60").

Применяют автоматические склады с клеточными стеллажами с автоматическим краном-штабелером и ПР, а также автоматическими элеваторными стеллажами. В каждой ячейке склада хранятся кассеты со штучными заготовками, деталями, инструментом. Автоматические склады с элеваторными стеллажами применяют в основном для хранения и перемещения спутников.

В состав роботизированных складских комплексов (РСК) входят: два бесполочных клеточных стеллажа с консольными опорами для грузов; автоматический стеллажный кран-штабелер; складская ячеистая тара; перегручное устройство для приема и выдачи поддонов из хранилища; устройство автоматического управления ЗС-100.01 (или НЦ-80-31). Склады располагают, как правило, вдоль производственного участка. Комплексные автоматизированные склады ОРГ-2, ОРГ-3, ОРГ-4 и ОРГ-5 применяют (с доработкой) в мелкосерийном и единичном производстве с групповыми поточными линиями и на предметно-замкнутых участках (табл. 4.3.8).

4.3.8. Роботизированные складские комплексы

Показатель	Значения показателей для РСК						
	РСК-50		РСК-250	РСК-500	РСК-1000		
	Исполнение				Исполнение		
	1	2	1-4	5-9	10-14		
1	2	3	4	5	6	7	8
	<b>Поддоны ящичные металлические</b>						
Грузоподъемность, кг	50		250	500	1000		
Длина (вдоль стеллажей), мм	356		420	640	1260		
Ширина (в глубину стеллажей), мм	480		620	840	860		
Высота, мм	250		435	750	750		
	<b>Стеллажи</b>						
	Бесполочные				Каркасные		
Число поддонов в ячейке	1	1	1	4	2		
Высота яруса, мм	320	320	510	880	880		
Число ярусов по высоте	7	15	9	8	7, 8, 9, 11, 13		
Длина ячейки, мм	445	445	550	2940	2940		
Количество по длине:							
ячеек	31	31	30	10	10	22	30
поддонов	31	31	30	40	20	44	60
Общее число поддонов в стеллажах	434	930	540	640	280-520	616-1144	840-1560

Продолжение табл. 4.3.8

1	2	3	4	5	6	7	8
	<b>Кран-штабелер</b>						
	Стеллажный			Автоматический			
Грузоподъемность, кг	50	250	500	1000			
Скорость, м/мин:							
движения штабелера	45/4,5	60/6	0-132	0-160			
подъема каретки	9	9/6	0-32	0-32			
выдвижения грузоза- хвата	6	8	16	16			
Мощность, кВт	2,0	2,7	24	28			
	<b>Склад в целом</b>						
Длина, м	17,2	20,4	38,5	39,0	74,5	97,8	
Ширина, м	1,8	2,2	2,9	2,9			
Высота, м	3,3	5,8	5,8	8,0	7,1; 8; 8,9; 10,7; 12,4		
Площадь, м <sup>2</sup>	31	45	112	113	216	284	

**4.3.9. Технические характеристики  
автоматических толкающих конвейеров, применяемых в РТК**

Параметр	ТПВ-200Д	ТП-80	КТ-100	КТ-160
Грузоподъемность на горизонтальном участке трассы, кг, не более:				
одиночной тележки	50	250	—	—
двухтележного сцепа	70	350	800	2000
Тип цепи	Двух- шарнирный	Разборная	Специальная	
Шаг звена цепи, мм	200	80	РС-100	РС-160
Расчетное тяговое усилие цепи, кН	4,5	8	12,5	30
Угол наклона трассы, °, не более	60	45	30	30
Скорость цепи, м/с, не более	0,67	0,46	0,3	0,3
Радиус изгибов пути, мм, не менее:				
горизонтального	600	410	610	617
вертикального	1000	2000	2438	3048
Масса, кг:				
головной тележки	4,4	10	21	43
концевой »	2,4	7	14	35
участка пути ГЦ длиной 6 м	88	158	205	345
Способ установки накапливания на складских участках	С помощью останова для первой тележки и автопостов для последующих тележек			
Способ передачи с конвейера на конвейер	С толкателя за головную тележку		Доталкиванием за упор второй тележки	

Применение ПР в складских системах позволяет автоматизировать операции разгрузки, погрузки, укладки, перемещения (запоминания, вызова) и захватывания для передачи на различные транспортные системы.

*Автоматические транспортные системы* предназначены: для погрузки, перемещения, разгрузки, транспортировки, накопления и адресации предметов труда, отходов, инструментов в целях обеспечения производственного процесса. В состав автоматических транспортных систем входят трасса с датчиками останова, толкающие конвейеры или транспортные ПР, накопители, приемные столы, подъемно-поворотные столы, перегрузочные тележки, устройство управления транспортными средствами (на базе микроЭВМ "Электроника-60"), а также тара для отходов производства и поворотные двухпозиционные столы для тары.

Выбор конкретного оборудования транспортной системы является ответственной задачей.

Применяют серийно выпускаемые *автоматические толкающие конвейеры*, указанные в табл. 4.3.9 и разработанные ПО "Конвейер".

Роботизированный транспортно-перегрузочный комплекс (РТПК-Т) предназначен для транспортировки, съема и оперативного накопления загруженной тары по заданной перенастраиваемой программе. Состав РТПК-Т: подвесной грузонесущий конвейер; ПР модели МТК для загруженной тары; система управления на базе микроЭВМ мод. СМ-1800. РТПК-Т представляет собой комплекс с переменной структурой - различным числом транспортных конвейеров и погрузочно-разгрузочных мест. Распределение грузов происходит посредством системы адресования с учетом транспортно-технологической ситуации. В зависимости от состава комплекса и задач адресования возможна гибкая настройка комплекса путем задания соответствующих программ управления. Число адресуемых точек в комплексе может достигать 255.

Система управления комплексом обеспечивает отправление груза с любой точки загрузки в любую точку разгрузки, оперативное накопление загруженной тары в точках погрузки и выгрузки с сохранением адресной информации. Кодирование груза осуществляется системой управления на адресносителе или в моделирующей программе ЭВМ.

*На базе РТПК-Т возможно построение автоматизированных транспортно-складских комплексов*, в состав которых кроме перечис-

ленного оборудования могут входить автоматические склады-штабелеры для загруженной тары. Предусмотрена возможность стыковки системы управления РТПК-Т с системой управления складом-штабелером, что позволяет осуществить автоматический выбор со склада нужных грузов, погрузку их на конвейер и доставку в заданные точки.

С помощью системы управления РТПК-Т проводят учет транспортируемых грузов, информационный диалог с оператором комплекса, передачу необходимых сведений в АСУ. ПР мод. МТК-50, МТК-250, МТК-500 представляют собой машинный комплекс, обеспечивающий механизацию погрузочно-разгрузочных работ. ПР рассчитаны на совместную работу с подвесными грузонесущими и толкающими конвейерами, подвески которых оборудованы системой адресования, и с унифицированной тарой с грузом. Краткие технические характеристики РТПК-Т приведены в табл. 4.3.10. ПР обеспечивают автоматический съем, загрузку, установку на роликовый конвейер, передачу по конвейеру и накопление грузов.

В РТК все больше применяют транспортные ПР, характеризующиеся: малыми габаритами подвижного состава; большим диапазоном регулирования производительности; автоматическим перемещением в зависимости от потребности; обеспечением свободного проезда после прохождения для других видов транспорта; автономностью для большинства из типов. Технические характеристики транспортных ПР приведены в табл. 4.3.11. Транспортная система, оснащенная ПР, включает транспортные и перегрузочные ПР, транспортные пути (напольные, подвесные, смешанные), накопители, магазины, переставители, устройство управления транспортной системой, датчики, ЭВМ.

На рис. 4.3.8 приведена схема транспортной системы РТК состоящей из ПР мод. П-ТПР-50-030 3, трассы 2 с системой управления 4 со стрелками 1, накопителя 5, складов 6, датчика, подающих и приемных устройств для полос, карт и штучных заготовок, устройства управления транспортной системы и ЭВМ. ПР мод. МП-14Т, МП-15Т разработаны в ЦНИИ РТК для систем межоперационного транспорта для десяти контейнеров массой 20 кг; ПР состоит из подвижной грузовой платформы на четырехколесном шасси, автоматического манипулятора и бортовой мини-ЭВМ типа "Электроника-60". Конструкция ПР модульная, рассчитанная на несколько модификаций.

**4.3.10. Краткие технические характеристики  
роботизированных транспортно-перегрузочных комплексов**

Параметр	МКТ-50	МКТ-250	МКТ-500
Грузоподъемность, кг	До 50	До 250	До 500
Скорость перемещения грузов на подвесном конвейере, м/мин	До 10	До 10	До 8
Скорость перемещения груза на роликовом конвейере манипулятора, м/мин	15	15	15
Тип привода манипулятора	Электропневматический	Электрогидравлический или электромеханический	
Род тока	Переменный		
Напряжение питания, В	220/380	220/380	220/380
Число адресов	15-63	15-63	15-63

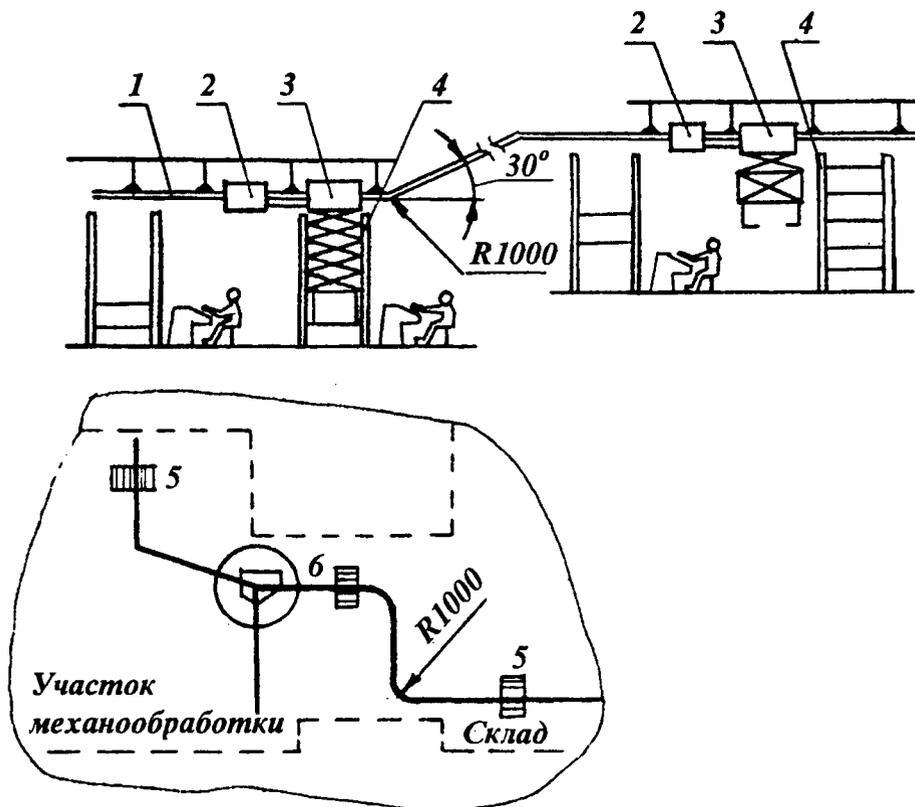


Рис. 4.3.8. Схема транспортной системы РТК

### 4.3.11. Технические характеристики транспортных ПР

Параметр	Телер 20/500	МП-12Т	МП-14Т, МП-15Т	МП-16Т	МП-18Т	"Электроника НЦ-ТМ-25"	"Электроника НЦ-ТМ-15"
1	2	3	4	5	6	7	8
Габаритные размеры, мм	2000×1900× ×1100	1900×1700× ×1000	2000×1800× ×1050	—	2000×1800× ×1050	2000×290×700	2000×1500×700
Грузоподъемность шасси, кг	500	4000	700	250	700	500	500
Грузоподъемность манипулятора, кг	20	15	25	60	60	—	50
Масса, кг:							
без манипулятора	480	300	350	200	350	290	350
с манипулятором	600	450	530	300	590	—	510
Источник энергии	Аккумуляторная батарея 12 В × 130 А/ч (5 шт.)	Аккумуляторная батарея 12 В × 105 А/ч (4 шт.)	Аккумуляторная батарея 12 В × 130 А/ч (4 шт.)	Электросеть	Аккумуляторная батарея 12 В × 130 А/ч (4 шт.)	Аккумуляторная батарея 12 В × 55 А/ч (5 шт.)	Аккумуляторная батарея 12 В × 55 А/ч (4 шт.)
Скорость передвижения, м/с	0,8	0,7	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6
Радиус поворота, м	—	1,5	0,1	1,5	0,1	0,5	0,5
Погрешность позиционирования:							
продольная, мм	±20	±10	±5	±2	±0,5	±20	±20
поперечная, мм	±5	±10	±3	±2	±3	±5	±5
угловая, °	2	2	2	2	2	—	—
схвата манипулятора, мм	±3	±10	±3	±3	±3	—	±3

1	2	3	4	5	6	7	8
Скорость перемещений по степени подвижности манипулятора:							
поворот, °/с	±100	±165	±165	±180	-165	—	±165
подъем, м/с	0,6	0,4	0,5	0,03	0,6	—	0,5
выдвижение, м/с	0,8	0,8	1,0	0,32	1,0	—	0,8
ротация схвата, °/с	±165	±165	±165	—	±165	—	±165
Время непрерывной работы, с	6	3	10	Не ограничено	10	3	2
Устройство управления	На базе ЭВМ "Электроника -80"	На базе ЭВМ "Электроника -60М"	Модульное на базе ЭВМ "Электроника -60М"	Специализированное	Модульное на базе ЭВМ "Электроника -60М"	На базе ЭВМ "Электроника-60М"	
Способ навигации	Реперные точки, лазерные	По светоотражающей полосе	По реперной линии	По желобу	По реперной линии	По светоотражающей полосе	
Тип навигационных датчиков (разрешающая способность)	Лазерный	Линейка дискретных фотодатчиков (16 линий)	Фотодатчики на ЛПЗС (500 линий)	—	Фотодатчики на ЛПЗС (500 линий)	Линейка дискретных фотодатчиков (16 линий)	

Транспортная напольная система состоит из адаптивного подвижного напольного ПР с электромеханическим приводом, трассы загрузочно-разгрузочных устройств, датчиков для обмена информацией с РТК и распознавания технологических модулей, раздаточного и приемного устройств, устройства подзарядки аккумуляторов, информационных устройств. Транспортный ПР мод. МП-14Т состоит из следующих подсистем: управляющей микроЭВМ, оснащенной рабочими программами; автономного источника питания; устройства беспроводной связи с технологическим оборудованием; устройства защиты людей от наезда; устройства защиты блоков управления от перегрузки; устройства наблюдения за линией маршрута (курсом); средства распознавания обслуживаемых объектов; устройства торможения и остановки по сигналам оборудования о готовности его к операции общения с транспортным ПР; устройства коррекции позиционирования звеньев манипулятора при неточных остановках у объекта обслуживания в функции фактической погрешности.

Транспортный ПР мод. МП-14Т выполнен на подвижной платформе размерами 1400×1000 мм с автономным электроприводом (240 Вт), который питается от аккумуляторной батареи. На платформе установлен модульный манипулятор ПРЭМ-25 с электромеханическим приводом. Вся работа и управление манипулятором осуществляется от микроЭВМ "Электроника-60" (по рабочим программам с учетом информации, получаемой от блока управления с датчиками), датчиков связи и сигнализации (расположенными на оборудовании). На грузовой платформе может быть установлено до десяти контейнеров с грузом или загрузочных устройств (кассет) с заготовками общей массой до 700 кг. Контейнеры имеют кодированные вставки (клейма), с помощью которых они распознаются установленной на подвижной платформе системой; по ним же транспортный ПР распознает объект (оборудование).

Рабочее оборудование имеет отличительные признаки, по которым транспортный ПР останавливается, распознает объект, определяет свое положение относительно обслуживаемого объекта, вид операции, а также скорость, с которой он должен продолжать движение до следующего объекта. В аварийных ситуациях ПР останавливается и подает сигнал тревоги оператору.

Общая длина трассы 150 м, число обслуживаемых рабочих мест до 62, время обслуживания десяти объектов 5 мин. Удержание ПР на трассе движения обеспечивается с помощью кондуктора и следящего устройства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технологическое** оборудование ГПС / О.И. Аверьянов, А.И. Дашенко, О.Н. Миляев и др.; Под ред. А.И. Федотова и О.Н. Миляева. Л.: Машиностроение, 1991. 324 с.
2. **Технологическая** подготовка ГПС / С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун.; Под ред. С.П. Митрофанова. Л.: Машиностроение, 1987. 368 с.

## Глава 4.4

### ОРГАНИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

#### 4.4.1. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО НАЛАДКЕ, ПЕРЕНАЛАДКЕ И ОБСЛУЖИВАНИЮ ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Групповое производство* - форма построения дискретных производственных процессов, технологической основой которых является унифицированная, групповая технология обработки (сборки) предметов труда, а экономико-организационной основой - целевая подетальная (предметная) специализация цехов, участков и многономенклатурных (групповых) поточных линий.

Различают две формы организации группового производства:

при подетальной специализации и единичной или типовой технологии - подетальные цехи, участки и многономенклатурные групповые потоки с переналадкой станков;

при подетальной специализации и групповой технологии - подетально-групповые цехи, участки и многономенклатурные потоки без переналадки станков с сохранением элементов подналадки.

Подетально-групповая форма с унификацией технологических процессов открывает широкие возможности механизации и автоматизации производства.

При подетальной специализации цехи, участки и линии специализируются по изготовлению конструктивно-технологических сходных деталей, сгруппированных независимо от их принадлежности к изделию с учетом организационно-плановых показателей (трудоемкость, объем выпуска).

При организации подетально-групповых цехов, участков, линий решаются следующие задачи:

- формирование конструктивно-технологических групп деталей (сборочных единиц);
- формирование производственно-структурных единиц;
- создание подетально-специализированных участков, линий;

внутриучастковая специализация технологического оборудования, инструмента и оснастки;

моделирование параметров подетально-специализированных участков, линий, в том числе групповых рабочих мест;

проектирование технологических планировок;

расчет технико-экономических показателей проекта группового производства.

При формировании подетально-групповых участков решаются следующие задачи: выбор моделей оборудования; модернизация при необходимости; оснащение вспомогательными устройствами, комплектом оснастки и инструмента; расчет загрузки оборудования; уточнение служб объединения; компоновка участков, линий и цехов с уточнением специализации, материальных потоков и кооперации. При выборе оборудования различают две ситуации: образование рабочего места на базе имеющегося оборудования с проведением его модернизации и оснащением устройствами, способствующими переналадке, и создание специализированного рабочего места на базе технологической проработки и изготовления нового оборудования. Важным фактором в обоих случаях является оснащение оборудования групповой или переналаживаемой оснасткой и групповыми блоками инструмента.

Различают три вида планировки оборудования на предметно-замкнутых участках:

точечную, когда между рабочими местами отсутствуют кооперативные связи;

рядную, когда рабочие места связаны определенной последовательностью (характерно для линии);

гнездовую, когда рабочие места скомпонованы по кооперативным связям технологического процесса.

**Групповое производство деталей из пластмасс.** Одним из наиболее эффективных направлений совершенствования технологии и организации серийного и мелкосерийного производства деталей из пластмасс является метод групповой обработки.

Метод заключается в группировании деталей по общности технологического процесса, оборудования и оснащения, а также разработке единого группового технологического процесса и оснащения для каждой группы технологически однородных деталей с последующей организацией их обработки на специализированных рабочих местах и в производственных подразделениях (цехах, участках, линиях).

В каждом виде обработки организация группового производства имеет особенности, вытекающие из специфики технологического процесса. Основным содержанием этого метода в данном виде производства является широкое использование групповых блоков и формовкладышей вместо индивидуальной оснастки, предназначенной для изготовления деталей одного наименования.

Применение групповых блоков и формовкладышей наиболее целесообразно в условиях серийного и мелкосерийного производства, для которых характерны разнообразная номенклатура деталей, изготавливаемых мелкими партиями, и их частая сменяемость.

Блочная оснастка успешно и широко применяется для изготовления деталей из пластмасс, обладающих следующими характеристиками: материал - пресс-порошки, волокнистые материалы, термопласты; форма, конструктивные особенности - круглые, прямоугольные, плоские, в том числе с отверстиями, с арматурой (детали сложной конфигурации); габариты - не более 200x200 мм; масса - до 1 кг; класс точности - не выше 5-го. Блоки устанавливаются почти на всех типах отечественного и зарубежного оборудования для переработки пластмасс: гидравлических прессах с нижним и верхним давлением, механических прессах, литьевых машинах ЛМ, ТП, Д.

Применение блочной оснастки для переработки пластмасс методами прямого прессования, пресс-литья и литья под давлением снижает трудоемкость проектирования оснастки на 25 ... 35 % и изготовления оснастки в среднем на 40 %; сокращаются сроки технологической подготовки производства в 1,5-3 раза и время на переналадку и нагрев оснастки на 10 %; снижается металлоемкость по сравнению с металлоемкостью при индивидуальной оснастке в 1,5-2 раза; улучшаются условия труда при транспортировке оснастки и выполнении наладочных работ; сокращаются площади, необходимые для хранения оснастки, в 3-4 раза.

Для рационального использования групповых блоков и формовкладышей в условиях мелкосерийного и серийного производства необходимо:

систематизировать и сгруппировать по конструктивно-технологическому подобию все детали из пластмасс, которые могли бы быть изготовлены методами прямого прессования, пресс-литья и литья под давлением (разработать классификатор деталей) или, при

небольшой номенклатуре, создать альбом чертежей таких деталей;

разработать необходимое количество вариантов схем технологических процессов, а после уточнения состава групп деталей и подбора переналаживаемой оснастки разработать рабочие технологические процессы;

определить минимальное количество типов и типоразмеров групповых блоков, используемых в данном производстве;

провести технико-экономические расчеты, подтверждающие целесообразность применения групповых блоков и формовкладшей вместо индивидуальной оснастки и уточнить номенклатуру деталей, переводимых на изготовление в групповых блоках;

подобрать или разработать рабочие чертежи групповых блоков и формовкладшей всех необходимых типов и типоразмеров, максимально используя при этом классификаторы группового оснащения и конструкции, опробованные в производственных условиях. Нормализовать блоки, формовкладши, их детали, конструктивные элементы и заготовки деталей или создать каталог (альбом) чертежей групповых блоков и формовкладшей, применяемых на предприятии;

внести в технологические процессы шифры переналаживаемой оснастки, применяющейся на предприятии (групповая и индивидуальная).

Для систематизации деталей из пластмасс по конструктивно-технологическому подобию наиболее целесообразно иметь единый классификатор.

На большинстве предприятий, применяющих принципы метода групповой обработки при изготовлении деталей из пластмасс, имеются каталоги или альбомы чертежей деталей из пластмасс.

Большое количество конструкций групповых блоков и формовкладшей потребовало классификации их по основным конструктивным и эксплуатационным признакам с тем, чтобы облегчить задачу выбора типов оснастки, наиболее рациональных для конкретных производственных условий из всего многообразия существующих.

Классификатор основных типов групповых блоков для изготовления деталей из пластмасс методами прессования, пресс-литья и литья под давлением, приведенный в табл. 4.4.1, систематизирует групповые блоки: по видам технологического процесса, группам применяемого оборудования; способу эксплуатации; расположению загрузочной каме-

ры; наличию и виду привода для перемещения формующих элементов; форме применяемых формовкладшей.

Каждому типу блока соответствует определенный четырехзначный шифр. Структура классификатора создала предпосылки для быстрого mnemonicского запоминания шифров и удобства пользования. С этой целью для каждой категории блоков выделен один или несколько десятков знаков шифра. Так, например, блоки для прямого прессования имеют шифры от 6001 до 6019 включительно.

Все шифры, имеющие в своем составе цифру 9, выделены под рубрикой "прочие" и предназначены для классификации редко встречающихся или неучтенных конструкций при составлении данного классификатора.

Большинство типов блоков, имеющие родственные признаки, корреспондируются по вторым знакам шифра. Так, например, в шифрах всех блоков без привода, для клиновых и конических формовкладшей четвертым знаком шифра является цифра 2 (6002; 6022; 6032; 6052; 6072).

Блоки с приводом возвратно-поступательного движения имеют четвертый знак шифра цифры 5 для блоков под прямоугольные и цилиндрические формовкладши (6005, 6025, 6035 и т. д.) и 6 для блоков под клиновые и конические формовкладши (6006, 6026, 6036 и т. д.).

Классификатор основных типов формовкладшей к групповым блокам, представленный в табл. 4.4.2, систематизирует конструкции по количеству и расположению плоскостей разреза, устройству загрузочной камеры и способам выталкивания детали.

Структура данного классификатора так же, как и предыдущего, предусматривает выделение для каждой разновидности формовкладшей десятки шифров. Так, например, все формовкладши для блоков 6001-6019, имеющие одну горизонтальную плоскость разреза, получают шифры от 6000 до 6009 включительно, вертикальную - от 6010 до 6019 и т. д.

Четвертые знаки шифра формовкладшей корреспондируются так же, как и в шифрах блоков. Например, всем формовкладшам с открытой загрузочной камерой присваиваются шифры, имеющие в четвертом знаке цифру 0 при способе выталкивания стержнями (6000, 6010, 6020 и т. д.), 1 - при способе выталкивания плитой (6001, 6011, 6021 и т. д.), 2 - при комбинированном способе выталкивания (6002, 6012, 6022 и т. д.).

#### 4.4.1. Классификатор групповых блоков для изготовления деталей из пластмасс

Вид технологического процесса	Оборудование	Способ крепления формовкладшей в блоках	Расположение загрузочной камеры	Наличие и вид привода для перемещения формирующих элементов	Форма применяемых формовкладшей	Код		
1	2	3	4	5	6	7		
Прямое прессование	Гидравлические прессы	Стационарный	—	Без привода		6001		
						6002		
				С приводом	вращающим	6003		
					возвратно-поступательного движения	6005		
							6006	
					комбинированным	6007		
				Полустационарный	—	—		6011
								6012
		Прочие, в том числе широко универсальные (стационарные и полустационарные)					6013	
		Пресс-литье		Стационарный	С верхней загрузочной камерой	Без привода		6021
								6022
						С приводом	вращающим	6023
возвратно-поступательного движения	6025							
							6026	
комбинированным	6027							
						6028		
С нижней загрузочной камерой						Без привода		6031
				6032				

1	2	3	4	5		6	7
Пресс- литье	Гидравли- ческие прессы	Стационар- ный	С нижней загрузочной камерой	С при- водом	вращающим	Прямоугольные и цилиндрические	6033
					возвратно-поступатель- ного движения	Клиновые и конические	6034
					комбинированным	Прямоугольные и цилиндрические	6035
			С верхней загрузочной камерой	—	Прямоугольные и цилиндрические	6037	
					Клиновые и конические	6038	
					Прямоугольные и цилиндрические	6041	
		Полустационарный	С нижней загрузочной камерой	—	Прямоугольные и цилиндрические	6042	
					Клиновые и конические	6043	
					Клиновые и конические	6044	
		Стационарный*	С наклонной камерой	—	Прямоугольные и цилиндрические	6045	
					Клиновые и конические	6046	
					Прямоугольные и цилиндрические	6047	
Прочие, в том числе широко универсальные (для прессования и пресс-литья)						Клиновые и конические	6048
Без привода						Прямоугольные и цилиндрические	6049
						Клиновые и конические	6051
вращающим						Клиновые и конические	6052
						Прямоугольные и цилиндрические	6053
С при- водом						Клиновые и конические	6054
						возвратно-поступатель- ного движения	Прямоугольные и цилиндрические
комбинированным						Клиновые и конические	6056
						Прямоугольные и цилиндрические	6057
—						Клиновые и конические	6058
						Прямоугольные и цилиндрические	6061
—						Клиновые и конические	6062

1	2		3	4	5		6	7
Литье под давлением	Литьевые машины и роторно-литьевые машины	с вертикальным материальным цилиндром	Стационар- ный	-	Без привода		Прямоугольные и цилиндрические	6071
							Клиновые и конические	6072
					С при- водом	вращающим	Прямоугольные и цилиндрические	6073
							Клиновые и конические	6074
						возвратно-поступатель- ного движения	Прямоугольные и цилиндрические	6075
							Клиновые и конические	6076
						комбинированным	Прямоугольные и цилиндрические	6077
							Клиновые и конические	6078
		Полустаци- онарный	-		Прямоугольные и цилиндрические	6081		
					Клиновые и конические	6082		
Прочие							6089	
Гидро- прессы, снабженные цилиндром	Полустаци- онарный	-	-		Прямоугольные и цилиндрические	6091		
					Клиновые и конические	6092		
Прочие							6099	

\* Съемные блоки со стационарным креплением формовкладшей

## 4.4.2. Классификация формовкладшей к групповым блокам

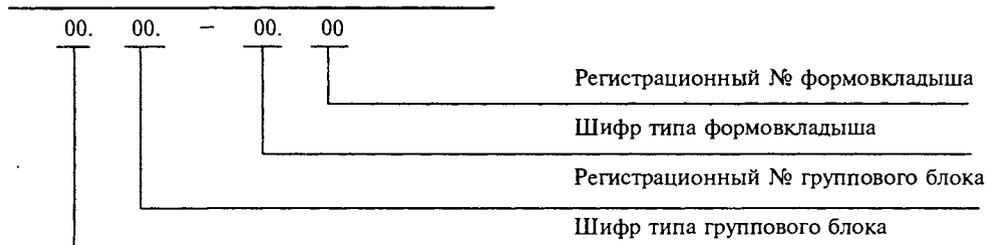
Индексы блока	Количество плоскостей разъема	Расположение плоскостей разъема	Конструкция загрузочной камеры	Способ выталкивания детали	Код
1	2	3	4	5	6
01-19	Одна	Горизонтальное	Открытая	Стержнями	6000
				Плитой	6001
				Комбинированный	6002
			Закрытая	Стержнями	6003
				Щеками или вставками	6004
				Комбинированный	6005
		Полузакрытая	Стержнями	6006	
			Щеками или вставками	6007	
			Комбинированный	6008	
		Прочие	6009		
		Вертикальное	Открытая	Стержнями	6010
				Плитой	6011
	Комбинированный			6012	
	Закрытая		Стержнями	6013	
			Щеками или вставками	6014	
			Комбинированный	6015	
	Полузакрытая	Стержнями	6016		
		Щеками или вставками	6017		
		Комбинированный	6018		
	Прочие	6019			
	Несколько	Горизонтальное	Открытая	Стержнями	6020
Плитой				6021	
Комбинированный				6022	
Закрытая			Стержнями	6023	
			Щеками или вставками	6024	
			Комбинированный	6025	
Полузакрытая		Стержнями	6026		
		Щеками или вставками	6027		
		Комбинированный	6028		
Прочие		6029			
Вертикальное	Открытая	Стержнями	6030		
		Плитой	6031		
		Комбинированный	6032		
	Закрытая	Стержнями	6033		
		Щеками или вставками	6034		
Комбинированный	6035				

Продолжение табл. 4.4.2

1	2	3	4	5	6
01-19	Несколько	Вертикальное	Полузакрытая	Стержнями	6036
				Щеками или вставками	6037
			Комбинированный	6038	
			Прочие	6039	
		Горизонтальное и вертикальное	Открытая	Стержнями	6040
				Плитой	6041
				Комбинированный	6042
			Закрытая	Стержнями	6043
				Щеками или вставками	6044
				Комбинированный	6045
Полузакрытая	Стержнями	6046			
	Щеками или вставками	6047			
	Комбинированный	6048			
Прочие	6049				
21-99	Одна	Горизонтальное	-	Стержнями	6050
				Плитой	6051
				Комбинированный	6052
				Прочие	6059
	Вертикальное	-	Стержнями	6060	
			Плитой	6061	
			Комбинированный	6062	
			Прочие	6069	
	Несколько	Горизонтальное	-	Плитой	6071
				Стержнями	6073
				Щеками и вставками	6074
				Комбинированный	6075
Вертикальное		-	Плитой	6081	
			Стержнями	6083	
			Щеками и вставками	6084	
			Комбинированный	6085	
Горизонтальное и вертикальное		-	Плитой	6089	
			Стержнями	6091	
			Щеками и вставками	6093	
			Комбинированный	6094	
Прочие	6095				
Прочие	6099				

Все шифры, в состав которых входит цифра "9" относятся к категории "прочие".

В итоге шифр формовкладыша в сочетании с блоком, совместно с которым он может быть использован, приобретает вид:



Данный шифр может одновременно являться и номером производственно-технологической группы деталей.

#### 4.4.2. ЦЕХИ И УЧАСТКИ ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Эффективность функционирования гибких производственных систем будет обеспечена лишь при условии, что прибыль в результате роста выпуска продукции по сравнению с предметно-замкнутыми участками, оснащенными универсальными станками или станками с ЧПУ, превысит удорожание производственной системы в целом, включая технологическую, транспортно-загрузочную и управляющие подсистемы. Пока такое условие труднодостижимо: удельная емкость единиц оборудования (ГПМ) в 15-25 раз выше, чем в неавтоматизированном производстве, в то время как производительность возрастает в 2,5-3 раза, а численность работающих снижается в 3-4 раза. Поэтому гибкие производственные системы (ГПС) обеспечивают высокое качество и конкурентоспособность изделий, решают проблему трудовых ресурсов и социальные вопросы, но не всегда обеспечивают эффективность. Цехи, участки и линии группового производства, а также ГПС, работающие в три смены, являются современным, полностью автоматизированным, механообрабатывающим производством, в котором реализованы принципы совершенной технологии, и использованы гибкие производственные (автоматические) модули для функционирования производства без вмешательства оператора. Для обработки сложных корпусных деталей размерами до 400×400×400 мм созданы ГПС АЛП-2-1, АЛП-3-1 и АЛП-3-2 (точность отверстий до качества Н7, допуски на межцентровое расстояние для точных отверстий  $\pm 0,05$  и  $\pm 0,02$  мм).

В состав ГПС входят многооперационные станки с инструментальным магазином, накопитель заготовок, склад, система инструментального обеспечения с двумя промышленными роботами, установки для мойки

деталей, станции загрузки и разгрузки спутников, машина контроля изделий, транспортная система, система централизованного управления от ЭВМ.

ЭВМ управляет станками и оборудованием путем передачи управляющих программ к устройствам ЧПУ, промышленным роботам, накопителям, станциям съема и установки спутников с деталями на станки, системам инструментального обеспечения, выдает информационные указания на позиции загрузки спутников, обеспечивает синхронизацию работы всего комплекса.

Система инструментального обеспечения осуществляет загрузку, хранение, комплектацию инструментальных магазинов станков во время обработки деталей. Окончательное измерение деталей выполняет координатно-измерительная машина с ЧПУ.

В состав АЛП-3-1 входят: восемь многооперационных станков (СМ400Ф4.5, СМ630Ф4.5, СГ400Ф4.5); склад заготовок, изделий, спутников инструмента, накопителей спутников заготовок; установки загрузки и разгрузки спутников; моечные машины; системы инструментального обеспечения и уборки стружки; координатно-измерительная машина с ЧПУ; две мини-ЭВМ СМ-2М; система оперативно-календарного планирования.

Основные технико-экономические показатели ГПС АЛП-3-1 и АЛП-3-2 в сравнении с вариантам обработки этих же деталей на универсальных станках и станках с ЧПУ в одном и том же цехе приведены в табл. 4.4.3. Номенклатура деталей - 70 наименований.

Большой объем механической обработки корпусных деталей на линии типа АЛП подтверждается следующими показателями: обработка одной из деталей включает 25 операций с машинным временем 4 ч 13 мин, составляющим 86,7 % общей трудоемкости, а обработка другой детали - 46 операций с машинным временем 8 ч 35 мин (75,1 % общей трудоемкости).

Цехи и участки ГПС на основе группового производства и характеристики обрабатываемых деталей приведены в табл. 4.4.4.

## 4.4.3. Основные технико-экономические показатели ГПС АЛП-3-1 и АЛП-3-2

Показатель	Станки		АЛП-3-1 (АЛП-3-2)
	Универсальные	С ЧПУ и многоцелевые	
Число станков	70	16	7
Коэффициент сменности использования оборудования	1,3	1,6	1,9 (возможно 3)
Коэффициент загрузки станков	0,4	0,6	0,9
Производственный цикл обработки деталей, дни	45	9	4
Цикл подготовки производства к выпуску новых деталей, мес.	15	9	6
Численность производственного и обслуживающего персонала:			
рабочие-станочники, операторы	90	26	4
сменные и старшие мастера	7	2	2
контролеры и контрольные мастера	10	4	4
наладчики оборудования и систем ЧПУ	—	6	4
операторы по подготовке оснастки, загрузке и разгрузке	—	2	6
транспортные рабочие и распределители работ	8	4	—
инженеры по вычислительной технике	—	—	8
программисты	—	6	6
Всего работающих	115	50	34

## 4.4.3. ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

В условиях многономенклатурного, мелкосерийного производства возникают различные временные циклы выполнения, формирующие недетерминированный входной поток полуфабрикатов. Для обеспечения загрузки оборудования в условиях автоматического непрерывно-поточного дискретного режима работы необходимо оптимизировать запуск заготовок. На автоматический склад непрерывно поступающие подлежащие обработке заготовки. Как только освобождается ГМП от обработанных полуфабрикатов или деталей, появляется возможность встраивания этого модуля или комплекса в производственный процесс текущего состояния цеха, участка, линии. Согласно выработанному плану-графику оперативным календарным планированием заготовка, имеющая приоритет запуска, или очередная по графику заготовка, распознается на складе.

По командам, поступившим из системы подготовки управляющих программ, автоштабелер склада захватывает заготовки или полу-

фабрикаты и выдает их транспортной системе. Одновременно распознается групповая оснастка и инструмент, которые также выдаются своей транспортной системой, перемещающей их к многоцелевому станку модуля или РТК. Загрузочно-разгрузочное устройство смены оснастки или (и) инструмента осуществляет съем ранее установленного сменного спутника, поворот стола со спутниками на 180° и установку поступившего очередного сменного спутника на оборудование. Комплект заготовок или полуфабрикатов одновременно поступает на загрузочное устройство или поворотный стол в позицию загрузки ПР оборудования.

Если в какой-то момент времени появится возможность для запуска на оборудование заготовок или полуфабрикатов нескольких наименований, то минимизируется функция потерь времени (простоев). При минимизации определяется порядок запуска. Заготовки или полуфабрикаты имеют свои технологические маршруты и операции. Работа группового производства в автоматическом режиме осуществляется при следующих условиях:

## 4.4.4. Гибкие производственные системы

Тип ГПС механообработки	Деталь			Объем партии, шт.	Модели оборудования и их число
	Наименование	Габаритные размеры, мм, не более	Масса, кг		
1	2	3	4	5	6
Корпусных деталей (АСК-00)	Корпусные детали токарных станков	От 270×120×230 до 387×350×247	От 17 до 42	150	2204ВМ1Ф4 — 2, 2254ВМ1Ф4 — 2, АТСС-1000 — 1, тележка 1000 — 1, накопитель вертикальный — 1, СМ-4 — 1, «Электроника-60» — 2
Корпусных деталей (АСК-10)	Столы, рычаги, ползуны, держатели станков	750×600×550	До 300	30-50	МА6907ПМФ4 — 6, 6606Ф2 — 1, ВЕ-111А — 1, ВЕ-140К — 1, АТСС-500 — 1, М-6000 — 1, ДП — 1
Корпусных деталей (АСК-11)	Коробки, корпуса редукторов	630×630×630	До 300	5-50	ГФ1880 — 2, «Гамма-8 ВН» — 1, АТСС-500 — 1, М-6000 — 1, ДП — 1
Корпусных плоских и профильных деталей (АСК-20Т, Талка-500)	Кронштейны, плиты, призмы	800×800×630	До 500	3-50	ВИР 500ПМФ4 — 4, ВИР 800ПМ1Ф4 — 1, кран — 8, АТСС-500 ПЖА-119М — 1, АТСС-500 на 1500 кг — 1, склад элеваторный — 5, СМ-2 — 3, бюро УП — 1
Плоских и корпусных деталей (АСК-20)	Столы, корпусные детали, фланцы, звездочки	550×450×400	До 11	270	ИР500ПМ1Ф4 — 4, моечная машина — 1, ШБМ-50 — 3, БВ-2027 — 1, АТСС-1000 — 1, кран мостовой (5 т) — 1, СМ-1420 — 1, ДП — 1
Корпусных деталей (АСК-30-1)	Станины, столы, стойки	3285×1750×1080	До 5000	23	66К25МФ4-02 — 1, ЛР 353Ф2 — 1, УФ0856 — 1, ЛР356К (КИМ) — 1, АТСС-5000 — 1, УФ0857-5000 — 1, СМ-1 — 1
Корпусных деталей (АСК-30-2, АСК-30-3)	Корпуса передней бабки, каретки, салазки, основания	3200×3200×1400	До 10 000	4-6	УФ5660 — 2, ЛР2Д650МФ-4 — 2, АТСС-10000 — 1, АСК-30.2.100 (20 т) — 1, мостовой кран (20 т) — 1, СМ-1406 — 1, ДП — 1
Корпусных деталей гидропрессов (ГАУ)	Корпуса гидроблоков, рычаги	400×225×220	До 80	40-90	ИР500МФ4 — 6, УМ160Ф2 — 1, АТСС-500 — 1, Б6-56 — 1, СМ-1 — 1
Плоских и корпусных деталей гидроблоков (ГАУ)	Корпуса гидроблоков, прессов; фланцы	270×105×88	До 7	70-460	С500/04 (ГДР) — 1, УМ160Ф2 — 1, АТСС-500 — 1, Б6-56-500 — 1, СМ-1 — 1

1	2	3	4	5	6
Плоских и корпусных деталей приборостроения (ГАУ)	Плоские, призматические детали	500×500×500	До 40	10-22	6906ВМФ2 — 3, «МАЦАК-10» (Япония) — 1, ФР-5А (Япония) — 2, АТСС-150 — 1, СМ-4 — 1, «Электроника-60» — 1
Корпусных деталей автомобилестроения	Картеры, корпуса, крышки	800×800×800	До 80	500	ЗСВ-400 (ГДР) — 12, ФСВ-800 (ГДР) — 14, ФСВК3900 (ГДР) — 13, АТСС-1000 — 1, УВК КРС.4201 (ГДР) — 1
Корпусных деталей и тел вращения приборостроения	Фланцы, конусы, втулки, валы	94×80×80	До 0,5	375	ЛФ260МФ3 — 2, 16К20ФЗС18 — 2, ТУР-10К — 4, АТСС-К-1899 (50 кг) — 1, «Электроника-60» (15ВУМГ-25-28) — 1
Корпусных деталей тракторостроения	Картеры, тележки, редукторы	800×600×700	До 100	240	2206ВМ1Ф4 — 2, линия приема и выдачи — 2, линия тары — 1, линия спутников — 1, перегрузчики — 4, склад (500 кг) — 1, пульт диспетчера — 1, СМ-1 — 1
Тел вращения (АСВ-21)	Валы, фланцы, крышки	Диаметр до 250, длина 750	8	30	ИМ-1 — 1, МА2235МФ4 — 3; 2725МФ3 — 1, МР-021Ф4-1, транспортер — 1, ВЕ141 — 1, АТСС-500 — 1, УВК-М-600 — 1
Тел вращения (АСВ-22)	Валы, фланцы, крышки	Диаметр до 250, длина 750	8	30	МА2235МФ4 — 3, 1725МФ3 — 9, АТСС-500 — 1, секция уборки стружки — 1, УВКМ-6000 — 2
Тел вращения (АСВ-25)	Валы, фланцы	Диаметр до 250, длина 1000	15	30	ТКХ (ГДР) — 5, ТЦС32N1 — 9, ТАХ (ГДР) — 1, АТСС-500 — 1, СМ-1 — 1
Тел вращения и корпусных деталей (АСВ-201)	Валы, фланцы, корпусные детали	Диаметр до 500, длина 500 500×500×400	150	25—100	1П756ДФ4 — 2, МА1П420ПФ30 — 2, ИР500МФ4 — 2, ГФ2171Ф2 — 2, 2Р135Ф2М1 — 2, ТМ01 — 2, 1600Ф3 — 2, МА85-1 — 1, ШБМ-100 — 1, АТСС-500 — 1, СМ-1406 — 1
Тел вращения и щитов подшипника (АСВ-26)	Фланцы, кольца, щиты подшипников	Диаметр 570, длина 345	100	15—55	2206ВМФ4 — 2, 1П756ДФ3 — 10, ПР-30Р-ЗИМ — 12, АТСС-25 — 1, инструментальная система — 1, стружкоуборочная система — 1, СМ-1420 — 2
Тел вращения (АСВР-01, АСВР-02)	Ступенчатые валы электродвигателей	Диаметр 400, длина 1400	160	50	МР-179-1, 1Б732Ф3 — 3, УМ16028101 — 1, АТСС-250 — 1, ДВК-2М — 4
Тел вращения (ГАЦ)	Рычаги, фланцы, крышки Фасонные планки	Диаметр 150, длина 300 150×200×300	16	8—100	1720Ф3 — 22, 6Т13Ф4 — 7, 2Р135Ф2 — 2, ТОЦ-180 — 2, ЛТСС-250 — 1, ШБМ-150 — 2, УВК — 2

1	2	3	4	5	6
Тел вращения (АТК-15)	Валы, шестерни, втулки, оправки, гильзы	Диаметр 400, длина 1500	100	20—100	16616Т1 — 2, 16К20Т1 — 12, 16Б30Ф3 — 3, 6Т13МФ4 — 2, 6Р81ГМФ3 — 2, 2Р135Ф2 — 2, 2Г125Ф2 — 1, 2532Ф2 — 1, ДГ8-400NC — 9, 3М1516Ф2 — 4, 3Б722Ф2 — 2, ВС3-11411 — 2, ММ-4—1
Тел вращения аппаратуры (ГАУ)	Валы, фланцы, втулки	Диаметр 50, длина 30	0,2	400	АТСС-500 — 1, СМ-4 — 2, 1И611ПМФ3 — 6, ТПК-125ВМ-1М3 — 2, РФ-204М — 7, элеваторный склад — 1, ЭВМ «Электроника-В» — 1
Тел вращения (тяжелого машиностроения)	Фланцы, втулки, валы, оси, гильзы	Диаметр 400, длина 719	340	140	ДГ8-400NC — 12, РТ21003 — 2, ОЦС500/03NC — 2, 6Р13Ф3 — 2, 2М55Ф2 — 2, 2Н125 — 2, 3К-229 — 1, 3Б161 — 2, 3Ш-184 — 1, 3Б722 — 1, АТСС-500 — 1, М6000 — 1
Тел вращения (ПР)	Валы, кольца, гильзы	Диаметр 320, длина 1500	150	65	ССУ1000N — 1, РТК СОАНУК — 21, 1720ПФ30 — 6, 1740РФ3 — 2, ИР800ПМКФ4-09 — 5, УР-5А — 2, УБК-111400 «ПАНАФАКОМ» ВИР
	Корпусные детали, планки	387×1742×25			500ПМФ4-09 — 6, АТСС-250 — 1
Тел вращения ленточных конвейеров	Ролики, втулки, оси, кольца	Диаметр 130, длина 1400	20	300—2000	Восьмишпиндельный, агрегатный модуль — 4, АБ-1936-40 — 5, 2706 — 3, 2712 — 2, ВЕ-141 — 51 АТСС-1000 — 1, М-100 — 5, УВК СМ-420- — 1
Тел вращения и плоских деталей электротехнического производства	Зубчатые колеса, втулки, фланцы	Диаметр 63, длина 200	0,2	50—200	ТПК-125ВРМ — 2, 16Б16Г1 — 2, МС12-250М — 2, ПР ДЕМ.8.3730.120 — 5, АТСС-50 — 2, УВК СМ-1403.04 — 1, СМ-1403.05 — 1
	Платы, пластины	63×200×10			
Тел вращения для экскаваторов	Кулачки, валы	Диаметр 130, длина 1100	62	24—430	1713 — 2, 16К20Ф3С18 — 3, 1Б732Ф3 — 4, ТОН5 — 1, 6Р83Г — 1, 5К32 — 6, 5А352П — 3, 5350 — 3, ЛФ-388 — 1, 6А12Р — 1, КЛ-171 — 2, 3М151Ф2 — 3, 3451Б — 1, ОС-546 — 1, 2М55 — 2, КК-2109 — 1, ПР РБ-232Т — 4, ШБМ-450 — 11, ПР У-60М — 40, транспортный ПР — 2, АТСС-1000 — 2, склад заготовок — 1, инструментальное отделение — 1, термическое отделение — 1, УВК СМ-1420.06—1, «Электроника-60М» — 4
	Штоки, тяги, цапфы	150×1100×130			

групповое производство функционирует как полностью доступная система массового обслуживания с ожиданием материала, заготовок или полуфабрикатов на входе;

транспортная система группового производства организуется как полностью доступная система массового обслуживания с ограниченным числом транспортных средств (один, два ПР) и числа модулей или комплексов;

оборудование, входящее в групповое производство, ГМП или РТК, является автономным, асинхронно-функционирующим комплексом;

управление групповым производством осуществляется последовательным решением в реальном масштабе времени задач по оптимизации и упорядочению недетерминированного входного потока материала, заготовок, полуфабрикатов и обработкой их по заданным программам (циклам).

Введем обозначения:  $\bar{F}$  - математическое ожидание длительностей производственного цикла - прохождение обработки;  $\bar{W}$  - математическое ожидание длительности запуска в обработку;  $\bar{P}$  - математическое ожидание обработки заготовок, полуфабрикатов в ГПП или РТК.

Модель асинхронной системы представляет собой последовательность преобразователей упорядоченного недетерминированного входного потока заготовок и детерминированных циклов обработки. Для каждой заготовки задается своя длительность

$$\bar{F} = \bar{W} + \bar{P}.$$

Групповое производство может быть представлено сетью общего вида и состоит из постоянного числа узлов (ГМП или РТК) и ребер между ними, образующих технологические маршруты. Маршруты движения заготовок осуществляются транспортными средствами и могут пересекаться.

Для изготовления детали  $a_i$  заданы:  $\lambda$  - интенсивность поступления ( $i = 1, 2, \dots, N_i$ );  $\mu$  - интенсивность обслуживания;  $T_i$  - длительность всех технологических операций.

$$T_i = \sum_{j=1}^{k_j} \tau_{ij},$$

где  $k_j$  - число технологических операций  $i$ -го технологического процесса;  $\tau_{ij}$  - время выполнения  $j$ -й операции на  $i$ -м оборудовании.

Систему рассматривают как пуассоновско-экспоненциальную, где  $\lambda = \lambda(T)$ ,  $\mu = \mu(N)$ . Здесь  $T$  - время цикла;  $N$  - число деталей, находящихся в системе.

Допустим, что  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$  - множество деталей, запланированных для изготовления. Тогда для обработки каждой  $a_i$  детали требуется применение множества  $\beta_j \in \beta$  технологических операций. Это множество операций  $\beta = \bigcup \beta_j = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$

может быть отображено точками  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}$  так, что каждому технологическому маршруту  $M_i = \langle b_{ia}, \dots, b_{ik} \rangle$  будет соответствовать частный граф  $G_i = (J_i, U_i)$ ,

где  $J = \{r_a, \dots, r_k\}$ ,  $U_i = \{l_a, \dots, l_k\}$ . Полное множество технологических маршрутов  $M^* = \bigcup_i M_i$  образуют полный граф  $G^* = \bigcup_i G_i$ . Соответствующее ему множество вершин  $J^* = \bigcup_i J_i$  является полным множеством ГПП или РТК, где  $J^* = R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ .

Множество ребер  $U^* = \bigcup_i U_i$  определяют все возможные маршруты обработки деталей.

Минимизация длин (времени) переходов множества  $U^*$  графа  $G^*$  при заданном множестве вершин  $J^*$  (станков) позволит решить оптимальный маршрут и сформировать для него набор деталей. Любая начальная технологическая операция должна быть закончена, не может быть прервана и технологические операции должны выполняться в порядке следования их по маршруту (номеров кодов). Система не предусматривает межоперационные заделы. Эти условия можно выразить следующим образом:

Множество ребер  $U^* = \bigcup_i U_i$  определяют все возможные маршруты обработки деталей.

Минимизация длин (времени) переходов множества  $U^*$  графа  $G^*$  при заданном множестве вершин  $J^*$  (станков) позволит решить оптимальный маршрут и сформировать для него набор деталей. Любая начальная технологическая операция должна быть закончена, не может быть прервана и технологические операции должны выполняться в порядке следования их по маршруту (номеров кодов). Система не предусматривает межоперационные заделы. Эти условия можно выразить следующим образом:

$$\bar{t}_{ij} = t_{ij} + \tau_{ij}; \quad \bar{t}_{ij} \leq t_{ij} + 1;$$

для любого из векторов

$$\langle \bar{t}_{ij}, t_{ij} \rangle, \quad j = 1, 2, \dots, M_i.$$

Запущенная в изготовление деталь проходит весь свой технологический процесс без межоперационного ожидания; это условие можно записать в виде

$$\begin{aligned} & (\bar{t}_{ia} - t_{ia}) + (\bar{t}_{ib} - t_{ib}) + \dots + (\bar{t}_{ik} - t_{ik}) = \\ & = \sum_{i=1}^{k_i} \tau_{ij} = T_i. \end{aligned}$$

Таким образом, формирование (группирование) оптимального набора запускаемых в обработку деталей на каждом шаге управления осуществляется из наличия заготовок на складе. При этом каждая деталь в кассете, в магазине, на спутнике и т.п. является источником вызова и не зависит от других деталей. Число вызовов в групповое производство определяется текущим состоянием, т.е. множеством  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  и количеством невыполненных заявок транспортных операций. Интенсивность обслуживания

$$\mu = \frac{1}{P_i} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{k_i} \tau_{ij} + k_i(\bar{t} + \bar{w})},$$

где  $P_i$  - длительность обслуживания  $i$ -й заявки для выполнения работы;  $k_i$  - число технологических операций  $i$ -й работы;  $\tau_{ij}$  - длительность обработки  $j$ -й операции детали в технологическом процессе;  $\bar{t}$  - среднее время ожидания выполнения одной транспортной операции;  $\bar{w}$  - среднее время ожидания.

Используем теорию разбиения (теорию Джексона)  $\sum_{j=1}^{k_i} \tau_{ij}$ , показывающую, что для

каждого технологического процесса величина  $t$  жестко задана (получена в САПР ТП).

Величина  $\bar{t}$  в данной компоновке определяется графом  $G^*$  - длиной его дуг с взаимным расположением вершин и зависит только от числа одновременно обрабатываемых деталей.

По концепции групповое производство является многоканальной системой массового обслуживания (СМО), причем  $N$  подсистем (маршрут заготовок) функционируют как независимые. На основе применения метода исследования многоканальных СМО, базирующихся на преобразовании прямых дифференциально-разностных уравнений Колмогорова, теоремы разбиения графа  $G^*$  общего вида (теорема Джексона) и математического аппарата линейных стохастических сетей, получим выражение для средней длительности прохождения комплексных (групповых) деталей:

$$\bar{F} = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^N}{(N-1)! (N_\mu - \lambda)^2} \dots$$

$$\dots \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \frac{1}{n!} + \left(\frac{1}{\mu}\right)^N \frac{1}{N! \left(1 - \frac{\lambda}{N\mu}\right)} \right] + \frac{1}{\mu},$$

где  $N$  - число потоков технологических процессов всех деталей, представленных линейной стохастической сетью.

По известным  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $N$  определяется длительность прохождения деталей. Для планирования и управления режимом работ группового производства следует применить формулу Литтля из теории расписаний

$$\bar{F} = \bar{n}' / \lambda,$$

где  $\bar{n}'$  - среднее число заявок-запросов;  $\bar{n}' = \bar{n}_0 + \bar{n}$ ;  $\bar{n}_0$  - среднее число ожидающих обслуживания заявок;  $\bar{n}$  - среднее число заявок на обслуживание, которое должно быть равно или меньше максимально возможного числа обрабатываемых деталей.

Обозначив отношение средней интенсивности заявок к средней интенсивности их обслуживания через  $\rho$  с учетом среднего числа заявок, поступающих в групповое производство, получим

$$\rho = \frac{\lambda}{\bar{n}\mu}.$$

Приравняем в выражениях  $\rho$  и значения  $\lambda/\mu = \frac{\bar{T}_0}{T_u}$  с подстановкой в  $F$  и запишем

$$\bar{W} = \bar{P} \left( \frac{\bar{n}_0 + \bar{n}}{\rho \bar{n}} - 1 \right),$$

$$\bar{T}_0 = (\bar{T}_B + \bar{T}_T + \bar{T}_{OЖ}).$$

Подставляя в полученную формулу  $\bar{W}$  значение  $P$  и  $\mu$ , представляют ее в виде

$$\bar{W} = \left( \frac{\bar{n}_0 + \bar{n}}{\rho \bar{n}} - 1 \right) (\bar{T}_B + \bar{T}_T + \bar{T}_{OЖ});$$

$$\bar{F} = \left( \frac{\bar{n}_0 + \bar{n}}{\rho \bar{n}} \right) (\bar{T}_B + \bar{T}_T + \bar{T}_{OЖ}),$$

где  $\bar{T}_B$  - среднее математическое ожидание длительностей выполнения имеющегося набора технологических операций, определяе-

мое множество  $A^* = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$  и соответствующим ему множеством веса  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ;  $\bar{T}_T$  - среднее математическое ожидание суммы длительностей транспортных операций для одного технологического процесса (заявки);  $\bar{T}_{Oж}$  - среднее математическое ожидание суммы длительностей ожидания деталями транспортных операций в процессе их обработки.  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ .

Полученные выражения исследуем для трех режимов загрузки  $\lambda \ll \bar{\lambda}$ ;  $\lambda = \bar{\lambda}$ ;  $\lambda \gg \bar{\lambda}$ , при этом  $\bar{W} = \bar{W}(n_o)$ ;  $\bar{W} = \frac{\bar{p} \cdot n}{n^*}$ ;  $\bar{W} = \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\mu}$ .

Оптимальная организация предполагает обеспечение загрузки ГПМ (РТК) транспортной системой и управление ими в реальном масштабе времени. Общим параметром ГПМ (РТК), транспортных средств, складов, систем управления ЧПУ, микроЭВМ, мини-ЭВМ является их пропускная способность. Загрузка ГПМ (РТК) будет обеспечена при выполнении неравенства  $n \leq n^* \leq n_T \leq n_c \leq n_y$ , где  $n_T, n_c$  - пропускные способности соответственно транспортных средств и складов;  $n$  - число одновременно обрабатываемых деталей;  $n^*$  - максимальная пропускная способность имеющегося набора ГПМ;  $n_y$  - число каналов управления параллельной обработки систем ЧПУ.

При заданном наборе ГПМ наиболее критичным является  $n_T$ , поэтому задачу сводят для заданных  $\lambda, \mu, \bar{w}$  к нахождению одновременно обслуживаемых заявок  $n$ :

$$\lambda = \frac{\bar{n}}{F} = \frac{\bar{n}}{\tau + t + \bar{w}},$$

где  $\bar{\tau} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k A_i \tau_{ij}$ ;  $k = \sum_{i=1}^N p_i k \rightarrow \sum_{i=1}^N p_i \approx 1$ .

При этом интенсивность обслуживания ГПМ транспортной системой определяем соотношением  $\mu = 1/\bar{t}$ ; загрузку систем обслуживания, организованной как пуассоно-экспоненциальная СМО типа  $M|M|1$  (FGFS), находят по расчетной формуле

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\bar{n} \bar{t}}{\tau + t + \bar{w}}.$$

Решив уравнения  $t_j$  и  $T_i$  относительно  $\bar{n}$ , получим

$$\bar{n} = \rho \left( \frac{\tau + \bar{w}}{t} + 1 \right).$$

Так как по условию  $\rho < 1$ , выразим  $\bar{w}$  через параметры системы:  $\bar{w} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}$ , откуда

$$\rho = \frac{\bar{w}}{\bar{t}(1 + \bar{w}/\bar{t})} :$$

$$\bar{n}_T = \frac{\bar{w}}{t} = \frac{\bar{\tau}}{\bar{t} + \bar{w}} + 1.$$

Величины  $\bar{t}, \bar{\tau}, \bar{w}$  - соответствующие математические ожидания длительностей транспортных, технологических операций, ожидания обслуживания заявок в складе на транспортирование, являются исходными при разработке многономенклатурных подразделений.

При оптимальном запуске и управлении на входе необходимо иметь в виду: 1) задачу определения множества допустимых управлений; 2) задачу определения наилучшего на каждом шаге управления приоритетного запуска, минимизирующего целевую функцию.

Для решения задачи определения множества допустимых управлений с заданным критерием оптимальности загрузки всеми ГПМ сформулированы условия из теории расписаний. Критерием оценки системы является среднее время ожидания в очереди  $\bar{W}$ ; параметры рассматриваемых расписаний, определяемые реальными производственными условиями, в том числе: число одновременно обрабатываемых деталей; число узловых "узких" мест, требующих учета времени занятости ГПМ (РТК), отсчет времени по дискретной шкале с учетом фонда времени работы  $\bar{t} = g\delta$  (величину  $\delta$  выбирают из условия  $k\bar{w} \leq \delta \leq \tau_{\min}$ ). Групповое производство может иметь три установившихся режима работы при совмещении статической и динамической загрузки с чередованием коротких и длительных по времени операций, т.е.  $\tau \geq \delta$  и  $\tau \leq \delta$ , а также короткие операции можно выполнять многократно последовательно  $\sum_{j=1}^l \tau_j \leq \delta$ .

Время, отведенное для решения задачи запуска очередных деталей, ограничено интервалом времени между последовательными

управлениями (запуском новых деталей), равно величине  $\delta$ . Для этого составляют расписание запуска деталей с использованием схем Ганта, затем применяют эвристические корректирующие алгоритмы, которые позволяют получить наилучший результат, обеспечивающий загрузку.

Множество  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  определяет текущее состояние одновременно обрабатываемых деталей  $|A| = n$ . Множество  $D = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  - число деталей на складе, ожидающих запуска в обработку  $|D| = n_0$ .

Каждая группа деталей  $a_i$  требует для своего обслуживания множества ГПМ (РТК)  $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}\}$ ,  $R_i \subset R$ .

Состояние группового производства изменяется при технологическом процессе обработки деталей и при запуске в обработку новых деталей. Это состояние системы может быть выражено соотношением

$$A_{g+1} = [A_g, U_g],$$

где  $A_g$  - исходное состояние системы;  $U_g$  - управляющее воздействие на  $g$ -м шаге (запуск в обработку детали);

$$U_g = \begin{cases} 1, & \text{если } D'(g) \neq 0, \\ 0, & \text{если } D'(g) = 0, \end{cases}$$

где  $D'(g)$  - множество допустимых состояний. При условии  $|D(g)| > 1$  стоит задача выбора управления, минимизирующего целевую функцию.

Составляется график прохождения детали  $a_i$  кортежем векторов  $\langle \bar{t}_{ij}, \bar{t}_{ij} \rangle$  в координатах  $R \times t$ , где  $R$  - набор ГПМ (РТК);  $t$  - текущее время.

Если задать  $\bar{t}_{ij} = 0$  при запуске в обработку детали  $i$ -го технологического процесса, то в динамическую модель вводится статический график в виде совмещенных матриц времени подхода  $T_0$  и времен завершения операций  $Q_0$ :

$$a_i = \left\{ \left\| \begin{matrix} T_0 = \{t_1, t_2, \dots, t_n\} \\ Q_0 = \{\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_n\} \end{matrix} \right\|_m \right\} = \left\{ \begin{matrix} T_0 = \left\| \begin{matrix} (t) \\ (t) \end{matrix} \right\|_{km} \\ Q_0 = \left\| \begin{matrix} (\bar{t}) \\ (\bar{t}) \end{matrix} \right\|_{km} \end{matrix} \right\};$$

$$t_{km} > 0; \bar{t}_{km} > 0.$$

Для удобства объединяются члены матрицы  $T_0, Q_0$  в один вектор-столбец, имеющих сдвоенные члены, представляющие множество равной мощности

$$a_i = \left\| \begin{matrix} (T_0) \\ (Q_0) \end{matrix} \right\|_m.$$

Текущее состояние группового производства может быть зафиксировано в виде матрицы

$$A_g = \left\| \begin{matrix} (T_0) \\ (Q_0) \end{matrix} \right\|_{mn} = \left\| \begin{matrix} (T_0) \\ (Q_0) \end{matrix} \right\|_{mn} - \|g(E')\|_{mn};$$

с выполнением условий  $|A_g| < n^*$  и  $D'_g \neq 0$ .

$E'$  - матрица размерностью  $m \times n$ , все члены которой равны 1. Каждой детали, ожидающей запуска  $d'_i \in D'_g$ , соответствует свой вектор-

столбец  $d'_i = \left\| \begin{matrix} (T_0) \\ (Q_0) \end{matrix} \right\|_m$ , в котором необходимо

осуществить проверку на отсутствие интерференции на любом шаге в виде двух взаимно исключающих неравенств относительно  $k, m, n$ :

$$\begin{cases} \bar{t} \leq \bar{t}' \\ t' \leq \bar{t} \end{cases}$$

Выражение  $A_g$  представляет собой математическую динамическую модель, в которой

$\sum_{j=1}^{k_i} w_j \leq \delta$ ; где  $w_j$  - время ожидания выполнения

$j$ -й транспортной операции  $i$ -го технологического процесса. Множество допустимых управлений на шаге  $g$  определяется из условия  $D'_g \cap A_g = \emptyset$ , где  $D'_g$  - множество ожидающих деталей, запуск которых допустим.

Наилучшее управление, минимизирующее значение целевой функции, осуществляется на каждом шаге управления с помощью приоритета. Критерий приоритета заключается в обеспечении первоочередной загрузки узких мест, так как при последующих состояниях очереди целесообразно занять узкое место, чтобы скорее его освободить для поступающих на последующих шагах управления заявок.

Для задания параметров моделей группового производства формализуем СМО в пределах модернизированной классификации Кендэля:

$$\bar{M}_N | \bar{M}_m | J | HFWDVS,$$

где  $M_N$  - множество маршрутов для  $N$  потоков;  $M_m$  - множество маршрутов для  $m$  деталей;  $J$  - множество вершин графов;  $F$  - математическое ожидание длительности производственного цикла;  $W$  - математическое ожидание длительности запуска;  $D$  - число деталей на складе;  $S$  - множество заявок;  $V$  - скорость перемещения.

Массив заявок на входе (складе) представлен матрицей  $A^* A^* = \left\| (\tau_0) N m \right\|$ . Для определения узких мест из набора  $R$  подставим в соответствии с матрицей  $A^*$  вектор-столбец  $\|P_m\|$ , члены которого есть "веса" ГПМ (РТК), определяющиеся из соотношения

$$P_r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r).$$

Наибольшее значение  $P_r$  определит ГПМ (РТК)  $r_0$ . При этом приоритетный индекс заявки  $a_i$  ("вес" заявки) определится из соотношения

$$P_i = \sum_{r=1}^m P_r \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) = \sum_{r=1}^m \left\{ \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) \sum_{i=1}^N \tau_{ij}(r) \right) \right\}.$$

Множество "весов" заявок образуют вектор-строку  $P'_i = \left\| (P_i) N \right\|$ , являющуюся характерной

множества  $A^*$  при заданном множестве  $R$ . Для исключения задержки равноценного приоритета разработан динамический приоритет, учитывающий наличие поправок к "весу" заявки,

$$P'_i = P_i + g\Delta,$$

где  $\Delta$  - поправки к "весу" за один интервал дискретного времени

$$\Delta = \sum_{i=1}^N \tau_i \sum_{i=1}^N R_i / N^2.$$

Решают динамический приоритет последовательно. Имея в виду вектор-строку "весов" заявок  $P_i = \left\| (P_i) N \right\|$ , вносят поправку в

произведение констант  $\Delta = \sum_{i=1}^N \tau_i / \left( N \sum_{i=1}^N R_i \right)$ ,

определяющее среднее по всем заявкам время занятости ГПМ и среднее их число, требуемое для обслуживания одной заявки. Составляют вектор-строку  $D_g$  номеров заявок текущего состояния очереди и соответствующую вектор-строку нахождения в очереди каждой из заявок множества  $D_g: Q = \left\| (g) n_0 \right\|$ . Для определения на шаге  $g$  из множества заявок приоритетной необходимо сформировать множество  $D'_g \subset D_g$ , вектор-строку  $Q_g = \left\| (g) S \right\|$ ;  $\left| D'_g \right| = S$ ;  $S \leq n$ ; определить для каждой  $d_i \in D'_g$  ее  $P' = P + g\Delta$ , затем выявить наибольший "вес"  $P'_i$  и выделить из множества  $D'_g$  заявку  $d'$ , соответствующую наибольшему "весу"  $P'_i$ . Затем определяют "вес" самого загруженного ГПМ.

$$r_0 \in \{r\}; P_{r_0} = \max \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r_0) \right\}.$$

Далее находят приоритетный индекс каждого ГПМ, как абсолютную величину разности "веса"  $r_0$  каждого ГПМ:

$$P_r = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r_0) \right|.$$

Приоритетный индекс каждой заявки

$$P'_i = \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) \{P'_r\} = \sum_{r=1}^m \left\{ \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r_0) \right] \right\}.$$

При решении равенства  $P'_i$ , в отличие от решения  $P_r$ , наибольший приоритет соответствует наименьшему приоритетному индексу.

В соответствии с выражением  $P_r$  в качестве относительного ситуационного приоритетного индекса на каждом шаге определяется "вес"

$$P_0 = \sum_{r=1}^m \left\{ \left( \sum_{i=1}^{N'} \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) \right) \sum_{j=1}^k \tau_{ij}(r) \right\}, \quad N' = n_0 + n.$$

Моделирование загрузки группового производства с запуском по правилу *FCFS* (первый пришел, первый обслужен) обеспечил снижение *W* на 14 ... 16 %.

Система управления запуском линии осуществлена на ЭВМ серии СМ, реализующей динамический график (процесс управления с ситуационным приоритетом) с моделированием текущего состояния ГПС, склада и периодически выдающей код и номер ячейки, приоритетной в данный момент времени.

#### 4.4.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Основной целью создания группового производства является повышение эффективности использования оборудования (загрузки и сменности) в условиях многономенклатурного производства на основе автоматизации производственных процессов и систем управления.

Групповое производство обеспечивает решение следующих задач:

- сокращение числа рабочих, особенно на тяжелых, монотонных, утомительных операциях, в том числе в отдельных случаях их полное высвобождение;

- автоматизация и интенсификация оборудования, выполняющего основные и вспомогательные операции, в том числе функции управления;

- переналадка оборудования и автоматическая смена штампов при изменении номенклатуры выпускаемых деталей;

- специализация линий, участков и цехов по детально-замкнутому типу на основе групповой технологии;

- повышение производительности труда, увеличение объема выпускаемой продукции, снижение себестоимости, высвобождение производственных площадей, улучшение качества.

За базовый вариант при сравнении с ГПМ принимают показатели существующего участка, линии, цеха, состоящего из универсальных прессов, обслуживаемых штамповщиками и бригадой наладчиков штампов при условии обработки одних и тех же деталей и с тем же объемом производства.

Источником эффективности является повышение производительности оборудования по штучному времени за счет сокращения вспомогательного времени, затрачиваемого на установку и съем заготовок (изделий), инструмента (сменных блоков), а также за счет интенсификации использования оборудова-

ния (коэффициент загрузки расчетный - до 0,9).

Расчет производительности нового и базового вариантов проводится на примере одной и той же комплексной детали - представителя группы, обрабатываемой на оборудовании. Штучное время в базовом варианте устанавливают на основе норм обработки по действующему технологическому процессу и оборудованию, а в новом варианте - по данным циклограммы работы ГПМ или РТК. Основой расчета является разность приведенных затрат с получением прибыли от выпуска дополнительной продукции высвобожденными рабочими, и дополнительного эффекта, полученного за счет сокращения сроков технологической подготовки производства.

Годовой экономический эффект определяется по методике экономической оценки внедрения ГПС:

$$\mathcal{E}_r = \left[ (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2) - \Delta\Pi \right] + \mathcal{E}_d;$$

или

$$\mathcal{E}_r = \left[ (C_1 - C_2) - E_n K_d + \Delta\Pi \right] + \mathcal{E}_d;$$

$$\Delta\Pi = \Pi_r P_B;$$

$$\mathcal{E}_r = 0,15 \left[ (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2) + \Delta\Pi P_B \right] \times (T_1 - T_2).$$

Здесь  $\mathcal{E}_r$  - суммарный годовой экономический эффект от использования группового производства и сокращения цикла "исследования-разработка-производство", руб.;  $C_1, C_2$  - себестоимость годового выпуска продукции, соответственно базового и нового вариантов при использовании группового производства, руб.;  $E_n$  - нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, равный 0,15;  $K_1$  - капитальные вложения по базовому варианту в расчете на годовой объем продукции в расчетном году, руб.;  $K_2$  - капитальные вложения в условиях группового производства, обеспечивающие производство годового объема продукции, руб.;  $\Delta\Pi$  - дополнительная прибыль, полученная от производства продукции за расчетный год высвобожденными рабочими, руб.;  $\mathcal{E}_d$  - дополнительный годовой экономический эффект, получаемый за счет сокращения сроков подготовки производства, руб.;  $\Pi_r$  - средняя годовая прибыль предприятия, приходящаяся на одного рабочего, руб.;  $P_B$  - число рабочих, высвобожденных в результате внедрения группового производства и участвующих в создании дополнительной прибыли, чел.;  $T_1, T_2$  - срок технологической подготовки производства при базовом и новом вариантах, годы.

## Глава 4.5

### ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

#### 4.5.1. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ, КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРА ГПС

ГПС - совокупность в различных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов (РТК), гибких производственных модулей (ГПМ), отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного периода времени.

Основной концепцией ГПС является сочетание высокой производительности с малыми размерами партий изделий и коротким периодом освоения их производства.

По сфере применения ГПС занимает промежуточное положение между универсальными станками, станками с ЧПУ и автоматическими линиями (АЛ) с жесткой связью. ГПС превосходят АЛ по диапазону номенклатуры выпускаемых изделий, однако уступают им по производительности. ГПС, уступая станкам с ЧПУ по диапазону номенклатуры, обладают большей производительностью. ГПС, таким образом, обеспечивают интенсификацию выпуска мелко- и среднесерийной многономенклатурной продукции, придают производству характер крупносерийного и массового по производительности и использованию оборудования.

Организационно-технологической основой ГПС является групповой метод изготовления изделий, обеспечивающий реализацию характерных для крупносерийного и массового производства принципов организации производственных технологических процессов (ТП) в условиях мелко- и среднесерийного производства. Этот метод позволяет эффективно использовать универсальные средства автоматизации, групповую оснастку, комплекты режущих инструментов; сократить количество переналадок оборудования за счет укрупнения партий запуска.

ГПС наиболее распространены в механической обработке (71 %), в сварочном производстве (12 %), при сборке (5 %) и в остальных технологиях (12 %). Использование ГПС обеспечивает:

сокращение объемов незавершенного производства в 2 ... 2,5 раза;

длительности производственного цикла в 5 ... 6 раз;

повышение коэффициентов: загрузки оборудования до 0,8 ... 0,9; сменности до 2 ... 2,5;

сокращение технологического оборудования на 50 ... 75 %; обслуживающего персонала на 50 ... 60 %;

уменьшение периода освоения новых изделий на 50 ... 60 %;

снижение брака в 4 ... 5 раз.

Однако создание ГПС и их эксплуатация требует значительных капиталовложений, высокой надежности основного и вспомогательного оборудования.

В ГПС можно изменять: номенклатуру изготавливаемых изделий; объем производства (варьируют объем выпуска различных типов деталей); последовательность выполнения операций ТП; состав оборудования при отказе, так как предусмотрена его взаимозаменяемость; материал, из которого изготавливают изделие.

ГПС классифицируют по следующим признакам: организационному, комплексности изготовления изделий, виду обработки, разновидности изготавливаемых изделий, степени и уровню автоматизации.

По организационному признаку (структуре) ГПС подразделяют на следующие уровни: гибкий производственный модуль (ГПМ) - первый уровень; гибкая автоматизированная линия (ГАЛ) и гибкий автоматизированный участок (ГАУ) - второй уровень; гибкий автоматизированный цех (ГАЦ) - третий уровень; гибкий автоматизированный завод (ГАЗ) - четвертый (верхний) уровень. На рис. 4.5.1 показана организационная структура ГПС на уровне ГАЦ.

ГПМ - ГПС, состоящая из единицы технологического оборудования, оснащенная автоматизированным устройством программного управления (ПУ) и средствами автоматизации ТП, автономно функционирующая, осуществляющая многократные циклы и имеющая возможность встраиваться в систему более высокого уровня. Робототехнический комплекс (РТК) является частным случаем ГПМ при условии возможности его встраивания в систему более высокого уровня. ГПМ (РТК) является главной структурной единицей ГПС. Как правило, в ГПМ входят обрабатывающие центры (ОЦ) (многоцелевые станки); многооперационные станки (МС) с ЧПУ; накопители; магазины инструментов с манипуляторами для их замены; приспособления-спутники (палеты); устройства: загрузочно-разгрузочные, в том числе промышленные роботы (ПР), ориентирующие, замены оснастки, удаления отходов, управления, автоматизированного контроля, включая диагностирование, переналадку и т.д.

ГАЛ - ГПС, состоящая из нескольких ГПМ, объединенных между собой средствами межоперационного транспортирования и ав-

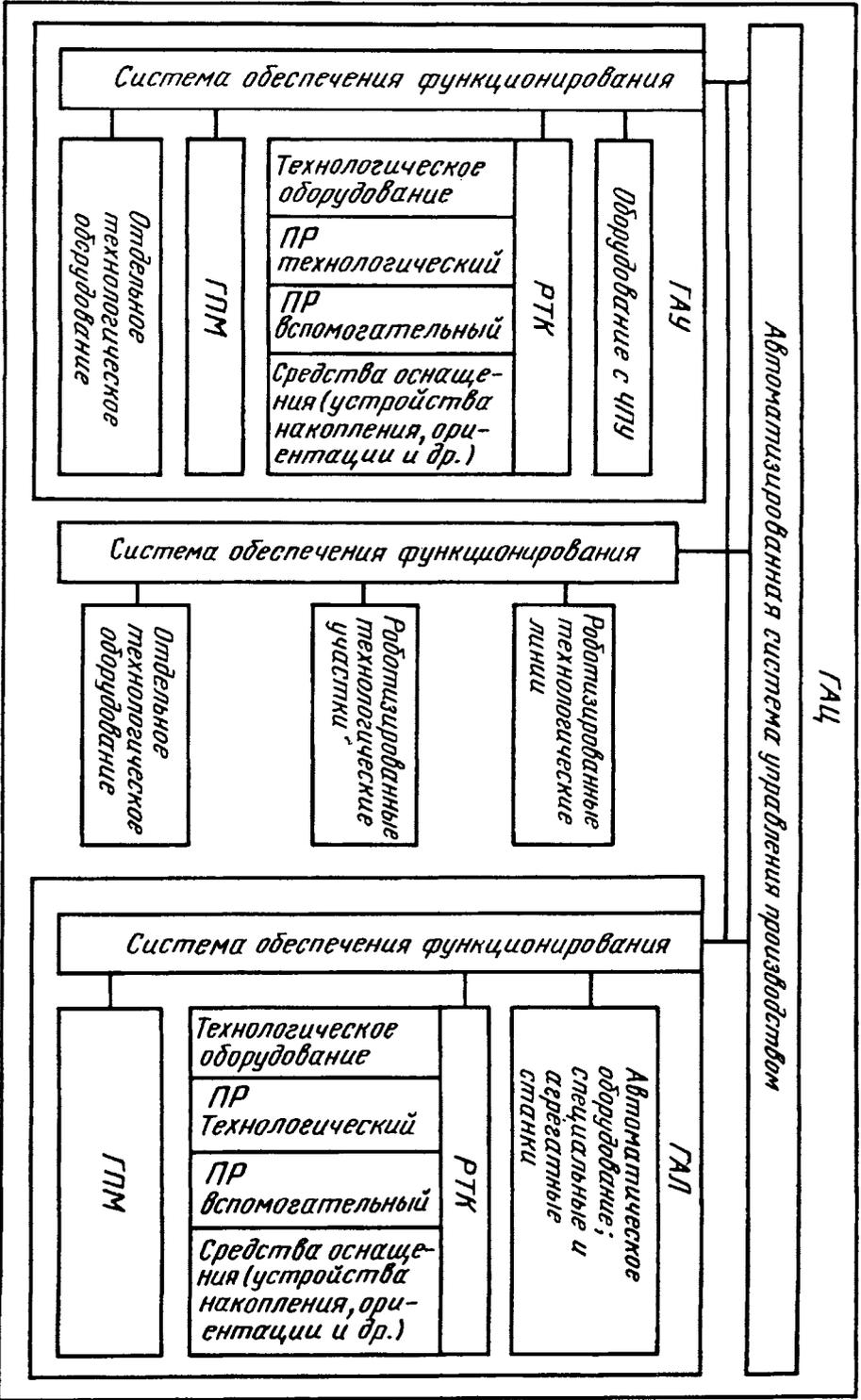


Рис. 4.5.1. Организационная структура ТПС

томатизированной системой управления, в которой технологическое оборудование расположено в принятой последовательности технологических операций. На ГАЛ можно изготавливать широкую номенклатуру деталей, близких по массогабаритным характеристикам. Транспортная система ГАЛ перемещает изготавливаемые изделия только по заранее определенным маршрутам. Гибкость производства обеспечивается за счет применения станков с ЧПУ, смены на последних отдельных агрегатов, узлов и многошпиндельных головок, поворота изготавливаемой детали на необходимый угол и др.

ГАУ – ГПС, состоящая из нескольких ГПМ, объединенных автоматизированной системой управления, в которой средства межоперационного транспортирования обеспечивают свободу адресации материальных потоков и, следовательно, изменения последовательности использования технологического оборудования.

В состав ГАЛ и ГАУ может дополнительно входить отдельно функционирующее технологическое оборудование, не связанное с остальной системой управления или общей транспортной системой. ГАУ служит для выполнения практически всех видов обработки (технологических операций) при изготовлении продукции машиностроения. Из операционных ГАУ комплектуются предметные и узловые (рис. 4.5.2).

Предметные ГАУ – системы машин, на которых полностью (комплексно) изготавливается (от заготовки до готового изделия) определенная группа изделий, например, втулок, валов, планок, корпусов и т.п. или две группы изделий и более (тела вращения и корпуса).

Узловые ГАУ – системы машин, продуктом производства которых являются комплекты деталей и узлы определенных типоразмеров. Комплекты изготавливаемых деталей дополняются со склада недостающими покупными деталями, а затем они ритмично поступают на автоматизированный участок сборки.

Операционные ГАУ входят в состав предметных, а последние - узловых.

В ГАУ могут иметься неавтоматизированные рабочие места, где выполняются отдельные ручные операции. Например, загрузка заготовок на приспособления-спутники и разгрузка с них выполняется вручную, а доставка спутников на станках и закрепление их в рабочей зоне - автоматически.

ГАЦ – ГПС, представляющая собой совокупность ГАЛ и (или) ГАУ, предназначена для выпуска изделий заданной номенклатуры

или выполнения какого-либо технологического передела.

ГАЗ – ГПС, представляющая собой совокупность ГАЦ, предназначена для выпуска готовых изделия в соответствии с планом основного производства. В состав ГАЗ могут также входить отдельно функционирующие неавтоматизированные участки и цехи.

По степени автоматизации ГПС подразделяют на гибкий производственный комплекс (ГПК) – первая ступень и гибкое автоматизированное производство (ГАП) – вторая ступень.

ГПК – ГПС, состоящая из нескольких ГПМ, объединенных автоматизированной системой управления (АСУ) и автоматизированной транспортно-складской системой (АТСС), автономно функционирует в течение заданного интервала времени и имеет возможность встраиваться в систему более высокой ступени автоматизации.

ГАП – ГПС, состоящая из нескольких ГПК, объединенных автоматизированной системой управления производством (АСУП) и АТСС, осуществляет автоматизированный переход на изготовление новых изделий с помощью автоматизированной системы научных исследований (АСНИ), системы автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП).

ГПС различаются также по уровню автоматизации, каждый из которых характеризуется выполнением системой в автоматическом режиме определенных функций (табл. 4.5.1). Уровень автоматизации ГПС во многом определяется уровнем автоматизации ГПМ, из которых комплектуются ГПС. При выборе уровня автоматизации ГПС следует руководствоваться технико-экономическим расчетом, поскольку чем выше уровень автоматизации ГПС и входящего в него оборудования, тем выше их стоимость.

В общем случае ГПС включает ряд функциональных систем. СОФ – система обеспечения функционирования технологического оборудования ГПС – это совокупность взаимосвязанных автоматизированных систем, обеспечивающих проектирование изделий, технологическую подготовку их производства, управления ГПС и автоматическое перемещение предметов производства и технологической оснастки. В СОФ в общем случае входят: АСНИ; САПР; АСТПП; АТСС; автоматизированная система инструментального обеспечения (АСИО); система автоматизированного контроля (САК); автоматизированная система удаления отходов (АСУО) и т. д. (рис. 4.5.3).

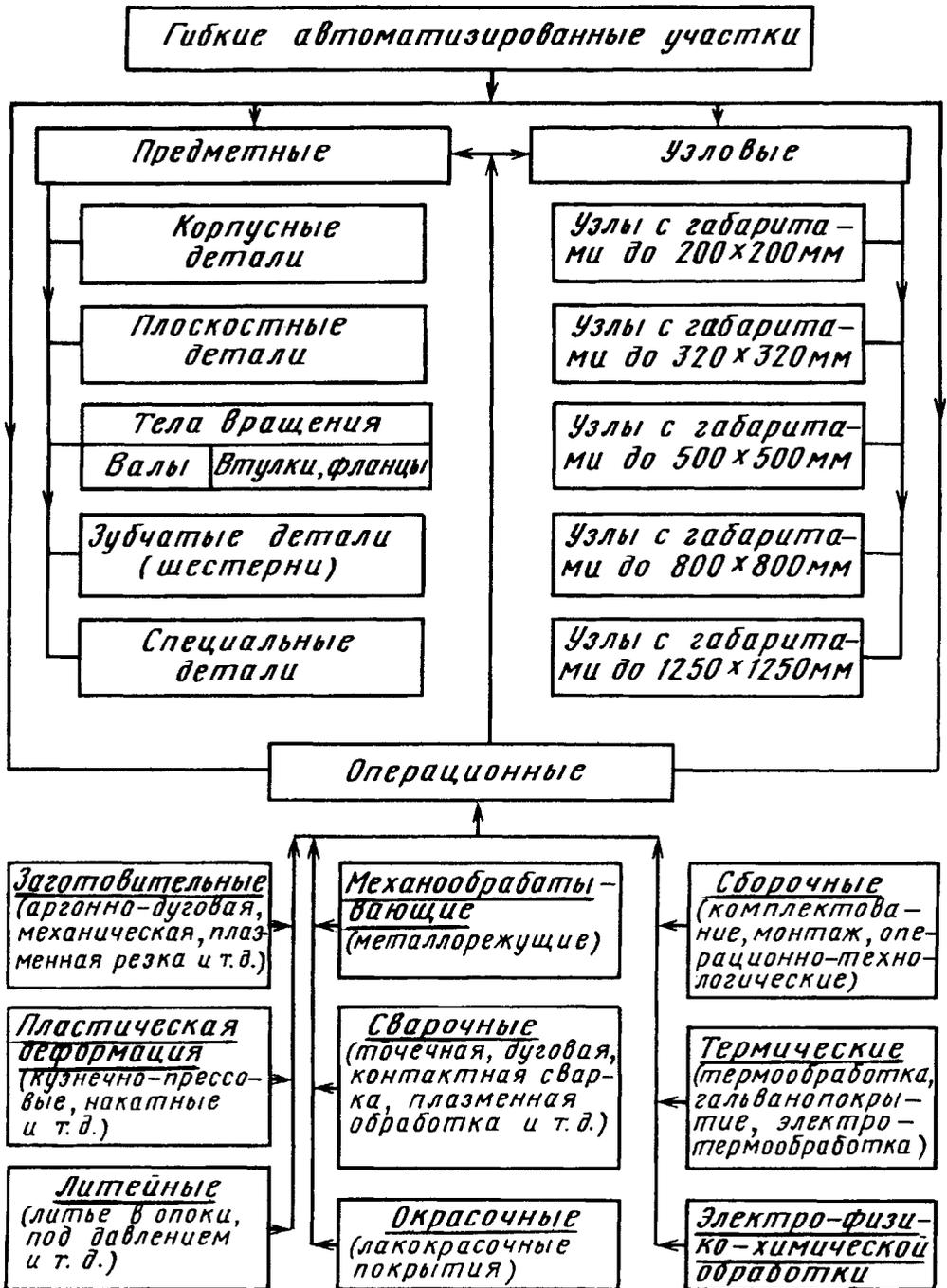


Рис. 4.5.2. Классификация ГПС (ГАУ) по функциональному назначению

**4.5.1. Уровни автоматизации различных функций в ГПС**

Выполняемые функции	Уровни автоматизации		
	1	2	3
Накопление материалов, заготовок, изделий	+	+	+
Накопление оснастки инструмента	+	+	+
Транспортировка материалов, заготовок и изделий по маршруту: склад — рабочее место — рабочее место — склад	+	+	+
Транспортировка оснастки и инструмента по маршруту: склад — рабочее место — склад	+	+	+
Управление технологическими процессами	+	+	+
Управление производственным процессом (планирование, диспетчирование и т.п.)	(+)	(+)	(+)
Защита от аварийных ситуаций	+	+	+
Смена управляющих программ	(+)	+	+
Загрузка — разгрузка материалов, заготовок и изделий	—	+	+
Подача вспомогательных материалов к рабочим местам	—	+	+
Удаление отходов производства от рабочих мест	—	+	+
Установка и закрепление заготовок в приспособлениях-спутниках	—	—	(+)
Контроль качества изготовления	—	—	+
Технологическая подготовка производства	—	—	(+)
Проектирование изделий	—	—	(+)

Примечание. Знак "+" означает автоматическое выполнение функции; знак "—" — неавтоматическое; знак "(+)" — автоматизированное.



Рис. 4.5.3. Производственно-техническая структура ГПС

**АСУ ГПС** — комплексная многофункциональная иерархическая система, содержащая:

подсистему оперативного календарного планирования, которая реализует в соответствии с выдаваемыми АСУП задачами производственной программы и оперативной ситуации функции планирования, контроля и оперативно-производственного диспетчирования;

подсистему оперативного управления ТП, служащую для выработки и реализации управляющих воздействий на технические средства технологической подсистемы ГПС и обеспечивающую управление ТП в реальном масштабе времени.

**Система обеспечения подготовки производства** состоит из САПР, АСТПП и АСНИ. В функции САПР входит решение задач конструирования изделий, разработки ТП, моделирования процессов работы производственных систем. АСТПП решает задачи технологической подготовки производства, в том числе информационного обеспечения процессов разработки ГПС. АСНИ предназначена для решения задач научной подготовки производства, содержащих поиск и исследование научных и опытно-конструкторских разработок, имеющих целью создание усовершенствованных изделий с использованием новых, прогрессивных методов и ТП, форм организации производства.

На организационных уровнях ГАУ и ГАЦ интеграция перечисленных систем целесообразна частично или полностью. На уровне ГАЗ помимо указанных систем должны также входить системы технического обслуживания оборудования, энергоснабжения, материалообеспечения и переработки отходов, управления снабжением и сбытом, экономической предприятия.

**Технологическая система ГПС** — совокупность основного и вспомогательного оборудования, объединенного в линии и участки, и реализованного на нем ТП, в том числе контрольных и транспортных операций. В общем случае технологическая система ГПС содержит один или несколько ГПМ (РТК), АТСС, АСИО, САК, АСУО.

**АТСС** состоит из модуля складирования и комплектации (МСК), который выполняет в соответствии со сменно-суточным графиком работы ГПС накопление заготовок, деталей, приспособлений, инструмента на начальном, промежуточном и конечном этапах производственного цикла, загрузку-разгрузку на входе-выходе грузовых транспортных единиц, а также модуля межоперационного транспортирования (ММТ), обеспечивающего доставку заготовок, приспособлений, инструмента к основному технологическому оборудованию.

В состав МСК могут в общем случае входить стеллажи для хранения заготовок, деталей, инструмента, приспособлений, накопительные площадки, автоматизированные склады, производственная тара, операционные накопители, различное специальное оборудование (сортирующие, комплекующие, ориентирующие механизмы). По конструктивному исполнению различают типы складов: стеллажный с напольным или подвесным краном-штабелером, с гравитационными стеллажными или автоматическими кранами-штабелерами; элеваторный, подвесной, касетный и др.

С помощью ММТ осуществляется получение и возврат находившихся в складах грузовых транспортных единиц, их перемещение в заданном направлении, установка (перекладка) на приемные устройства (столы), транспортировка готовых изделий на склад, отходов — в места их накопления. Конструктивное исполнение ММТ многообразно. Различают: конвейеры (роликовые, цепные, толкающие, подвесные и др.), подвесные транспортные роботы, рельсовые транспортные тележки, электророботкары, напольные краны-штабелеры. В некоторых ММТ совмещаются функций накопления и транспортирования в одном механизме, в некоторых — они разделены. Все транспортные устройства подразделяются на дискретные и непрерывные.

**АСИО** включает участки подготовки инструмента, устройства его накопления, транспортирования, замены, контроля качества. Проблема инструментального обеспечения в ГПС может быть решена по двум вариантам: 1) функции накопления и транспортирования инструмента частично или полностью возлагается на АТСС основной продукции; 2) создается отдельная иерархическая АСИО — от центральных инструментальных складов к промежуточным инструментальным участкам отдельных ГПС и далее — к инструментальным накопителям на станке. В последнем случае инструмент может транспортироваться подвесной монорельсовой системой, роботизированной транспортной тележкой и др. ГПС, как правило, оснащают станками с автоматической сменой инструмента, на которых устанавливают револьверные инструментальные головки или магазины инструментов с манипуляторами для их смены.

**САК** выполняет входной, межоперационный и окончательный контроль размерно-геометрических параметров заготовок, полуфабрикатов, изделий, обеспечивает диагностирование процессов и оборудования при выполнении ТП. Как правило САК строится на базе управляемых от ЭВМ контрольно-измерительных машин (КИМ), контрольных

постов, выполняющих функции автоматической обработки и передачи результатов измерений. Выделяют следующие виды контроля: по взаимодействию с объектом – активный и пассивный; по конструктивному решению – внутри или вне ГПМ; по реализации во времени – периодический и непрерывный.

**АСУО** включает комплекс средств, реализующих удаление из ГПС отходов. Дробление стружки проводится с помощью стружколомов, подбором геометрии режущего инструмента, режимов обработки. Стружка с режущего инструмента удаляется воздушной струей или смывается СОЖ. Со станков стружка удаляется шнековыми, скребковыми транспортерами, которые локализируют ее в специальные емкости, удаляемые из производственных систем в зону хранения отходов вручную, транспортными тележками или автоматически на электророботкарах. В ряде случаев для удаления стружки применяют систему вакуумных магистралей.

Производственно-техническую структуру ГПС определяют рассмотренные организационные уровни, компонентный состав технологической системы ГПС, обеспечивающий выполнение ТП, а также схема связей, характеризующая пути перемещения заготовок и деталей в процессе изготовления. Структура ГПС зависит от ее организационного уровня и характера связей технических средств внутри данного уровня, а также связей с внешними по отношению к нему производственными системами такого же или высшего уровней.

Структура ГПС зависит от структурных связей, которые обеспечиваются АТСС и определяются ТП изготовления изделий. Основные виды связей технологического оборудования в производственных системах приведены в табл. 4.5.2. Структуры ГПС формально можно представить в виде матричной модели структуры. Последняя для каждой конкретной ГПС характеризует связанность ее структурных компонентов посредством АТСС и описывается матрицей связанности  $M$ , представляющей собой квадратную матрицу порядка  $[n \times n]$ , где  $n$  - количество структурных компонентов.

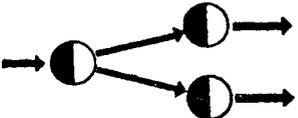
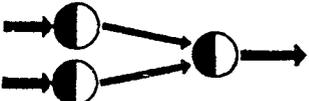
$$M = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2n} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \dots & b_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

Элементы матрицы  $M$  принимают значения:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я и } j\text{-я структурные} \\ & \text{компоненты связаны материальным} \\ & \text{потоком;} \\ 0 & \text{- в противном случае.} \end{cases}$$

При объединении  $(n + 1)$  производственных систем  $k$ -го уровня или их включении в систему высшего  $(k + 1)$ -го уровня матричная модель структуры объединенной производственной системы имеют вид:

**4.5.2. Виды структурных связей технологического оборудования в производственных системах**

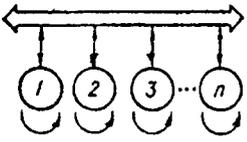
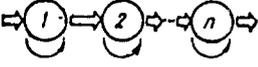
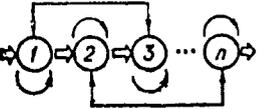
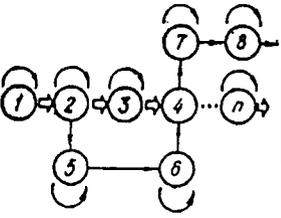
Связь и характеристика	Схемное изображение
<p><i>Последовательная связь</i> Изделия последовательно переходят с одной операции на другую</p>	
<p><i>Связь типа расхождения</i> На операцию поступает одна заготовка или изделие, а выходит несколько и направляются на разные операции</p>	
<p><i>Связь типа схождения</i> На операцию поступают несколько деталей, после нее выходит одно изделие или узел</p>	
<p><i>Циклическая внутренняя связь</i> Деталь поступает на операцию, происходит первоначальная обработка, после некоторого интервала времени происходит завершение операции</p>	

$$M^{k+1} = \begin{pmatrix} M_{\alpha}^k & b_{\alpha(\alpha+1)} & b_{\alpha(\alpha+2)} & \dots & b_{\alpha(\alpha+n)} \\ b_{(\alpha+1)\alpha} & M_{(\alpha+1)}^k & b_{(\alpha+1)(\alpha+2)} & \dots & b_{(\alpha+1)(\alpha+n)} \\ b_{(\alpha+2)\alpha} & b_{(\alpha+2)(\alpha+1)} & M_{(\alpha+2)}^k & \dots & b_{(\alpha+2)(\alpha+n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{(\alpha+n)\alpha} & b_{(\alpha+n)(\alpha+1)} & b_{(\alpha+n)(\alpha+2)} & \dots & M_{(\alpha+n)}^k \end{pmatrix},$$

где  $M_{\alpha}^k; M_{\alpha+1}^k; M_{\alpha+2}^k; \dots; M_{(\alpha+n)}^k$  - матричные модели производственных систем  $k$ -го уровня, входящие в состав системы  $(k+1)$ -го уровня;  $b_{\alpha(\alpha+1)}; b_{\alpha(\alpha+2)}; \dots; b_{(\alpha+n)(\alpha+1)}$  - взаимные связи между производственными системами.

Характерные взаимосвязи структурных компонентов ГПС приведены в табл. 4.5.3. Структурное состояние производственной системы играет определяющую роль в реализации ТП.

4.5.3. Формы взаимосвязей структурных компонентов ГПС

Структура связи	Схемное изображение	Матрица связанности	Характеристика формы
Полной		$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}$	Возможны все варианты связей компонентов ГПС. Частая смена изделий, которая обеспечивается свободой адресации потоков деталей
Последовательной		$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$	В производственной системе связи постоянные. Жесткое закрепление операций за рабочими позициями, форма характерна для автоматических линий ограниченной номенклатуры
Альтернативной		$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$	Структурные связи допускают "перепрыгивание" некоторых рабочих позиций. Увеличивается число возможных технологических маршрутов внутри структурной схемы. В структурной схеме допускается обратное транспортирование заготовок на уже пройденные рабочие позиции
Ветвящейся (комбинированной)		$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$	В производственной системе существует некоторое множество подобных операций. Схема характерна для организационных структур ГАУ, ГАЛ

**Основные характеристики ГПС механо-обработки.** Подготовка производства для изготовления каждой партии деталей на ГПС (ГАУ) включает комплекс работ, выполненных плановыми службами для оценки степени загрузки оборудования и возможности обработки, поставки приспособлений-спутников с заготовками, инструментов и т.д., а также переналадки оборудования. Ввод в производство каждой новой партии деталей связан с этапом подготовительных работ (подготовка и внедрение УП, подбор приспособлений и их сборка, а также подбор комплекта режущих инструментов и т.д.). После подготовительной работы первая деталь изготавливается с участием обслуживающего персонала. Все остальные детали партии изготавливаются в автоматическом режиме с ограниченным участием персонала. Повторное изготовление следующих партий деталей должно выполняться без непосредственного участия последнего. В указанные работы не входят осуществляемые вне ГПС работы (предварительная подготовка производства общезаводскими службами, доработка деталей на универсальном оборудовании с ручным управлением, транспортирование и хранение деталей в незавершенном производстве и др.).

**Годовая программа выпуска (станко-ч).**

$$P_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n (T_{\text{ср}} + t_{\text{ср. п.з.}}) N_i K_j I_{\text{ср}},$$

где  $T_{\text{ср}}$  - выборочная средняя станкоемкость технологической операции, включающая среднее цикловое время обработки и время загрузки-выгрузки детали, станко-ч;  $T_{\text{ср. п.з.}}$  - удельное среднее подготовительно-заключительное время, станко-ч;  $N_i$  - годовой объем выпуска  $i$ -го изделия, шт.;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  - число наименований выпускаемых изделий, шт.;  $K_j$  - число  $j$ -х деталей, входящих в состав комплекта по  $i$ -му изделию (с учетом применяемости на изделие), шт.;  $I_{\text{ср}}$  - среднее число операций, необходимых для полной размерной обработки  $j$ -х деталей, шт.

**Партия запуска** определяется на основе оптимизации затрат:

прямых переменных на изготовление деталей (затраты остаются постоянными вне зависимости от размера партии);

на хранение (содержание склада), которые остаются неизменными на одну деталь, однако сумма затрат измеряется пропорционально изменению запаса;

на переналадку оборудования и вызванных его простоем за время переналадки, которые не зависят от размера партии, но доля, приходящаяся на деталь, снижается при увеличении партии.

Размер  $m$  партии запуска заготовок детали  $j$ -го наименования, шт.:

$$m_j = \sqrt{\frac{(2P'_{\Gamma} Z_{\text{п}})}{3_{\text{х}}}},$$

где  $P'_{\Gamma}$  - годовой выпуск деталей  $j$ -го наименования, шт.;  $Z_{\text{п}}$  - постоянные затраты на подготовку оборудования, руб.;  $3_{\text{х}}$  - затраты на хранение одной детали, руб.

**Контроль деталей обработанной партии** может быть трех видов: 1) первой детали в партии (для проверки качества наладки оборудования); 2) наиболее ответственных поверхностей всех деталей партии; 3) выходной (проводится вне цикла обработки), который может выполняться вручную или автоматически на контрольно-измерительной машине (КИМ).

Затраты времени на выходной контроль партии из  $m$  штук:

$$T_{\text{к}} = \sum_{k=1}^m T_{\text{кр}},$$

где  $T_{\text{кр}}$  - время контроля одной детали партии. Во многих случаях проводится лишь выборочный контроль.

**Производительность ГПС.** Для оценки работы ГПС можно использовать номинальную и фактическую штучную производительность за относительно короткие интервалы времени работы ГПС (час, смена, сутки).

Номинальная штучная производительность ГПС:

$$Q_{\text{н}} = \sum_{i=1}^n \Phi_{\text{э}i} / t_{\text{шт.}},$$

где  $\Phi_{\text{э}i}$  - эффективный годовой фонд использования каждого ГПС, участвующего в изготовлении данной детали;  $n$  - количество ГПС, входящих в состав ГПС и участвующих в параллельном изготовлении соответствующей детали;  $t_{\text{шт.}}$  - штучное время на изготовление данной детали, мин.;  $t_{\text{шт.}} = t_{\text{уп}} + t_{\text{у}} + t_{\text{н}}$ , ( $t_{\text{уп}}$  - время работы ГПС по УМ для изготовления данной детали, мин.;  $t_{\text{у}}$  - время установки данной детали на ГПС, несовмещенное со временем изготовления детали;  $t_{\text{н}}$  - время на обслуживание режущих инструментов, несовмещенное с временем работы ГПС, отнесенное к одной детали, мин).

Затраты времени на подготовку производства и простои оборудования, обусловленные различными причинами в понятие  $Q$  не входят.

Производительность ГПС при изготовлении партии, состоящей из  $m$  деталей:

$$Q_{п.д} = \sum_{i=1}^n \Phi_{\Delta i} / (m t_{шт.к}),$$

где  $t_{шт.к}$  - штучно-калькуляционное время на обработку детали;  $t_{шт.к} = t_{п} + t_y + (T_{п.з.}/m) + t_n$  ( $T_{п.з.}$  - подготовительно-заключительное время наладки ГПМ на изготовление новой партии деталей, включает: ознакомление с чертежом, вызов УП, подготовку инструментов, обработку заготовки пробной детали, внесение коррекции в УП, ввод программы контроля детали в систему ЧПУ).

Фактическая производительность ГПС меньше номинальной из-за внецикловых потерь времени, обусловленных техническими и организационными причинами.

**Длительность изготовления партии одноименных деталей  $T_i$**  является важной характеристикой ГПС, так как этот показатель необходим для планирования производства.

$$T_i = T_{п.з.i} + \left[ \left( \sum_{i=1}^m t_{шт.i} \right) / (K_{ни}) \right] + T_{ки},$$

где  $T_{п.з.i}$  - подготовительно-заключительное время изготовления партии деталей;  $t_{шт.i}$  - штучное время изготовления детали  $i$ -й партии;  $K_{ни}$  - коэффициент использования оборудования ГПС при изготовлении  $i$ -й партии деталей;  $T_{ки}$  - время контроля  $i$ -й партии деталей.

$K_{ни}$  - характеризует потери времени, связанные с техническими отказами оборудования и его простоями по организационным причинам во время обработки  $i$ -й партии деталей.

**Организационно-технический уровень ГПС** характеризуется коэффициентом

$$\eta = 1 / (1 + \tau_{т.о} + \tau_{о}),$$

где  $\tau_{т.о}$  - удельная (т.е. отнесенная к 1 ч работы ГПС) длительность технического обслуживания;  $\tau_{о}$  - удельные (т.е. отнесенные к 1 ч работы ГПС) потери времени на организационные причины.

Величина  $(1 - \eta)$  характеризует долю времени, в течение которого ГПС простаивает из-за плановых и внеплановых ремонтов, обслуживания и организационных причин. Коэффициент  $\eta$  характеризует степень взаимного соответствия технологического оборудования и СОФ ГПС.

**Инфраструктура ГПС**, (т.е. состав системы обеспечения функционирования), должна быть ориентирована на повышение  $\eta$ . При этом состав СОФ должен быть обусловлен экономической целесообразностью применительно к условиям конкретного производства, т.е.

$$(\Phi_3 n \Delta \eta C_1) \geq (C_2 + E_n K),$$

где  $\Phi_3$  - эффективный фонд использования технологического оборудования в году, ч;  $n$  - количество оборудования, входящего в состав ГПС, шт.;  $\Delta \eta$  - приращение коэффициента в результате применения СОФ ГПС;  $C_1$  - стоимость 1 ч простоев единицы технологического оборудования, руб.;  $C_2$  - себестоимость обслуживания СОФ ГПС, руб.;  $E_n$  - нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений;  $K$  - капитальные вложения на создание СОФ ГПС, руб.

**Количество основного технологического оборудования** определяют дифференцированно по моделям. Оборудование выбирают по параметру, который наиболее полно выявляет функциональное назначение и технические возможности оборудования данного типа. Оборудование должно быть взаимозаменяемым, что значительно повышает эффективность работы ГПС.

**Количество оборудования  $n = P_r / \Phi_3$ .**

Рассчитанное количество оборудования округляют в большую сторону до целого числа.

**Вместимость склада-накопителя** определяется суммой объемов партий заготовок, ожидающих первоначальную обработку, и партий заготовок, которые находятся на промежуточном хранении перед дальнейшей обработкой:

$$N_{я} = \left[ (m_j q_j r) / (K \Phi_n) \right] \left[ T_{п} + T_{д} (I_{ср} - 1) \right] K_r,$$

где  $N_{я}$  - число ячеек склада накопителя, шт.;  $m_j$  - размер партии запуска заготовок деталей  $j$ -го наименования, шт.;  $q_j$  - вместимость транспортной тары (среднее число заготовок  $j$ -го типа, укладываемых в тару, шт.);  $r$  - число партий заготовок, находящихся одновременно на обработке в ГПС, шт.;  $T_{п}$  - среднее время ожидания партии заготовок перед первоначальной обработкой, смен;  $T$  - среднее время ожидания партии заготовок перед дальнейшей обработкой, смен;  $K_r = 1,25$  - коэффициент, учитывающий неравномерность грузопотоков;  $K$  - число рабочих смен в сутки;  $I_{ср}$  - среднее число операций, необходимых для полной размерной обработки  $j$ -х деталей, шт.;  $\Phi_n$  - номинальный фонд времени в году, дней.

**Число транспортных средств.** Условия работы АТСС соответствуют условиям работы систем массового обслуживания (СМО) с пуассоновским законом распределения времени заявок на обслуживание (окончание обработки на станке детали и деталей, размещенных в транспортной таре).

Интенсивность потока заявок на транспорт

$$\lambda = \left[ T_c / 2T_{cp} (n - n_n) \right] + 2n_n,$$

при  $1 \leq z \leq n$ ;

при  $n_{т.с} \leq z \leq n$ .

где  $T_{cp}$  - выборочная средняя станкоемкость технологической операции, ч, (при групповом транспортировании деталей  $T_{cp} = \sum T_{cpj} q_j$ ;

здесь  $q_j$  - вместимость транспортной тары);  $n_n$  - число станков, подлежащих переналадке за расчетный период времени  $T$ , шт.;  $n$  - общее число станков ГПС.

Первое слагаемое в формуле учитывает операции по подаче деталей (тары с деталями при групповом способе транспортирования к станку и обратно); второе - подачу оснастки к станкам, когда она выполняется АТСС при переналадке оборудования.

Длительность обслуживания заявки зависит от типа транспортного средства (ТС), его скоростных характеристик и протяженности трассы транспортирования.

Для машин циклического действия (транспортные манипуляторы, краны-штабелеры) длительность обслуживания (мин.) при двухадресном режиме работы.

$$T_{обс} = 2(t_p + t_t + t_m + t_{в.п}),$$

где  $t_p$ ,  $t_t$  - соответственно время разгона и торможения (ТС);  $t_m$  - время движения ТС на маршевой скорости;  $t_{в.п}$  - время выполнения цикла взять-поставить, мин.

Для определения времени обслуживания обычно используют средней путь движения ТС на маршевой скорости (0,3 - 0,5 длины трассы). Интенсивность обслуживания  $\mu = 1/T_{обс}$ .

Основным условием функционирования АТСС является  $\beta < n_{т.с}$ , где  $\beta = \lambda/\mu$ ;  $n_{т.с}$  - число ТС.

Входящий поток заявок на обслуживание исходит из  $n$  обслуживаемых объектов ( $n > n_{т.с}$ ) и обслуживаемый объект вновь становится потенциальным источником заявки на обслуживание, т.е. находится внутри системы и генерирует ограниченный поток заявок. Поэтому АТСС является типичной замкнутой СМО, для которой длина очереди (шт.)

$$L_0 = \sum_{z=n_{т.с}}^n (z - n_{т.с}) P_z,$$

где  $z$  - число заявок на обслуживание (шт.);  $P_z$  - вероятность того, что в АТСС на обслуживании и в очереди находится  $z$  - требований;

$$P_z = \begin{cases} (n! \beta^z P_0) / [z!(n-z)!] \\ (n! \beta^z P_0) / [n_{т.с}^{z-n_{т.с}} n_{т.с}!(n-z)!] \end{cases}$$

Величина  $P_0$  определяется из условий нормировки:

$$\sum_{z=1}^n P_z = 1 \text{ при } z = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Среднее число обслуживаемых и ожидающих обслуживания требований:

$$L_{ср} = \sum_{z=n_{т.с}}^n z P_z.$$

Коэффициент использования оборудования:  $K_{и.о} = 1 - (L_{ср}/n)$ . Коэффициент простоя оборудования в ожидании обслуживания  $K_{п.о} = L_{о}/n$ .

Коэффициент  $K_{и.о}$  является интегральной характеристикой замкнутой системы, которая характеризует интенсивность эксплуатации обслуживаемого ТО. Практически  $K_{и.о}$  равен вероятности того, что данный станок будет находиться в эксплуатации в любой момент времени. Данная характеристика справедлива при отсутствии приставочного (буферного) накопителя. При его наличии во избежание простоя ТО следует выдерживать условие  $L_0 \leq T'_{ср}$ , где  $T'_{ср}$  - среднее время обработки детали или транспортного комплекта, мин.

Если в качестве ТС используются непрерывные виды транспорта (конвейеры различного вида), то АТСС можно рассматривать как СМО с неограниченным количеством обслуживающих ТС, т.е.  $n_{т.с} = \infty$ , и при любой интенсивности входящий поток требований начинает немедленно обслуживаться, так как в системе имеются свободные ТС.

**Гибкость производственной системы.** Под гибкостью производственной системы понимается ее свойство переходить в пределах установленных технических возможностей оборудования из одного работоспособного функционального состояния в другое для выполнения очередного производственного задания или новой функции.

К основным факторам, определяющим гибкость производственной системы, можно отнести: количество возможных переходов системы из одного работоспособного состояния в другое; длительность выполнения каждого из переходов; количество типов деталей, которое может изготавливать система; количество технологических операций, закрепленных за оборудованием; количество дополнительных оснастки и инструмента, необходимого

при переходе на выпуск нового типа деталей; степень подчиненности функционирования системы; возможности перераспределения материальных потоков деталей при отказе отдельных компонентов системы; объем дополнительных капитальных затрат, необходимый для перехода на выпуск новых изделий.

Гибкость производственной системы является относительным понятием и ее реализация зависит от конкретных задач производства. Косвенной количественной оценкой гибкости является часть  $T_{п.зi}$  отнесенного к

суммарному  $\sum_{i=1}^m t_{шт.кi}$ . Чем меньше в равных условиях доля  $T_{п.зi}$ , тем выше гибкость ГПС.

Качественная оценка гибкости складывается из показателей: **универсальности** - способности ГПС изготовлять детали заданной номенклатуры без модернизации системы; **повторяемости** - способности ГПС повторять ранее выполненные работы после окончания новой работы; **приспособляемости** - способности ГПС в процессе эксплуатации изготавливать различные детали сверх заданной номенклатуры путем введения соответствующих регулировок или за счет самонастраивания; **адаптивности** - способности ГПС к восприятию изменений условий производства.

Из многообразия форм проявления гибкости можно выделить основные: гибкость применения; технологическая гибкость; гибкость технических средств; гибкость структурно-компоновочной схемы; организационная гибкость; гибкость мощности.

**Гибкость применения** - способность ГПС переходить из одного работоспособного функционального состояния в другое (потенциальная возможность осуществления таких переходов). Критерием оценки этой составляющей является количество работоспособных функциональных состояний ГПС или возможных переходов системы  $n$ . В этом случае коэффициент  $K_n$  гибкости применения является функцией количества переходов системы (показательная функция)  $K_n = f(n) = 1 - e^{-n}$ .

**Технологическая гибкость** - характеризуется способностью ГПС перестраиваться на выпуск новых изделий в пределах заданной номенклатуры и временем, необходимым для выполнения перестройки. Коэффициент технологической гибкости

$$K_T = 1 / \left[ 1 + \left( \sum t_{пер} / t_{дi} m_i + \sum t_c \right) \right],$$

где  $\sum t_{пер}$  - простой для переналадки оборудования на изготовление новой продукции;  $t_{дi}$  - время изготовления детали  $i$ -го типа;  $m_i$  -

величина партии деталей  $i$ -го типа;  $\sum t_c$  - собственные простои оборудования, обусловленные его техническими характеристиками.

Технологическая гибкость возрастает при сокращении времени переналадок ТО и увеличении размера партии деталей одного типа.

**Гибкость технических средств** - характеризует степень универсальности ТО и целевых механизмов ГПС и зависит от функциональных возможностей и технических параметров технологического оснащения ГПС. Коэффициент гибкости технических средств определяется из выражения:

$$K_{т.с} = 1 - 1 / K_{з.о},$$

где  $K_{з.о} = \sum_{i=1}^M O_i / M$  - коэффициент закрепления операций;  $\sum_{i=1}^M O_i$  - суммарное число

различных технологических операций, выполняемых или подлежащих выполнению на ГПС в течение определенного периода времени;  $M$  - число рабочих позиций ГПС.

Повышение гибкости технических средств обеспечивается агрегатированием и блочно-модельным построением ТО ГПС, использованием универсальных накопительных, ориентируемых, подающих устройств, механизмов загрузки-выгрузки, приспособлений, магазинов сменных инструментов, наборов сменных палет, устройств автоматической смены схватов и технологических модулей ПР, систем ЧПУ.

**Гибкость структурно-компоновочной схемы ГПС** определяется свободой адресации материальных потоков внутри системы и характеризует связанность ее рабочих позиций посредством АТСС. Свобода адресации материального потока в структурно-компоновочной схеме ГПС оценивается коэффициентом

$$K_c = \left[ (b_{max} - b) + 1 \right]^{-1},$$

где  $b_{max}$  - число максимально возможных связей компонентов ГПС;  $b$  - число фактически имеющихся связей.

**Организационная гибкость** - способность ГПС функционировать с минимальными потерями производительности при отказе отдельных компонентов или отклонении от заданного режима работы (надежность ГПС). Коэффициент организационной гибкости

$$K_{орг} = T_p / (T_p + T_B),$$

где  $T_p, T_a$  - соответственно время работы системы и время восстановления ее работоспособности.

**Гибкость мощности** - способность ГПС к расширению объемов производимой продукции. Эта способность зависит от резервов мощности ТО, а также комплекса организационных мероприятий, обеспечивающих повышение производительности ГПС в целом. Гибкость мощности выражают коэффициентом

$$K_M = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = \Delta Q / Q_1,$$

где  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$  - прирост производительности ГПС при расширении мощности по сравнению с базовой производительностью  $Q_1$ .

Полную оценку гибкости ГПС можно определить интегральным показателем  $K_{и.п.}$ , который включает все рассмотренные показатели составляющих этого понятия

$$K_{и.п.} = K_n \cdot K_T \cdot K_{т.с.} \cdot K_c \cdot K_{орг.} \cdot K_M,$$

или аддитивным показателем

$$K_a = \alpha K_n + \beta K_T + j K_{т.с.} + \xi K_c + \omega K_{орг.} + \varepsilon K_M,$$

где  $\alpha, \beta, j, \xi, \omega, \varepsilon$  - соответствующие весовые коэффициенты, определяющие экономичность той или иной формы проявления гибкости в каждом конкретном случае и пронормированные следующим образом:

$$\alpha + \beta + j + \xi + \omega + \varepsilon = 1.$$

**Уровень автоматизации ГПС** - это показатель, равный отношению времени автоматической работы оборудования к общему фонду времени его использования.

Уровень автоматизации ТО (ГПМ, многооперационных станков и других машин) характеризуется коэффициентом использования при работе по УП, т.е. в автоматическом цикле при изготовлении партии одинаковых деталей:

$$K_{и.уп.} = \sum_{i=1}^m (t_{уп. i} + t_{уст. ti}) / \sum_{i=1}^m t_{шт.к. i},$$

где  $t_{уп. i}$  - время работы по УП при изготовлении одной  $i$ -й детали, мин.;  $t_{уст. ti}$  - время перемещения заготовок детали из позиции загрузки в позицию обработки, несомещенное с временем обработки, мин.;  $t_{шт.к. i}$  - штучно-калькуляционное время изготовления  $i$ -й детали партии;  $m$  - число деталей в партии.

Комплексная оценка уровня автоматизации ГПС и организации производства на

ней, в том числе функционирования АТСС, может быть выполнена посредством коэффициента использования годового фонда времени ГПС:

$$K_T = \sum_{i=1}^n \tau_{\Phi i} / \Phi_3,$$

где  $\tau_{\Phi i}$  - фактическое время работы оборудования ГПС по УП в течение года;  $n$  - количество единиц ТО в ГПС;  $\Phi_3$  - эффективный годовой фонд времени работы ГПС, ч.

**Производительность труда** - это количество продукции, вырабатываемой обслуживающим персоналом в единицу времени, выраженное стоимостью или в штуках. Производительность труда рассчитывается по формуле  $Q_{тр} = P / R_0$ , где  $P$  - количество годной продукции, изготовленной ГПС за определенный интервал времени, нормо-ч или шт.;  $R_0$  - общая численность персонала, обслуживающего ГПС.

Для ГПС (ГАУ)

$$R_0 = R_{y.c.} + R_n + R_{o.n.} + R_{итр} + 1,$$

где  $R_{y.c.}$  - количество работающих на участке сборки приспособлений и установки заготовок на палеты;  $R_n$  - количество работающих на участке предварительной постройки режущего инструмента на размер вне станка;  $R_{o.n.}$  - количество операторов и наладчиков;  $R_{итр}$  - количество НТР и рабочих, отнесенное условно на обслуживание ГАУ.

Структурная схема ГПС представляет собой расположение ее компонентов, обеспечивающих наиболее рациональное функционирование всей системы; она определяется типом изготавливаемых деталей и ТП их изготовления. На выбор структурной схемы ГПС существенно влияет ее технологическое назначение.

В типовых компоновочных схемах механообрабатывающих ГПС предусматривается как жестко заданный маршрут перемещения обрабатываемых заготовок (в ГАЛ), так и гибкое варьирование этими маршрутами (в ГАУ). Маршрут перемещения заготовок зависит от того, последовательно изготавливается деталь или с возвратом на склад после выполнения операции, что обуславливает прямую или косвенную (через склад) связь ТО между собой. Прямая связь ТО (минуя склад) используется обычно в условиях крупносерийного производства при изготовлении деталей значительной массы и сравнительно большом времени обработки. Косвенный вид связи ТО применяется при относительно коротком цикле обработки. Эта связь ТО несколько

дороже прямой, но обладает рядом преимуществ: наиболее полная загрузка ТО; весь производственный процесс контролируется и управляется от центрального пульта управления; заготовки новой партии направляются к станку только после окончания обработки предыдущей партии, что уменьшает вместимость накопителей.

В зависимости от схемы расположения ТО в ГПС, перемещение заготовок и других

компонентов материального потока может быть организовано по жесткому (рис. 4.5.4, а-в) или гибкому (изменяемому) маршруту. При комбинированном потоке на отдельных участках ГПС маршрут может изменяться, а на других может быть изменен. В этом случае АТСС планируют так, чтобы заготовки могли направляться к ТО в различной последовательности, пропуская какую-либо единицу оборудования (позицию) ГПС (табл. 4.5.4).

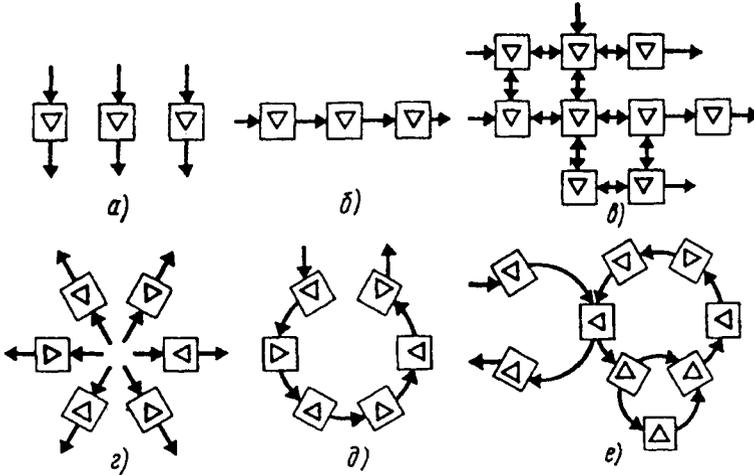


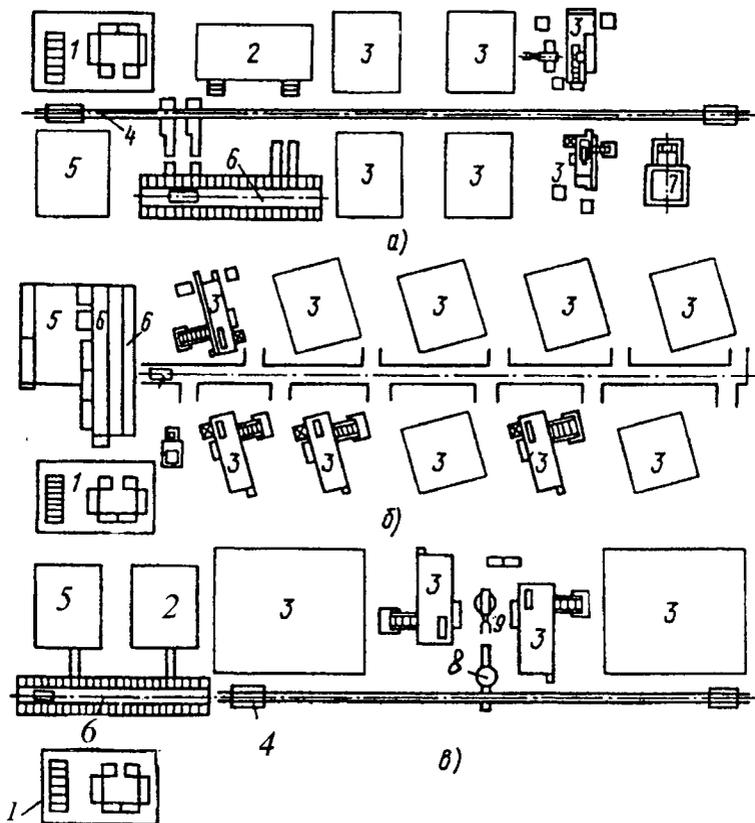
Рис. 4.5.4. Типовые компоновочные схемы расположения оборудования ГПС:

а - параллельная; б - линейная однорядная; в - линейная многорядная (сетевая); г - звездообразная; д - круговая; е - роторная (а-в - разомкнутое положение оборудования; г-е - замкнутое положение оборудования)

**4.5.4. Варианты перемещения материального потока в зависимости от расположения оборудования**

Схема расположения оборудования	Положение оборудования к линии транспортного конвейера	Подача заготовок		
		Жесткая без пропусков	Жесткая с пропусками	Любая
Линейная однорядная	На линии	+	-	-
	В стороне	+	+	-
Линейная многорядная	На линии	-	-	-
	В стороне	+	+	+
Круговая, роторная однорядная	На линии	+	-	-
	В стороне	+	+	+
Круговая, роторная многорядная	На линии	-	-	-
	Многорядная	+	+	+

Примечание. "+" - наличие, "-" - отсутствие.



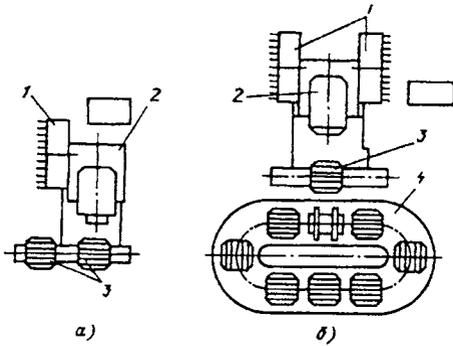
**Рис. 4.5.5. Типовые схемы компоновки ГАУ для обработки тел вращения в условиях многономенклатурного серийного производства**

Используя различные компоновочные решения, можно создавать типовые схемы размещения оборудования в состав ГПС различного технологического назначения (рис. 4.5.5).

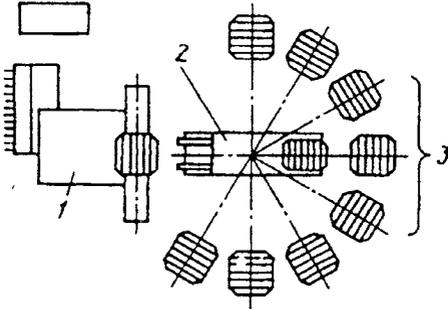
ГАУ (рис. 4.5.5, а) состоит из ГПМ 3, автоматизированного склада (АС) 6, отделения 5 комплектации и настройки инструмента, моечного отделения 2, контейнеров 7 для сбора стружки и управляющего вычислительного комплекса (УВК) 1. Все оборудование ГАУ обслуживается транспортным модулем 4. Если транспортным модулем является транспортная тележка (рис. 4.5.5, б) заготовки и инструментальные блоки (комплекуются в отделении 5) передаются в АС 6 и оттуда доставляются к ГПМ 3 этой тележкой, ГАУ управляется УВК 1. Для загрузки ГПМ используются индивидуальные ПР. Отличие в ГАУ при одностороннем ГПМ 3 (рис. 4.5.5, в) относительно транспортного модуля 4 по сравнению с данными выше состоит в том,

что ПР 9 загружает два ГПМ 3 заготовками, которые доставляются из АС 6 на поворотный стол 8 транспортным модулем 4, который управляется УВК1.

Основной составной частью ГПС является ГПМ. Простейший ГПМ состоит из станка с ЧПУ типа ОЦ (многоцелевого станка) с одним или двумя инструментальными магазинами. Станок (рис. 4.5.6, а) имеет два рабочих стола. Заготовку устанавливают на стол вручную, в то время на другом столе изготавливается деталь. Совмещение времени обработки с временем установки обеспечивает выигрыш в производительности. ГПМ (рис. 4.5.6, б) является более совершенным. Он содержит станок типа многоцелевого станка с одним или двумя магазинами инструментов. Шаговый конвейер-накопитель палет с 4, 6, 8 или 12 заготовками позволяет длительное время выполнять обработку с ограниченным участием оператора.



**Рис. 4.5.6.** ГПМ, содержащий один станок с ЧПУ:  
*а* - с двумя маятниковыми рабочими столами;  
*б* - с автоматизированным загрузочным устройством;  
 1 - магазины с инструментами; 2 - станок с ЧПУ;  
 3 - стол станка; 4 - автоматизированное загрузочное устройство (шаговый конвейер-накопитель палет)



**Рис. 4.5.7.** ГПМ со стендовым накопителем верного типа:  
 1 - станок с ЧПУ; 2 - поворотный стол-перегрузчик; 3 - верный накопитель заготовок, установленных на палетах

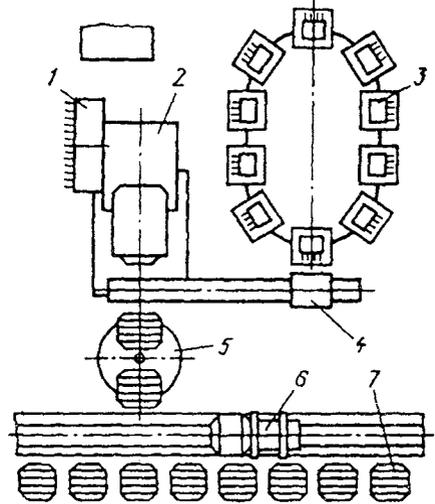
В ГПМ со стендовым (стационарным) накопителем верного типа (рис. 4.5.7) число стенов позиций накопления заготовок может наращиваться постепенно, что снижает первоначальные затраты. Заготовки со стенов на станок перегружаются поворотным столом. Загрузка заготовок в накопитель может выполняться ПР или робокарой.

ГПМ (рис. 4.5.8) имеет две системы смены инструмента: одна - из магазина, а вторая обеспечивает замену многшпиндельных головок.

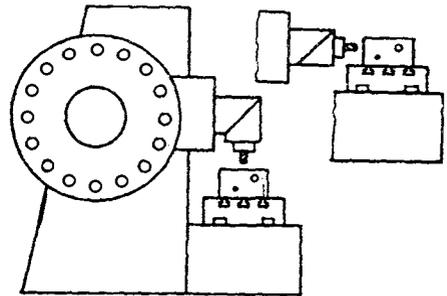
Использование в ГПС оборудования с многшпиндельными головками дает возможность совмещения переходов обработки и, следовательно, повышает ее производительность. Смена головок может проводиться из магазина поворотом револьверной головки, поворотом стола. Применение специальных шпиндельных насадок на станке с горизон-

тальным шпинделем (рис. 4.5.9) позволяет выполнять обработку инструментом, расположенным вертикально, что дает возможность обрабатывать заготовку с пяти сторон.

ГАЛ состоит из нескольких ГПМ с единым устройством загрузки и транспортирования заготовок. В ГАЛ для повышения производительности используются станки с многшпиндельными головками. На ГАЛ с жестким конвейером подачи заготовок (рис. 4.5.10) обработка выполняется последовательно на каждом или некоторых рабочих местах. На



**Рис. 4.5.8.** ГПМ с автоматизированными системами смены инструмента из магазина и шпиндельных головок из накопителя:  
 1 - магазин с инструментами; 2 - станок с ЧПУ;  
 3 - накопитель шпиндельных головок (коробок);  
 4 - перегружатель головок; 5 - поворотный стол станка; 6 - рельсовая тележка-загрузчик заготовок;  
 7 - стэнд-накопитель с заготовками



**Рис. 4.5.9.** Схемы применения на станке с ЧПУ специальной головки для обработки инструментами с горизонтальным и вертикальным расположением оси

ГАЛ, как правило, изготавливают детали ограниченной номенклатуры с общими конструктивно-технологическими признаками и с годовым выпуском несколько десятков тысяч в год. В основе организации производства лежит групповой технологический процесс. Гибкость ГАЛ определяется типом применяемого оборудования.

На ГАЛ (рис. 4.5.11) часть ТО размещена на параллельных потоках, а часть на одном потоке обработки. Параллельно-последовательная обработка позволяет совмещать одно- и многоинструментальные станки, оснащенные специальными головками. На ГАЛ изготавливают до 10 тыс. деталей в год. За счет сочетания станков повышается коэффициент их использования. При увеличении партии запуска эффективность ГАЛ повышается вследствие уменьшения затрат на наладку.

ГАЛ (рис. 4.5.12) состоит из нескольких ОЦ с многошпиндельными головками. Заготовки подаются на позицию загрузки ГАЛ

робокарой, а на линии они перемещаются конвейером. Обработка заготовок осуществляется с нескольких сторон. При переходе на обработку заготовок новых деталей заменяются отдельные или все заготовки. Многошпиндельные головки, находящиеся вне рабочей позиции, подаются на позицию контроля, на которой весь изношенный инструмент заменяется.

ГАЛ (рис. 4.5.13) предназначена для обработки стержневым инструментом отверстий (сверление, зенкерование, развертывание, снятие фасок, нарезание внутренней резьбы) в корпусных деталях четырех наименований (семи типоразмеров) винтовых компрессоров. При переходе с обработки одной партии деталей на другую шпиндельные головки на транспортной системе заменяет оператор с пульта управления посредством механизированной тележки и секций автоматизированного склада.

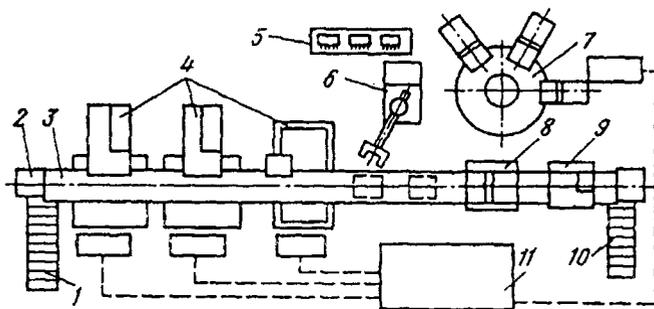


Рис. 4.5.10. ГАЛ с последовательным выполнением операций:

- 1 - конвейер подачи заготовок на линию; 2 - автоматический загрузчик линии;
- 3 - шаговый конвейер; 4 - станки с ЧПУ; 5 - накопитель шпиндельных головок;
- 6 - промышленный робот; 7 - станок с ЧПУ многошпиндельными головками;
- 8 - установка для удаления стружки и мойки деталей; 9 - контрольно-измерительная машина;
- 10 - конвейер с обработанными деталями; 11 - ЭВМ линии

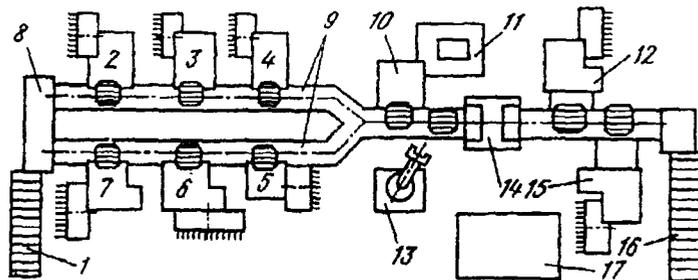
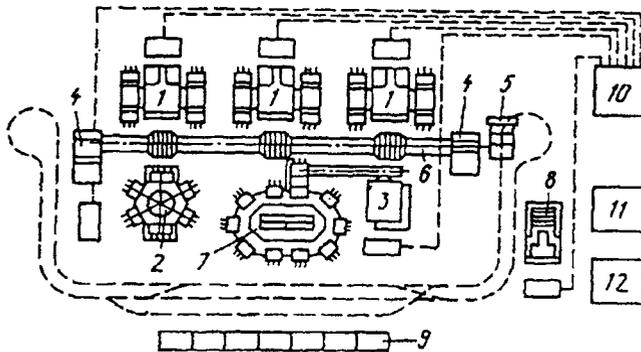


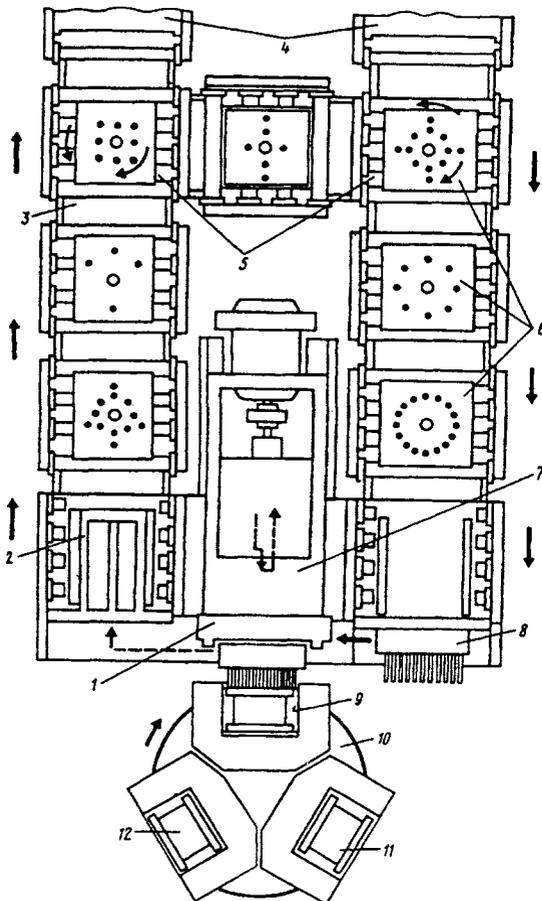
Рис. 4.5.11. ГАЛ с параллельно-последовательным выполнением операций:

- 1 - конвейер подачи заготовок; 2 - 7, 12 и 15 - станки с ЧПУ; 8 - автоматический загрузчик; 9 - конвейер;
- 10 - станок с ЧПУ с многошпиндельными головками; 11 - установка смены многошпиндельных головок;
- 13 - промышленный робокантователь заготовок; 14 - установка для удаления стружки и мойки заготовок;
- 16 - конвейер обработанных деталей; 17 - ЭВМ линии



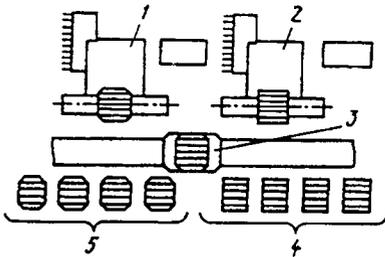
**Рис.4.5.12. ГАП со станками с ЧПУ, оснащенными многошпиндельными головками:**

- 1-3 - станки с ЧПУ с устройствами автоматической смены многошпиндельных головок;  
 4 - позиции загрузки-разгрузки заготовок; 5 - робота; 6 - конвейер заготовок (палет с заготовками);  
 7 - накопитель многошпиндельных головок; 8 - контрольно-измерительная машина с ЧПУ;  
 9 - позиция накопления заготовок; 10 - центральная ЭВМ; 11 - ЭВМ управления транспортом;  
 12 - ЭВМ управления контролем и настройкой инструмента

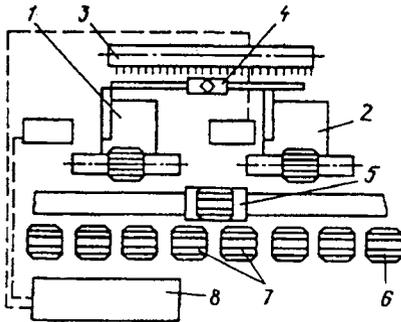


**Рис. 4.5.13. Структурно-компоновочная схема ГАП ПАС МА-1 для обработки корпусных деталей:**

- 1 - место крепления шпиндельных коробок;  
 2 - кантователь (в горизонтальном положении); 3 - транспортер (прямоугольной формы); 4 - накопитель шпиндельных коробок;  
 5 - поворотные секции транспортера;  
 6 - шпиндельные коробки (в вертикальном положении); 7 - силовой стол (с приводами подачи и вращения);  
 8 - кантователь со шпиндельной коробкой (в вертикальном положении);  
 9 - обрабатываемая деталь;  
 10 - поворотный стол (трехпозиционный);  
 11 - разгрузочная позиция;  
 12 - загрузочная позиция

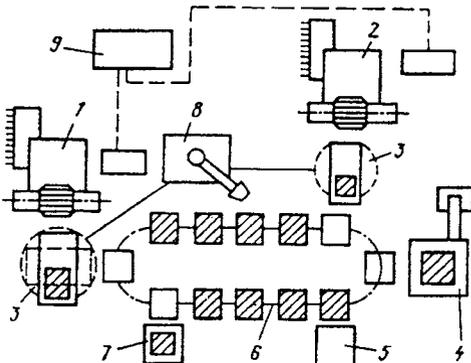


**Рис. 4.5.14.** ГАУ, содержащий два модуля и единое автоматизированное устройство для смены палет:  
1, 2 - станки с ЧПУ; 3 - рельсовая тележка-перегрузчик палет; 4, 5 - стенды с палетами, закрепленными за каждым станком



**Рис. 4.5.15.** ГАУ с двумя модулями и единым автоматизированным загрузочным устройством смены палет и инструмента:

- 1 и 2 - станки с ЧПУ; 3 - накопитель инструмента;
- 4 - промышленный робот смены инструмента;
- 5 - рельсовая тележка-перегрузчик палет;
- 6 - палеты для любого станка участка;
- 7 - позиции загрузки-разгрузки палет;
- 8 - АСУ распределения загрузки



**Рис. 4.5.16.** ГАУ с контрольно-измерительной машиной и установкой для мойки деталей:

- 1 и 2 - станки с ЧПУ; 3 - стол-перегрузчик палет;
- 4 - установка для удаления стружки и мойки деталей и палет; 5 - контрольно-измерительная машина;
- 6 - конвейер-накопитель палет; 7 - станция загрузки-разгрузки палет заготовками и деталями;
- 8 - промышленный робот-кантователь заготовок;
- 9 - ЭВМ участка

Простейший ГАУ состоит из двух станков типа ОЦ (рис. 4.5.14), общего перегружателя заготовок, закрепленных на палетах. Каждый станок имеет свой комплект палет (до 15 шт.). Заготовки загружают на палеты вручную.

ГАУ (рис. 4.5.15) имеет объединенные устройства для смены палет и единую систему автоматической смены инструмента для нескольких (до четырех) станков. Инструмент заменяется специальным ПР. Один комплект палет используется для нескольких станков. Станки взаимозаменяемы.

ГАУ (рис. 4.5.16) предназначен для выполнения нескольких операций. Используются станки разного технологического назначения, которые дополняют друг друга, и одна транспортно-накопительная система. Сложные заготовки обрабатываются с шести сторон.

ГПС (рис. 4.5.17) обеспечивает изготовление деталей типа тел вращения с использованием станков разных групп. Подача заготовок осуществляется в кассетах. Заготовки из кассет на станки подает ПР. Он же укладывает в кассеты готовые детали. Управление ГПС осуществляет центральная ЭВМ.

ГПС (рис. 4.5.18) предназначена для комплексной обработки корпусных деталей ( $L \times B \times H$  до  $500 \times 500 \times 500$  мм) в условиях мелкосерийного производства. ГПМ сконструированы на базе многоцелевого станка мод. ИР500МФ4, оснащен восьмиместным линейным накопителем заготовок, установленных на приспособленных спутниках, и устройством их автоматической смены. Транспортная система состоит из тележки-манипулятора и станций загрузки-разгрузки приспособлений спутников и комплектов инструментов. Автоматизированный склад (182 ячейки) обслуживает кран-штабелер. Верхний уровень УВК осуществляет оперативно-календарное планирование производства, учет диспетчирования хода производства и его управления, а нижний уровень - управление агрегатами и АТСС.

ГПС (рис. 4.5.19) предназначена для токарной обработки в автоматическом режиме фланцев, дисков, колец, ступиц. УВК системы обеспечивает: планирование производства (на один месяц); расчет суточных и сменных заданий; оперативное управление производством; диспетчирование; учет хода производства; ведение автоматизированного банка данных; хранение УП; управление АТСС.

В ГПС (рис. 4.5.20) автоматизированы все потоки информации на каждом уровне управления. ГПС включает АТСС, САПР, АСТПП. Автоматизация конструкторских работ, технологической подготовки производства, обработки на станках, управляемых центральной ЭВМ обеспечивает эффективность производства.

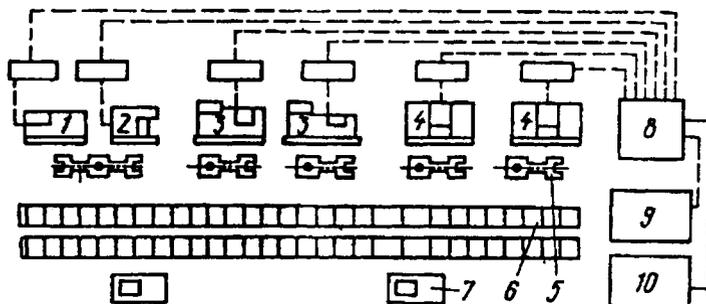


Рис.4.5.17. ГПС для обработки деталей типа тел вращения со станками с ручным управлением и с ЧПУ:

- 1 - протяжный станок; 2 - зубофрезерный станок; 3, 4 - токарные станки с ЧПУ;  
5 - промышленные роботы для загрузки-разгрузки станков; 6 - конвейер-накопитель;  
7 - позиции загрузки заготовок; 8 - центральная ЭВМ; 9 - ЭВМ управления транспортом;  
10 - ЭВМ управления контролем и наладкой инструмента

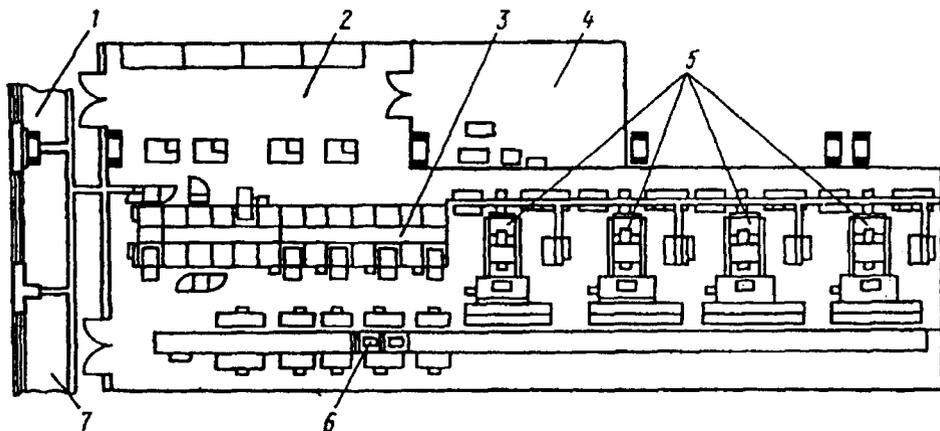


Рис. 4.5.18. Структурно-компоновочная схема типовой ГПС "Талка-500":

- 1 - центр автоматизированной технологической подготовки;  
2 - отделение подготовки приспособлений спутников; 3 - склад; 4 - отделение подготовки инструмента;  
5 - ГПМ; 6 - АТСС

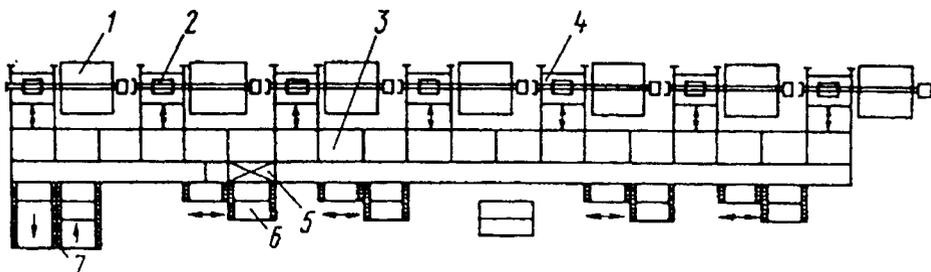


Рис. 4.5.19. Структурно-компоновочная схема ГПС мод. АСВ-31 для обработки тел вращения:

- 1 - станки мод. П756ДФЗ; 2 - промышленный робот мод. СМ80Ц2502; 3 - АТСС;  
4 - выкатные тактовые столы для кассет с заготовками; 5 - кран-штабелер мод. С4225.04,  
6 - станция облуживания; 7 - устройство входа-выхода АТСС

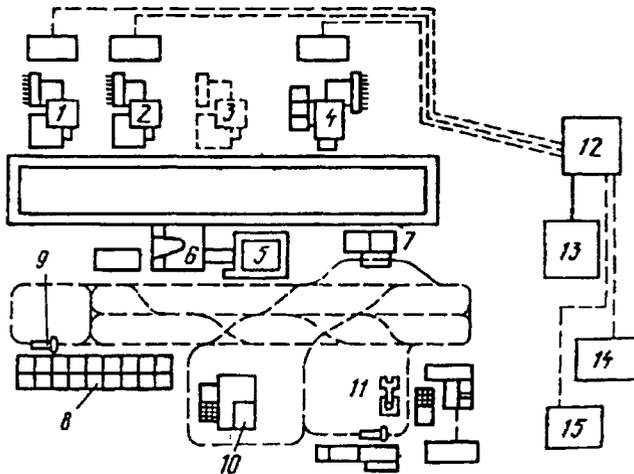


Рис. 4.5.20 ГПС, включающая различные функциональные системы (АТСС, САПР, АСПП и др.):

- 1, 2, 4 - станки с ЧПУ; 3 - место для расширения ГПС (установки новых модулей);  
 4 - установка для очистки заготовок от стружки и мойки; 6 - контрольно-измерительная машина с ЧПУ;  
 7 - позиции перегрузки заготовок на конвейер; 8 - автоматизированный склад; 9 - робокара;  
 10 - станок для обработки баз заготовок; 11 - РТК доделочных операций; 12 - центральная ЭВМ;  
 13 - ЭВМ управления автоматизированной транспортно-складской системой;  
 14 - ЭВМ управления контролем и наладкой инструмента; 15 - ЭВМ диагностики элементов ГПС

#### 4.5.2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГПС

**Сетевое окружение ГПС.** Система управления ГПС представляет собой набор прикладных программ, работающих в сетевом окружении ГПС. Локальная сеть ГПС поддерживает коммуникацию в распределенной системе управления и интерактивность отдельных ее узлов, а кроме того, предоставляет разработчикам систем управления богатый стандартный сервис и возможность создания собственных (нестандартных) сервисных программ.

Общепризнанным стандартом построения многомашинных систем управления служит широко известный проект MAP/TOP (Manufacturing Automation Protocol /Technical Office Protocol), построенный на основе семиуровневой модели ISO-OSI (Open System Interconnection) взаимодействия открытых систем. Однако на практике протоколы MAP/TOP получили распространение только на очень крупных предприятиях, в силу своей сложности, избыточности и дороговизны. Подавляющее же большинство современных распределенных систем строят на базе протоколов TCP/IP (Transmission Control Protocol /Internet Protocol), заимствованных из коммуникационного обеспечения международной сети Internet.

Так называемая концепция "Intranet" есть ни что иное, как использование возможностей среды Internet на уровне малых и сред-

них локальных сетей, вполне приспособленных для организации управления в ГПС. Эта концепция и принята за основу при анализе проблемы сетевого окружения ГПС.

**TCP/IP** - это условное и обобщенное наименование целого семейства протоколов, некоторые из которых обеспечивают функции коммуникации (собственно TCP/IP), другие же (на основе TCP/IP) поддерживают работу прикладных программ, оказывая им разнообразные услуги. Обилие подобных услуг и обеспечивает протоколам TCP/IP высокую степень популярности. В числе услуг необходимо упомянуть следующие.

**Передача файлов:** пользователь любого компьютера может получить файлы от другого компьютера или послать файлы другому компьютеру.

**Удаленный доступ:** пользователь любого компьютера может стать полноправным удаленным пользователем любого другого компьютера.

**Электронная почта:** пользователь может отправить сообщение, которое доставляется почтовому серверу, обслуживающему адресата; почтовый сервер выдаст это сообщение по запросу адресата.

**Клиент-сервер:** система, в которой программа-сервер предоставляет услуги, а программа-клиент пользуется услугами; сервер и клиент могут находиться на одном или разных компьютерах.

**Удаленная печать:** доступ к принтерам других компьютеров так, как будто они непосредственно подключены к собственному.

**Удаленное выполнение:** возможность посылать запрос на выполнение программы на другом компьютере.

**Сервер имен:** доступ к компьютеру, который содержит имена пользователей и их пароли, имена и сетевые адреса компьютеров; хранение подобной информации на выделенном сервере позволяет легко ее обновлять.

**Оконная система:** возможность распределять работы (в том числе графические) по другим компьютерам.

Протокол IP организует распространение информации по локальной сети, передавая ее от узла к узлу локальной сети в виде отдельных блоков-пакетов. При этом протокол IP не несет ответственности за надежность доставки, целостность и сохранение порядка потоков пакетов, т.е. не решает задачу качественной передачи информации. Эту проблему решают два других (альтернативных) протокола: TCP и UDP (User Datagram Protocol), которые, используя протокол IP для доставки данных, добавляют ему дополнительные функциональные возможности.

TCP и UDP реализуют различные режимы доставки данных. TCP - это протокол "с установлением соединения". Это означает, что два узла, связывающиеся с помощью этого протокола, "договариваются" о том, что будут обмениваться данными, и принимают некоторые соглашения об управлении потоком данных. UDP, как и IP, - является *дейтограммным протоколом*; т.е. таким, что каждый блок передаваемой информации обрабатывается и распространяется от узла к узлу не как часть некоторого потока, а как независимая единица информации - дейтаграмма.

UDP обеспечивает доставку дейтаграмм, не гарантируя ее выполнение. Этот протокол не поддерживает соединения с удаленным модулем UDP, т.е. является протоколом передачи без установления логического соединения; а потому - более быстрым. Дополнительные средства повышения надежности UDP-передачи могут быть обеспечены на уровне прикладных процессов. В отличие от сетевого протокола IP, доставляющего информацию от узла к узлу, протокол UDP различает приложения и передает информацию от одного приложения к другому.

Место протоколов TCP/IP в системе коммуникационных услуг показано на рис. 4.5.21. На нижнем уровне находятся стандартные покупные средства, например, контроллер и драйвер Ethernet.

Протоколы TCP/IP работают в рамках иерархии, включающей (сверху вниз) при-

кладной, транспортный, межсетевой, сетевой и физический уровни, причем непосредственно к TCP/IP относятся лишь транспортный и межсетевой уровни.

**Прикладной уровень** к протоколам TCP/IP прямого отношения не имеет и представляет собой совокупность прикладных программ и сетевых услуг, совместимых с TCP/IP. Прикладная программа выбирает способ передачи данных (в виде последовательности сообщений или непрерывным потоком) и обращается к транспортному уровню для их доставки.

**Транспортный уровень** (работают протоколы TCP и UDP) организует обмен сообщениями между различными прикладными процессами по типу "точка-точка". Потоки данных делятся на пакеты; каждый пакет отправляется независимо, вместе с адресом назначения, - на более низкий уровень для передачи. Надежность передачи на транспортном уровне обеспечивается контролем ошибок и правильной последовательности пакетов. В случае ошибок пакеты передаются повторно.

На *межсетевом уровне* работает протокол IP, который принимает с транспортного уровня запрос на пересылку сообщения вместе с идентификатором адресата, формирует IP-пакет, устанавливает маршрут по таблице маршрутизации, передает пакет в сетевой интерфейс. Межсетевой уровень также принимает IP-пакеты, обрабатывает их, проверяет правильность, выясняет, следует ли обрабатывать сообщение на месте или ретранслировать дальше.

**Сетевой и физический уровни** реализуют распространение информации на том или ином отрезке среды передачи данных, причем протоколы TCP/IP не накладывают никаких ограничений на программно-аппаратное обеспечение нижних уровней. Это могут быть: Ethernet, модемное двухточечное звено, средства доступа в сети X.25 или Frame Relay.

Несмотря на то, что протоколы TCP/IP разрабатывались вне семиуровневой модели ISO-OSI взаимодействия открытых систем, может быть установлено определенное соответствие уровней протоколов TCP/IP и модели ISO-OSI. Это соответствие проиллюстрировано на рис. 4.5.22. Самое существенное различие архитектур заключается в наборе уровней. У модели TCP/IP полностью отсутствуют сессионный и представительский уровни. Сетевые услуги прикладного уровня TCP/IP реализованы с помощью самостоятельных программных продуктов, называемых приложениями TCP/IP (например, TELNET, FTP, NFS, SNMP, X-Window). Разработка дополнительных сетевых услуг сверх стан-



Рис. 4.5.21. Модель протоколов TCP/IP в системе коммуникационных услуг



Рис. 4.5.22. Соответствие набора протоколов TCP/IP и модели взаимодействия открытых систем

дартных (если они понадобятся для программного обеспечения ГПС) потребует создания дополнительных интерфейсных уровней, повторяющих, в той или иной степени, функции прикладного, представительского и сессионного уровней модели взаимодействия открытых систем. Общая же тенденция по-

строения распределенных систем управления на основе сетей TCP/IP состоит в разработке прикладного программного обеспечения непосредственно над транспортным уровнем. Это позволяет построить более производительную систему вследствие меньшего количества межуровневых переходов.

**Программное обеспечение ГПС.** Спектр задач системы управления ГПС варьируется от простого диспетчирования и снабжения управляющими программами до широкого круга задач, в числе которых планирование, технологическая подготовка производства, диспетчерование, прямое управление отдельными агрегатами и устройствами, диагностика, учет и документирование и т.д.

*Типовым набором функций являются:*

автоматизированное планирование и обеспечение документооборота внутри участка и со смежными службами;

управление комплектацией складов заготовками и приспособлениями, а также автоматической доставкой со складов к каждому станку и обратно;

непосредственное управление станками с ЧПУ и ГПМ;

автоматизированная подготовка, контроль и коррекция управляющих программ;

организация записи, хранения и выдачи управляющих программ;

учет выполнения сменного задания, выдача диспетчерских указаний отдельным единицам оборудования по выполнению сменного задания;

учет состояния оборудования и управление процессами профилактики и обслуживания;

автоматическая коррекция сменного задания в непредвиденных ситуациях;

автоматизированный контроль изделий и обработка результатов измерений;

выдача периодических сообщений в ответ на запросы о ходе производства, состоянии складов и пр.

*Функции планирования включают:* календарное планирование (составление календарных планов, учет материально-производственных фондов); оперативное планирование, или составление расписаний (планирование

эффективной загрузки рабочих мест, запуска оптимальных партий, планово-предупредительного ремонта); динамическое планирование (планирование в реальном времени), т.е. оперативное управление.

В состав системы управления включают подсистему диагностики, которая предназначена для решения следующих проблем: контроля готовности станков и другого оборудования к работе; контроля за исправностью станков и другого оборудования; контроля результатов обработки; оперативного поиска неисправностей при отказах; прогнозирования ресурса работоспособности и предупреждения отказов путем замены ненадежных элементов; поиска и ликвидации отказов и сбоев.

Функции группируют в подсистемы, поддерживаемые соответствующими модулями программного обеспечения. Часть таких модулей не зависит от конкретной реализации ГПС; другая часть поддается настройке под конкретную реализацию; третья группа нуждается в разработке заново при проектировании новой системы.

Вариант выделения подсистем показан на рис. 4.5.23. *Функциональное программное обеспечение* представляет собой комплексный фрагмент, в составе которого задачи реального времени (поддержание информационной модели, оперативное управление) и задачи машинного времени (планирование). *Организационное программное обеспечение*, представленное покупными коммерческими системами, предназначено: для управления заказами на внешние ресурсы, которые должны своевременно поступать в ГПС для обеспечения выполняемых работ (подготовка производства); для ведения отчетности (учет); для слежения за соблюдением правил эксплуатации (контроль). Далее рассмотрено только функциональное программное обеспечение управления в ГПС.



Рис. 4.5.23. Подсистемы программного обеспечения управления в ГПС

Связь задач подсистемы функционального обеспечения показана на рис. 4.5.24. *Календарное (объемное) планирование* осуществляют на год, квартал, месяц, неделю. Цель состоит в том, чтобы обеспечить контроль за обеспечением ресурсами (на уровне склада и накопителей ГПС) технологических процессов, подготовленных к запуску в производство. *Оперативное планирование* называют также составлением расписания.

*Расписание* является краткосрочным прогнозом, достоверность которого падает под действием возмущений: из-за отказов оборудования, из-за необеспеченности ресурсами, из-за внеплановых запусков срочных заданий в производство (т.е. "уплотнения ресурсов"). В этой связи необходим механизм управления в реальном времени, и таким механизмом служит система оперативного управления.

Назначение системы *оперативного управления* состоит в эффективном использовании

ресурсов ГПС для изготовления деталей, запуск которых в производство и приоритет определены расписанием. Назначение системы оперативного управления напоминает функции операционной системы реального времени при управлении вычислительным процессом.

Общая схема работы системы оперативного управления такова. Объектами управления в ГПС могут выступать технологические задания, представленные маршрутами операций. Под операциями понимаются технологические, транспортные и другие процессы, связанные с захватом ресурсов ГПС. Полное множество активных операций находится в поле зрения диспетчера реального времени, который руководит их продвижением. В основе подобного продвижения - запросы операций на ресурсы и удовлетворение этих запросов. Состояние ресурсов динамически отображается в информационной модели ГПС, построенной по типу базы данных.



Рис. 4.5.24. Связь задач подсистемы функционального обеспечения системы программного обеспечения управления в ГПС

Полная информационная модель содержит два раздела: описание материальных ресурсов ГПС; описание технологических процессов как объектов управления. Для описания каждого отдельного ресурса и каждого отдельного процесса можно использовать единый набор атрибутов.

На рис. 4.5.24 отдельные подсистемы функционального обеспечения связаны единым потоком управления, цель которого состоит в оптимальном использовании ресурсов ГПС во времени. Дополнительно на вход каждой подсистемы поступает компонент общего потока заданий, цель которого состоит в установлении плана пространственного (т.е. распределенного по оборудованию) использования ресурсов. Кроме того, существует поток возмущений, влияние которого заставляет подсистему нижнего уровня вносить коррекции в результаты работы подсистемы более высокого уровня по каналу обратной связи.

Принципиально важным является двухуровневое построение системы оперативного управления, включающее управление гибкими модулями и внутримодульное управление. При этом на верхнем уровне оперативного управления можно отвлечься от физических особенностей конкретного оборудования, что делает систему управления на этом уровне инвариантной к составу оборудования. Система оперативного управления рассматривает запросы технологических процессов на ресурсы и, следуя некоторой дисциплине удовлетворения этих запросов, формирует директивы, изменяющие состояния ресурсов. При этом существует и непрерывно обновляется динамический образ процессов и ресурсов.

Для поддержания информационных моделей ГПС и ГПМ разрабатывают базы данных с учетом требований, предъявляемых задачами оперативного управления технологическими процессами в реальном времени. База данных должна иметь проблемно-ориентированный внешний язык описания данных для формирования информационных моделей ГПС и ГПМ.

*Информационная модель* представлена двумя разделами: разделом материальных ресурсов; разделом технологических процессов. В каждом разделе описание выполняется в терминах объектов, а также и атрибутов, привязанных к объектам. Базовым понятием первого раздела является информационный *объект- и субобъект-ресурс*. Базовым понятием второго раздела является информационный *объект-процесс*. В каждом разделе описание состоит из следующих этапов: описание типов объектов; описание имен объектов; описание типов субобъектов; описание типов атрибу-

ных записей, привязанных к каждому типу объекта.

Объекты-ресурсы могут быть активными, т.е. располагающими одной или несколькими собственными системами управления с сетевым доступом. Такие объекты-ресурсы называются *модулями*. Модули приспособлены к выполнению одной из следующих главных (не обязательно единственных) операций: основной технологической, хранения, транспортной, ввода-вывода. Примерами модулей могут быть: модуль обработки, модуль контроля, модуль хранения палет, модуль хранения инструментов, модуль транспортирования, модуль ввода-вывода.

Для определения состава технологического оборудования ГПМ введено представление о *субобъектах-ресурсах* (субмодулях), которые выделяются по принципу единственной (не обязательно главной) операции, выполняемой в ГПМ из того же списка операций. Примерами субмодулей являются: порт (для связи транспортной системы модуля с транспортной системой ГПС); накопитель палет, буфер или робот (как устройство, выполняющее в модуле функции внутреннего транспортирования); инструментальный магазин станка; инструментальный магазин модуля; инструментальный робот (для перегрузки инструмента между инструментальными магазинами станка и модуля); накопитель инструментальных магазинов (в случае сменных магазинов); станок; моечная станция; контролирующая станция; сборочная станция; стружконакопитель и др.

Объекты-ресурсы могут быть также пассивными, т.е. не имеющими собственных или разделяемых систем управления. Такие объекты-ресурсы называются *предметами*. Примерами предметов могут послужить: палета, приспособление, режущий инструмент, измерительный инструмент, инструментальная кассета, инструментальный магазин. В разделе объектов-ресурсов описанию подлежат только те предметы, которые постоянно принадлежат ГПС вне зависимости от поступающих конкретных заданий. Режущий инструмент является ресурсом лишь в том случае, если он находится в ГПС в качестве резерва для замены инструментов-процессов, применяемых в обработке детали. Аналогично приспособления являются ресурсами лишь в том случае, если они находятся на складе ГПС и готовы для сборки комплектов для базирования деталей на палетах. При вовлечении режущих инструментов и приспособлений в производство (замена сломанного инструмента, сборка комплектов приспособлений) эти предметы качественно переходят в группу объектов-процессов.

Как модулю, так и предмету сопоставлен единый набор типов атрибутивных записей из числа следующих: статус, полный статус, структура хранения, координата, планируемая координата, паспорт, паспорт неисправностей. Все данные, составляющие атрибутивную запись, должны быть функционально однородными и получены одновременно с одной скоростью доступа за одну транзакцию.

*Статус* является комплексным описанием динамически изменяющихся состояний. Статус содержит информацию, требующую наиболее быстрого доступа.

*Полный статус* определяется для модулей и включает в себя все статусы субмодулей.

*Структура хранения* описывает свойства объекта-ресурса, связанные с хранением предметов, и представляет собой вектор имен хранимых предметов. Размерность вектора соответствует числу позиций хранения. Для модулей структура хранения объединяет несколько векторов, каждый из которых описывает свойство хранения отдельного субмодуля.

*Координата* и *планируемая координата* определяются для перемещаемых в пространстве объектов-ресурсов, причем планируемая координата относится к месту назначения объекта-ресурса.

*Паспорт* содержит перечень внешних (заводских) определений, технических характеристик объекта и статистической информации. Первое поле паспорта является ключевым для поиска по внешнему имени (например, для инструмента таким внешним именем является заводской код). Таким образом, паспорт выполняет также функции связи внутренних имен, с которыми оперирует система управления, и внешних имен, соответствующих заводскому кодированию.

*Паспорт неисправностей* служит для накопления информации о неисправностях активных объектов-ресурсов.

Объекты-процессы делятся на две группы: задания и обеспечение. К *заданиям* относится группа объектов-процессов, описывающих в совокупности объект управления в ГПС: партия, сменно-суточное задание (на каждый модуль обработки и модули ввода-вывода), комплект маршрутов, маршрут, деталеоперация. К *обеспечению* относится группа объектов-процессов, описывающих информационное и материально-техническое обеспечение каждого шага (операции) технологического процесса: программа ЧПУ, комплект режущего инструмента, комплект измерительного инструмента, комплект приспособлений, деталь, режущий инструмент, измерительный инструмент, приспособление. Под шагом (операцией) технологического процесса понимается полная совокупность действий,

выполняемых под эгидой одного модуля (любого).

Каждому объекту-процессу сопоставлен определенный набор типов атрибутивных записей из числа следующих: статус, координата, планируемая координата, структура, паспорт. Смысл каждого из атрибутов остается прежним. Однако содержательно атрибуты объектов-процессов имеют собственную специфику.

Проблема оперативного управления в ГПС - это проблема взаимодействия технологических и вспомогательных рабочих процессов - с одной стороны и ресурсов ГПС - с другой стороны.

Параллельно работающие процессы представляют собой последовательности операций - транспортных, технологических, ввода-вывода, хранения. Последовательности операций образуют маршруты. Каждая операция претендует на ресурсное обеспечение; и если необходимые ресурсы (включая обеспечение операции) выделены, то операция выполняется, т.е. маршрут продвигается на один шаг. Существуют очереди к отдельным ресурсам; работа системы оперативного управления состоит в анализе запросов на ресурсы и их удовлетворении.

Таким образом, маршруты операций могут стать прямыми объектами оперативного управления (под операцией понимается укрупненная часть маршрута, связанная с захватом очередного модуля). Помимо модулей операции предъявляют запросы и на другое ресурсное обеспечение. Ядром системы оперативного управления служит *диспетчер*, который на основе данных информационной модели составляет очереди к ресурсам, привлекает к управлению очередями некоторую дисциплину, принимает решение о закреплении ресурсов за операциями.

Во входном интерфейсе системы оперативного управления, принимающем задание на управление, - могут быть выделены два информационные потока. Один из них связан с планированием ресурсов ГПС во времени: это расписание во всевозможных модификациях. Другой же поток осуществляет пространственное планирование шагов заданий, в качестве которых выступают операции. Этот второй поток в том или ином варианте представляет собой *план технологического процесса*. Оба информационных потока вполне независимы, но могут найти свое отражение и во всякого рода смешанных входных документах. В любом случае какой-то из этих двух потоков может быть принят в качестве первичного (т.е. главного), и это определяет саму концепцию управления. Таким образом, возможны две ситуации: 1) основным является расписа-

ние; 2) основным является план технологического процесса.

Если в качестве основного потока принято расписание (которое приобретает в этом случае характер управляющей программы ГПС), то функции оперативного управления сводятся к управлению коллективом технологических алгоритмов, отраженных в управляющих программах ЧПУ. Соответствующей станет и цель оперативного управления: своевременная инициация управляющих программ ЧПУ согласно расписанию с одновременным разрешением всех коллизий, вытекающих из необходимости взаимодействия программ или из-за их притязаний на одни и те же ресурсы. Если основными полагаются планы технологических процессов, то функции оперативного управления сосредотачиваются на обеспечении распределенными ресурсами (т.е. модулями), выделенных из планов технологических процессов (т.е. маршрутов) шагов заданий (т.е. операций). Математической моделью управления в этом случае будет система массового обслуживания, а само управление проявится в ведении очередей.

Пусть в качестве основного информационного потока приняты именно планы технологических процессов. Они представляют собой множество заданий (маршрутов), выполнение шагов (операций) которых связано с захватом модулей. Шаги заданий становятся объектами системы оперативного управления, для которой предметом анализа будут отношения шагов заданий к модулям, а не их отношения между собой. Шаги заданий первичны, а программы ЧПУ, связанные с их использованием, - вторичны.

Для системы оперативного управления шаги заданий существуют в их состояниях. К каждому модулю могут быть созданы очереди готовых, задержанных, приостановленных, ожидающих шагов. Чтобы модуль не простаивал, должна быть по крайней мере непустой очередь готовых. Очередь задержанных создает определенный резерв, и может оказаться полезным также поддерживать ее непустой. Очередь приостановленных возникает при отказе модуля или запуске внеочередных заданий.

Очередь готовых должна быть выстроена согласно расписанию. При этом имеют значение не абсолютные метки времени запуска шага задания на модуле, а отношения предшествования. Если фактическая структура очереди готовых не отвечает расписанию, оно должно быть перерасчитано.

Одна из модификаций этого метода, рассмотренная далее, указывает на способ организации размещения и движения очередей. Для ГПС вводят понятие *места*, которое принадлежит одному из таких типов: входное

место ГПС, выходное место ГПС, место в локальном накопителе ГПС, место на складе, входное место ГПМ.

Все места имеют свое имя, а каждое конкретное место пребывает в одном из трех состояний: 1) свободно; 2) зарезервировано и не занято; 3) зарезервировано и занято.

Переходы между свободным и занятым состояниями представляют собой *события*: таким образом, основных событий два: 1) место занято; 2) место свободно.

Работа системы оперативного управления состоит: в получении сообщений о событиях; в обработке сообщений; в формировании команд, содержанием которых являются директивы относительно смены мест. Попадание во входное место модуля означает передачу управления системе нижнего уровня для выполнения очередного шага задания.

Если занято входное место ГПС, тогда выполняются действия: для детали определяется следующая операция и выбирается подходящий ГПМ; устанавливается имя очереди к накопителю ГПМ, а сама деталь включается в эту очередь; определяется целевое место детали; управление передается транспортному модулю. Если занято входное место модуля, тогда деталь исключается из очереди к ГПМ, а управление передается системе нижнего уровня (т.е. системе самого ГПМ). Если занято место в локальном накопителе ГПС, тогда выполняются действия: при выполненной операции для детали устанавливается признак следующей операции; при завершении маршрута операций деталь включается в очередь к выходному месту; при незавершении маршрута выбирается подходящий ГПМ и осуществляются такие же действия, как и при занятии входного места; при невыполнении текущей операции деталь включается в очередь к ГПМ. Если занято место на складе, тогда выполняются действия: определяется очередная операция и деталь включается в соответствующую очередь к ГПМ; если же маршрут завершен, то деталь попадает в очередь к выходному месту. Если занято выходное место, тогда деталь исключается из соответствующей очереди.

Если освобождается входное место ГПС, тогда формируется заявка на ввод в ГПС очередной детали. Если освобождается входное место ГПМ, тогда формируется заявка на продвижение очереди к ГПМ. Если освобождается входное место в локальном накопителе ГПС, тогда формируется заявка на использование этого места модулями ГПС. Если освобождается место на складе, тогда осуществляется поиск деталей, имеющих неопределенное целевое место, а управление передается транспортному модулю. Если освобождается

*выходное место*, тогда формируется заявка на продвижение соответствующей очереди.

**Программное обеспечение сетевого узла ГПС.** Узлом ГПС служит ГПМ, система управления которого управляет субмодулями: технологическим, транспортным, хранения, ввода-вывода. Центральная роль в управлении принадлежит системе ЧПУ, которая, при соответствующей реализации, может взять на себя все функции управления субмодулями ГПМ. Мощные системы ЧПУ относятся к классу персональных с открытой архитектурой, - PCNC (Personal Computer Numerical Control). Системы PCNC приходят на смену всем другим, относящимся к предыдущим поколениям.

Концепция PCNC складывается под влиянием: резкого повышения доли специального технологического оборудования, ориентированного на определенную или групповую технологию; необходимости внедрения в системы управления "know-how" конечного пользователя, а также необходимости учета его представлений о дизайне экрана и структуре диалога; необходимости модульной комплектации систем управления с целью оптимизации их стоимости и возможности эволюции как у производителя, так и у конечного пользователя; острой необходимости сокращения сроков переноса программного обеспечения при переходе на новую базовую платформу; общего роста привлекательности систем ЧПУ типа PCNC, поддерживающих такой стиль управления, который соответствует работе на компьютере.

При разработке программного обеспечения производители современных систем ЧПУ используют технологию объектно-ориентированного программирования, без которой невозможно создание программного обеспечения в объеме многих мегабайт. При этом объектно-ориентированный подход используют не только на уровне технологии программирования (для повышения надежности и обзорности математического обеспечения), но и на уровне макропроектирования системы. Это означает, что основные прикладные модули системы ЧПУ определяются как *вложенные объекты* (embedded objects) со стандартизованным прикладным интерфейсом API (Application Interface), а отношения между объектами организуют по клиент-серверной схеме. При этом каждый объект-модуль является сложной объектно-ориентированной структурой и отражает глобальный объектно-ориентированный подход при проектировании системы управления. Одним из вариантов общего построения системы ЧПУ типа PCNC является выделение глобального сервера - *программно-аппаратной шины*, которая служит

основным средством междоузелной коммуникации в системе. Наиболее современным способом построения сервера является реализация программно-аппаратной шины в виде *объектно-ориентированной магистрали*.

*Объектно-ориентированная магистраль* поддерживает программно-аппаратные коммуникационные протоколы, а, кроме того, выполняет прикладные серверные функции благодаря специальной объектной оболочке. Это означает, что объектно-ориентированная магистраль служит единым механизмом предоставления информационных услуг объектам-модулям. Такая возможность отражена и в самих интерфейсах объектов-модулей: они могут предоставлять данные, или запрашивать данные, или давать и то, и другое.

Все объекты-модули, подключенные к общей объектно-ориентированной магистрали, могут запрашивать данные синхронным, асинхронным способами или по событию. Выбор механизма запроса зависит от характера запрашиваемой информации. При *синхронном запросе*, клиент (т.е. модуль, осуществляющий запрос) останавливается в точке запроса и ждет ответа от модуля, обслуживающего запрос, до истечения тайм-аута. При *асинхронном запросе* клиент продолжает свою работу, а обработка ответа, независимо от времени его получения, выполняется специальной функцией (callback-function). *Запрос по событию* (синхронный, асинхронный) означает, что ответ будет получен только после изменения данных.

Открытая архитектура систем ЧПУ типа PCNC предоставляет важные функциональные возможности: возможность конфигурирования системы у станкостроителя и конечного пользователя; возможность встраивания коммерческих программных пакетов; возможность непрерывной эволюции системы в условиях максимальной независимости от изменений базовой платформы; возможность доступа к информации о состоянии любого программного модуля системы, а также к диагностической информации аппаратуры, приводов и управляемого объекта в целом.

Возможность конфигурирования распространяется на выбор пользователем собственного диалога с системой; на дизайн многооконного экрана как на основе библиотечной *галереи стилей*, так и на основе собственных *экранных управляющих элементов* (control elements); на настройку системы на любую версию языка управляющих программ; на включение новых алгоритмов интерполяции (например, сплайновой интерполяции в реальном времени) и использование любой комбинации алгоритмов в многокоординат-

ном пространстве; на включение системы в локальную сеть.

В целом, структура системы ЧПУ обусловлена необходимостью решать традиционные задачи управления:

*геометрическую* (обеспечивающую, в конечном счете, управление следящими приводами станка с целью получения детали с заданной геометрией);

*логическую* (организующую управление электроавтоматикой станка и других субмодулей ГПМ);

*технологическую* (гарантирующую поддержание необходимых параметров технологического процесса или оптимизацию процесса);

*диспетчеризации* (обеспечивающую управление на прикладном уровне четырьмя предыдущими задачами в реальном времени);

*терминальную* (поддерживающую диалог с оператором, отображение состояния системы; разработку, верификацию и хранение управляющих программ).

Особо гибкие и сложные системы ЧПУ типа PCNC, ориентированные на многокоординатную, многостаночную, высокоскоростную, высокоточную обработку или на управление ГПМ, выполняющей согласно двухкомпьютерной архитектурной модели. В более простых случаях возможен однокомпьютерный архитектурный вариант. Оба варианта располагают *PC-подсистемой* и *NC-подсистемой*.

*Двухкомпьютерная модель* предполагает размещение PC-подсистемы на обычном PC-компьютере, а NC-подсистемы - на другом NC-компьютере. Вторым компьютером может быть традиционный, оснащенный дополнительными специальными устройствами, или компьютер на базе RISC-процессора. В PC-подсистеме целесообразны операционные системы Windows NT или Windows 95, а в NC-подсистеме - операционная система UNIX. Эти операционные системы поддерживают коммуникационные протоколы TCP/IP, и это позволяет организовать коммуникационную среду, объединяющую две подсистемы. Включение в эту среду некоторого прикладного уровня с функциями доступа к интерфейсам модулей (а общее число таких функций может достигать нескольких сот) создает виртуальную шину, оказывающую низкоуровневые услуги доступа. Объектная надстройка над этой шиной формирует упомянутый выше глобальный сервер - единую для обеих подсистем объектно-ориентированную магистраль.

*Однокомпьютерная модель* предполагает использование обычного PC-компьютера, оснащенного специальными устройствами в виде плат-контроллеров. В их числе могут

быть: контроллер приводов подачи (например с SERCOS-интерфейсом), программируемый контроллер (например, с InterBus-интерфейсом), специфичные устройства для управления технологическим процессом и т.д. Нижний уровень однокомпьютерной системы составляет компьютерная аппаратура, выше размещается операционная система (Windows NT, Windows 95) вместе со службами (VxD, VxWorks), обеспечивающими управление контроллерами внешних устройств.

Оба архитектурных варианта соответствуют принципам открытой архитектуры применительно к ЧПУ, означающим: четкое разграничение между системным, прикладным и коммуникационным компонентами; возможность независимого развития любого из этих компонентов как на основе оригинальных разработок, так и путем встраивания коммерческих программных систем; клиент-серверную организацию взаимодействия подсистем; стандартизацию интерфейсов и транзакций.

Одна из ключевых проблем системы ЧПУ типа PCNC с открытой архитектурой состоит в необходимости настройки на любую версию языка управляющих программ, контуры которого определены в стандарте DIN 66025. Подобную настройку осуществляет специализированный модуль, ISO-процессор, который интерпретирует G-функции языка ISO-7bit управляющих программ, так как если бы они были машинными кодами.

#### 4.5.3. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ГПС

Создание всякого нового механизма, станка или ГПС является чрезвычайно сложным процессом и включает в себя многие мероприятия от составления технического задания до запуска в серию (рис. 4.5.25). Основные этапы (стадии) проектирования и изготовления механизмов и машин регламентированы ЕСКД. Разделение процесса проектирования на последовательные этапы является в известной мере условным, поскольку в процессе проектирования пересматривают и уточняют ранее принятые решения.

Процесс проектирования механизма и, тем более, нового станка или ГПС всегда является результатом творческого труда большого числа высококвалифицированных специалистов.

Ниже прокомментированы основные этапы (рис. 4.5.25) проектирования новых механизмов, станков и ГПС.

**Техническое задание (ТЗ)** обосновывает те новые качества, которыми должны обладать проектируемые механизмы и машины, и является итогом предпроектной подготовки:

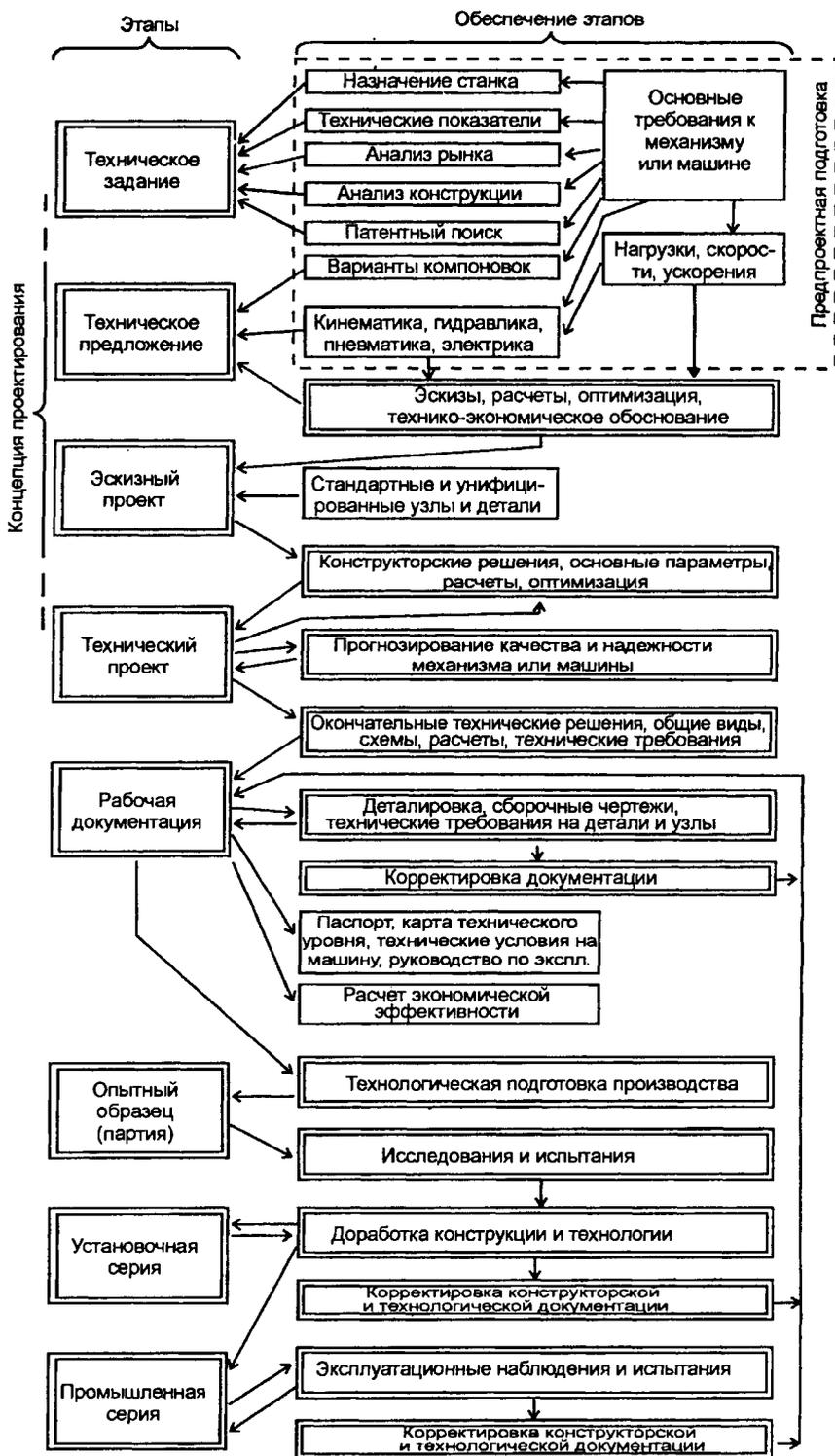


Рис. 4.5.25. Основные этапы проектирования новых механизмов, станков и ГПС

устанавливает основное назначение проектируемых механизма или машины; обосновывает целесообразность их создания; регламентирует все основные технические характеристики.

*Исходные данные для проектирования* практически невозможно собрать и обработать без применения компьютерной техники. Основой для исходных данных служат: 1) сравнительный анализ характеристик и параметров большого числа механизмов и машин, подобных проектируемым; 2) данные конъюнктуры рынка; 3) оценка реальных возможностей предприятия-изготовителя. Для всего этого необходимо иметь специальные и постоянно расширяющиеся базы данных, а также систему микрофишей, на которых приведены общие виды схожих механизмов, станков и ГПС, выпускаемых различными фирмами.

*Основными показателями*, которые в определенном отношении гарантируют сбыт, являются *цена и характеристики работоспособности*. В немецком языке для этого существует весьма емкий и удобный термин "Preisleistung" (Preis - цена; Leistung имеет три значения - работоспособность, мощность, производительность). Работа по определению "Preisleistung" ведется всеми ведущими фирмами непрерывно как в отношении имеющейся на рынке продукции, так и продукции, которая должна выпускаться. Фирма показывает только конечный результат этой работы обычно в виде ежемесячного бюллетеня, в котором определены перспективные для сбыта направления в разработке новых конструкций. Расставлены приоритеты проектирования путем простановки соответствующих коэффициентов (обычно весовых) на параметры и характеристики станков. Учитывается, сколько станков какой конструкции продано, каков резерв по рынку, оценены потенциальные возможности на будущее и т.д. Работа чрезвычайно трудоемкая, выполняется большим штатом сотрудников и совершенно невозможна, даже просто неосуществима без активного использования компьютерной техники.

Техническое задание обосновывает техническую и экономическую целесообразность проектирования новых механизмов, станков и ГПС.

*Техническая целесообразность*, как правило, вызвана появлением новых материалов, или новых технологических процессов, или принципиально новых технических решений.

*Экономическая целесообразность* обычно обоснована существенным повышением производительности, либо экономией энергоресурсов, либо увеличением универсальности

или пригодностью использования проектируемого механизма в станках нового поколения, а станков в ГПС. Во всех случаях ТЗ должно содержать тщательное экономическое обоснование предполагаемой эффективности проектируемого оборудования. Проектируемые объекты должны иметь более высокие технико-экономические показатели по сравнению с существующими.

**Концепция проектирования** разрабатывается после того, как сформулированы исходные данные и определены основные приоритеты проектирования (см. рис. 4.5.25). Разработкой концепции занимается небольшая по численности группа конструкторов высшей квалификации. Работа группы базируется на активнейшем использовании вычислительной техники, владении всеми необходимыми методами расчетов, на накопленных банках данных с конструкциями станков, их узлов, агрегатов и систем станков. Это позволяет иметь результатом принятия концепции если не конструкцию станка или состав ГПС, то, по крайней мере, определить их компоновку, габариты и самые основные характеристики и параметры.

При разработке концепции необходимо учитывать все возможные налагаемые на конструкцию ограничения (функциональные, технологические, эксплуатационные, эргономические и др.). На стадии принятия концепции осуществляется выбор схем, конструктивных элементов и основных параметров проектируемого механизма, станка или ГПС, в наилучшей мере обеспечивающих требуемые выходные характеристики, отвечающие целевому назначению.

После принятия технических решений по схемам, узлам, агрегатам и системам проектируемых станков (техника CAD/CAM\* позволяет просмотреть все эти вопросы очень глубоко, вплоть до мелких деталей) конструкторские разработки на уровне концепций поступают в группы, занимающиеся проектированием различных модификаций станков и их конкретными узлами и системами. Группы работают в единой концепции, пользуясь общими для всех файлами и базами данных.

**Техническое предложение:** формулирует принятую концепцию, уточняя и развивая техническое задание; состоит из совокупности конструкторских документов, необходимых для дальнейшего проектирования; обеспечивает и уточняет технические характеристики проектируемого станка и диапазоны эксплу-

\* CAD/CAM: CAD - "Computer Aided Design" (проектирование с помощью компьютера); CAM "Computer Aided Manufacturing" (изготовление с помощью компьютера).

тационных нагрузок и скоростей. Здесь выбирают окончательный вариант компоновки станка и ГПС, их узлов и агрегатов, пользуясь результатами анализа, синтеза и оптимизации вариантов компоновок. Разрабатывают принципиальные схемы: структурную, кинематическую, гидравлическую, пневматическую, электрическую и др. Принимают тип и характеристики системы управления. Определяют общие габаритные размеры.

Техническое предложение дает полное представление о компоновке и возможностях проектируемых механизмов станков или ГПС.

**Эскизный проект** содержит предварительную конструкторскую проработку всех основных узлов и является развитием технического предложения. Базируется на анализе различных конструкторских решений, результатах расчетов, оптимизации важнейших параметров и характеристик машины.

При конструировании станков и ГПС, их узлов и систем следует максимально использовать стандартные и унифицированные детали, механизмы и элементы, что удешевляет проектируемую машину.

Каждое конструкторское решение должно быть обосновано результатами расчетов, рассмотрено с точки зрения обеспечения качества и надежности функционирования проектируемого станка, технологичности изготовления и сборки, удобства эксплуатации, ремонтопригодности и т.д.

**Технический проект:** включает окончательную конструкторскую проработку всех узловых чертежей, схем станков и их общих видов; проводят все виды уточненных и поверочных расчетов, оптимизируют все необходимые параметры узлов и систем станков, окончательно определяют их эффективность; прогнозируют выходные характеристики и оценивают надежность станков с учетом вероятностной природы режимов их эксплуатации; должен содержать все исходные данные, необходимые для разработки комплекта тех-

нической документации на проектируемый механизм, станок или ГПС. Технический проект согласовывают и утверждают в установленном порядке.

**Разработка рабочей документации** - завершающий этап проектирования. Включает разработку рабочих чертежей всех оригинальных деталей и протановку технических требований на их изготовление, составление технологической документации, корректировки (в случае необходимости) технического проекта, составление спецификаций оригинальных и покупных комплектующих деталей, формирование паспорта станков и ГПС, карты технического уровня, инструкции по эксплуатации и ряда других документов. Рабочая документация должна содержать все данные, необходимые для изготовления проектируемых станков и ГПС. Выпуск рабочей документации существенно упрощается при применении САПР.

После завершения разработки комплекта рабочей документации осуществляется технологическая подготовка производства (см. рис. 4.5.25) и последующие этапы изготовления и отладки спроектированных станков и ГПС. В ряде случаев для сокращения сроков выпуска новой техники технологическую подготовку производства начинают заранее, до завершения выпуска комплекта рабочей документации. Значительно сокращает сроки подготовки производства применение техники CAD/CAM.

**Логика проектирования** заключается в определенной последовательности операций при проектировании и во взаимосвязях между этими операциями. На каждом этапе проектирования используют те или иные методы проектирования. Конструктор многократно выполняет последовательность действий: синтез - анализ - принятие решения, - которую принято называть *основной проектной процедурой* (рис. 4.5.26).

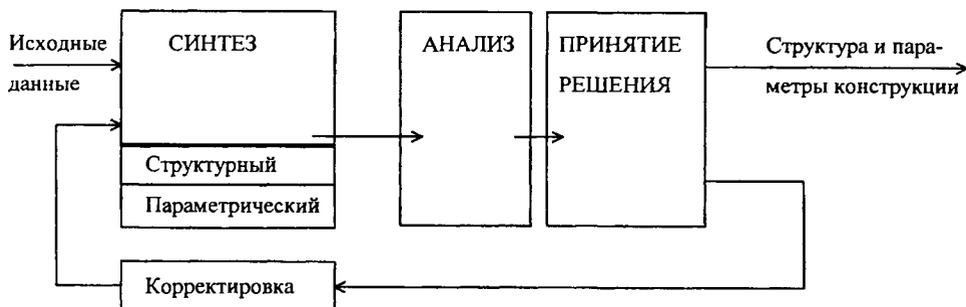


Рис. 4.5.26. Основная проектная процедура

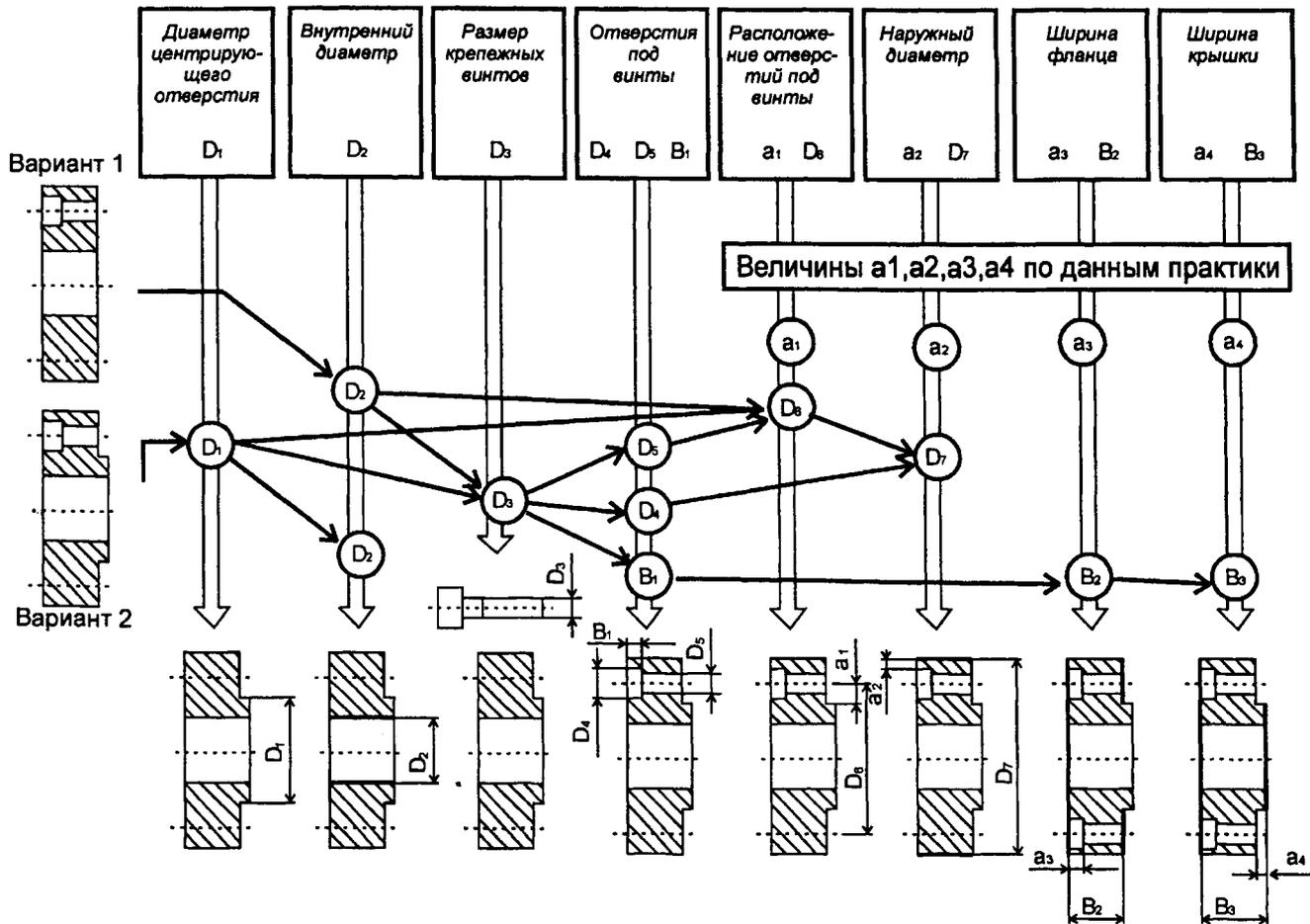


Рис. 4.5.27. Логика процесса конструирования фланца подшипника

Проектирование включает эвристические и алгоритмические операции. Доля последних увеличивается по мере уточнения проектных решений. Основным обстоятельством, определяющим долю творческой деятельности, является неопределенность проектных параметров. Эта неопределенность максимальна на начальных стадиях проектирования.

Логика проектирования имеет место не только при проектировании механизмов, станков и ГПС, но и при разработке отдельных деталей, когда реализуются все основные принципы проектирования, изложенные ниже. Примером может служить изображенная на рис. 4.5.27 логика процесса проектирования фланца подшипника.

Основополагающими принципами, обеспечивающими решение задачи проектирования, являются **последовательность** и **итерационность**. Последовательность заключается в строгой очередности выполнения этапов проектирования механизма или машины, а итерационность - в корректировках проектных решений, полученных на предыдущих этапах проектирования, исходя из результатов, полученных на последующих этапах.

**Модульный принцип** проектирования состоит в максимально возможном использовании однотипных узлов (или элементов узлов) при проектировании семейства станков различного целевого назначения, входящих в состав ГПС. Базируется на активном использовании компьютерной техники и проявляется тогда, когда уже имеется достаточно четкое представление о семействе проектируемых станков. Применение модульного принципа при проектировании одного механизма или одного станка бессмысленно и невозможно. Только в случае разработки семейства станков и использовании при этом ограниченного числа готовых узлов, последние становятся модулями. Модули являются следствием принятого технического решения, ибо в принципе проектировать можно так, что узлы одного назначения не будут даже отдаленно похожи друг на друга.

Модули различают *производственные* (применяемые без каких-либо изменений в машинах различного целевого назначения), *технологические* (отличающиеся в основном технологией изготовления и незначительными конструкторскими изменениями, относящимися, как правило, к местам крепления узлов, например: правый-левый, верхний-нижний, передний-задний и т.п.) и *конструкционные* (имеющие конструкционное подобие, но различные размеры).

Современное техническое обеспечение САПР позволяет легко получать зеркальные

изображения узлов (технологические модули) с минимальными затратами труда и времени. Несколько сложнее получают конструкционные модули, так как при их проектировании необходимо одновременно выполнять требования соблюдения размерных рядов и максимально возможной унификации.

При использовании модульного принципа проектирования на уровне принятия концепции должен быть решен вопрос о *критерии целесообразности* окончания модульного принципа для проектируемого семейства машин. Модули, используемые в последующих разработках, переходят в категорию унифицированных узлов.

**Принцип унификации** связан с применением в семействе проектируемых механизмов или станков унифицированных сборочных единиц (узлов, подузлов, агрегатов), деталей (оригинальных и стандартных), комплектующих.

Как показывает опыт автоматизированного проектирования, применение типовых унифицированных деталей нецелесообразно. Значительно выгоднее иметь большое количество макросов и большие заделы в банках данных по модификациям и унифицированным узлам, что позволяет избежать излишней детализации конструкторских разработок. Информацию об унифицированных деталях, узлах и системах целесообразно хранить на микрофишах систематизированно по группам.

**Принцип соответствия** выбора номенклатуры и величины выходных характеристик — целевому назначению проектируемых машины или механизма. Чем ответственнее проектируемый объект, тем большее число выходных характеристик и параметров объекта регламентируется, и тем более жесткие требования к ним предъявляются. Например, вероятность безотказной работы станков принимается в пределах 0,95 ... 0,99, а самолетов - 0,99999.

Другой пример: число установленных и проверяемых выходных параметров точности станка при высоких требованиях к точности обрабатываемых деталей может достигать 20-30, в то время как для станков нормальной точности достаточно регламентировать 8-10 показателей. Основная цель регламентации выходных параметров станка - обеспечить погрешность обработки, которая находилась бы в установленных пределах в течение всего периода его эксплуатации.

Во всех случаях проектировщику необходимо помнить, что соответствие выходных характеристик механизма или станка их целевому назначению в первую очередь определяет общая компоновка, принимаемая на концептуальном уровне.

**Принцип компромиссов.** Проектирование - это непрерывная цепь компромиссов, которые приходится принимать на всех стадиях создания механизма или станка. Например, стремление к увеличению частоты вращения шпиндельных узлов всегда приводит к увеличению тепловыделения в опорах, которое ограничено, и принятие окончательного решения всегда требует компромисса.

Улучшение любой технической характеристики станка (точности, скорости, надежности, производительности и др.) неизбежно вызывает увеличение его стоимости, трудоемкости изготовления, часто требует другого уровня обслуживания и повышения культуры эксплуатации, что всегда приводит к компромиссным решениям.

Тенденция современных машиностроительных производств к концентрации операций постоянно требует от проектировщика решения задачи рационального сочетания технологических возможностей и усложнения конструкции оборудования. Избыточность технологических возможностей может быть не оправдана экономически.

Увеличение надежности машины почти всегда сопровождается ее усложнением и удорожанием. Выбор опор и направляющих, обеспечивающих незначительный износ, применение новых материалов, специальных покрытий, смазок, термической обработки, повышает трудоемкость и стоимость. Далеко не всегда ясно, что экономически целесообразнее: удорожать станок изначально, либо совершенствовать систему обслуживания и ремонта в период эксплуатации. Компромисс заключается в обеспечении надежности в первую очередь наиболее ответственных деталей и узлов станка.

**Принцип преемственности.** Практически любые станки, входящие в состав ГПС, являются продуктом эволюции и в них всегда имеются элементы, детали и узлы, уже разработанные ранее. Соблюдение преемственности является одним из эффективных путей снижения затрат и сокращения сроков создания ГПС.

Хорошо отработанные элементы и узлы нет нужды заменять, и в одном станке прекрасно могут сосуществовать "новое" и "старое". Изыскание новых принципов построения станков и ГПС не является, как правило, задачей конструирования.

*Суть проектирования - обеспечение требуемых характеристик станков и ГПС, а не погоня за оригинальностью.* Конструкторская преемственность не является чем-то внешним для процесса проектирования и определяемым только индивидуальными особенностями конструктора, хотя от этих качеств зависит

многое (как правило, чем моложе проектировщик, тем с большей легкостью он отходит от традиционных решений). Преемственность определяется самой логикой последовательного развития машин. Модернизация, систематическое совершенствование позволяют поддерживать показатели выпускаемых машин на уровне постоянно возрастающих требований в течение определенного времени без коренной переработки конструкции. Например, ведущие автомобильные фирмы выпускают принципиально новую модель только раз в 8-10 лет, соответственно обновляя и технологическое оборудование.

Вопрос заключается в том, как наиболее рационально сочетать новое со старым. Это зависит как от качества отработки отдельных проектных решений (стоит ли заменить), так и от уровня технологической подготовки производства (может ли заменить). На этом пути существует две основные опасности: 1) консерватизм, влекущий за собой добровольный отказ от творческого поиска и приводящий к необъективной критике новых решений и отказу от них, и 2) психологическая инерция, ослабляющая самоконтроль, в результате чего конструктору очень трудно отрешиться от своего решения, так как он находится в плену идеи.

Преемственность при проектировании имеет несколько аспектов:

приверженность фирм к определенным, отработанным годами решениям (компоновки, конструкции узлов, дизайн и т.п.). Это то, что определяет "почерк" фирм и они весьма неохотно расстаются со своими, ставшими традиционными решениями, часто связанными с "know how" и иногда даже носящими названия фирм;

индивидуализация конструкций станков и ГПС не должна распространяться на все элементы и узлы. Модули могут и должны использоваться для различных моделей;

конструктивная преемственность дает возможность увеличить эффективность разработок за счет использования модулей и унифицированных элементов и узлов;

степень заимствования определяется на концептуальном уровне и зависит от возможности принятия своих и чужих технических решений в неизменном или модифицированном виде; реальных возможностей проектировщика, определяемых квалификацией, сроками и другими обстоятельствами; научно-технического задела по проблемам для проектируемой ГПС.

**Математическое моделирование** является основой основ проектирования механизмов и машин. Моделирование в процессе проектирования с внедрением САПР получило прин-

ципиально новые возможности: за существенно меньшее время стало возможным сравнить значительно большее число вариантов конструкции.

Полнота и адекватность математических моделей определяет достоверность оценки выходных характеристик и параметров проектируемых механизмов и машин, а также возможность их оптимизации и прогнозирования с учетом вероятностной природы эксплуатационных нагрузок и происходящих в машинах процессов.

*Модель объекта проектирования* в общем виде представляет уравнение функционирования механизма или машины:

$$\bar{y} = \bar{Y}(\bar{P}, \bar{X}),$$

где  $\bar{P}$  - вектор внешних и внутренних воздействий;  $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  - вектор структурных и параметрических переменных объекта проектирования;  $\bar{Y}$  - вектор выходных параметров объекта.

По выходным параметрам объекта проектирования вычисляют вектор качества объекта проектирования  $\bar{y}$ , который сравнивают с регламентированным значением  $[\bar{y}]$ :  $\Delta\bar{y} = [\bar{y}] - \bar{y}$ . Знак и величина составляющих вектора  $\Delta\bar{y}$  определяют качество и надежность объекта проектирования.

В любом случае подробность и точность выбираемой или составляемой математической модели должны находиться в соответствии с заданным качеством объекта. Излишняя подробность модели приводит к неоправданному увеличению машинного времени, недостаточная - к неправильному результату. Весьма желательна проверка адекватности принятой модели.

*Вероятностный подход к моделированию* определяется тем, что на любой станок в составе ГПС в процессе эксплуатации действует большое число внешних и внутренних факторов. Не всегда факторы действуют одновременно и не все следует или можно учитывать при проектировании. Но каждый из них является случайной величиной или случайной функцией. Поэтому наиболее полным и достоверным подходом к оценке качества и надежности механизмов и машин является вероятностный подход.

Реализовать вероятностный подход при проектировании можно двумя основными путями: созданием вероятностных моделей механизмов, станков и ГПС или используя их детерминированные модели в сочетании со статистическим моделированием. Первый

путь сложен и далеко не всегда удается получить вероятностную модель объекта достаточно достоверной или получить ее вообще.

Второй путь проще и, как правило, дает весьма достоверные результаты. Статистические испытания проводятся по методу Монте-Карло. Применение этого метода заключается в многократном расчете выходных параметров объекта по его детерминированной модели. При этом для случайных параметров, входящих в нее, перебирают наиболее вероятные значения в соответствии с их законами распределения. Исходные данные делят на две группы: конструкционные (которыми варьирует проектировщик и влияние которых на выходные характеристики объекта он исследует) и эксплуатационные (варьируемые в процессе эксплуатации: силовые, тепловые, химические, биологические и др.). Выбор конкретного для данного испытания сочетания значений варьируемых параметров проводится из базы данных по стандартной подпрограмме.

*Прогнозирование* выходных характеристик станков и машин на стадии проектирования вызвано необходимостью обеспечения их качества и надежности в процессе эксплуатации. Прогнозирование дает возможность, во-первых, оценить сопротивляемость станка и машины эксплуатационным нагрузкам, во-вторых, целенаправленно выбрать оптимальные параметры станков и ГПС и ограничить эксплуатационные нагрузки, что в целом обеспечивает регламентированные показатели качества и надежности.

При прогнозировании расчетным путем выявляют *область состояний* ① на рис. 4.5.28, в которой находится выходной параметр узла и которая зависит от всего комплекса учитываемых в модели внешних и внутренних факторов, и сравнивают ее с *нормированной областью работоспособности* ②, определяющей границы допустимых значений этого параметра. Качество и надежность проектируемого механизма или машины определяют размерами области состояний их выходных параметров, ее изменением во времени и положением относительно области работоспособности. Чем меньше область состояний выходных параметров станка, тем выше их качество, и чем медленнее она изменяется во времени, тем выше их надежность.

*Оптимизация.* Проектируемые станки и ГПС должны иметь заданные выходные характеристики. В самых простых случаях оптимальное значение нужной характеристики механизма удается вычислить с помощью формул, содержащихся в справочной литературе. Однако такой метод определения опти-

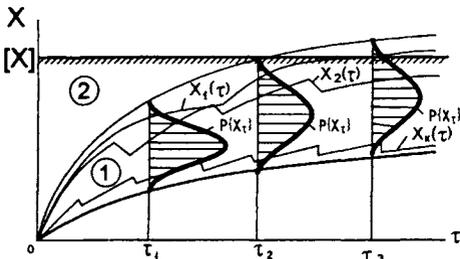


Рис. 4.5.28. Область состояний 1 и область работоспособности 2 выходных параметров проектируемого объекта

мальных характеристик далеко не всегда обеспечивает получение оптимальных решений при проектировании машин. Поэтому применяют различные методы оптимального проектирования, позволяющие найти наилучшее решение с точки зрения обеспечения совокупности требуемых характеристик машины. При этом процедура поиска оптимальных параметров механизмов и машин, соответствующих оптимуму выходных характеристик, становится неотъемлемой частью процесса проектирования.

Проектирование станков и ГПС с заданными или наилучшими выходными характеристиками требует математической формулировки задачи оптимального проектирования, для решения которой необходимо выполнить определенную последовательность действий:

определить основную систему переменных и выделить решающие расчетные параметры;

сформулировать в виде неравенств все ограничения, налагаемые на расчет;

сформулировать математическую модель станка или ГПС в виде системы необходимых и достаточных выражений, связывающих различные переменные и описывающих поведение объекта проектирования;

выработать критерий качества, выражающий цель конструктора при проектировании и позволяющий определить область допустимых решений;

выбрать метод оптимизации, наиболее пригодный для решаемой задачи и дающий возможность систематически и эффективно исследовать область допустимых решений для отыскания наилучших из них.

Задачи оптимизации реальных механизмов и машин, как правило, не только многопараметрические, но и многокритериальные, даже если описание конструкции и область изменения варьируемых параметров  $X_1 \dots X_k$  известны, формирование целевой функции (обобщенного критерия качества)  $\Phi(X_1 \dots X_k)$  представляет собой серьезную проблему.

Оптимизация может быть *однокритериальной* или *многокритериальной*. Пример однокритериальной оптимизации: функция суммарных потерь энергии  $P_{\Sigma} = P_{\mu} + P_Q$  ( $P_{\mu}$  - потери на вязкое трение в рабочем зазоре,  $P_Q$  - мощность, затрачиваемая на прокачивание жидкости через опору) для всех типов гидростатических опор и направляющих имеет экстремальный характер в зависимости от рабочего зазора  $\Delta$  (рис. 4.5.29, а) и от вязкости  $\mu$  смазочной жидкости (рис. 4.5.29, б). Следовательно, по условию минимизации энерготехнических потерь можно выбрать оптимальный рабочий зазор  $\Delta_{\text{опт}}$ , приравняв  $dP_{\Sigma} / d\Delta = 0$ , и оптимальную вязкость  $\mu_{\text{опт}}$ , приравняв  $dP_{\Sigma} / d\mu = 0$ .

Процесс проектирования ГПС может быть автоматизирован почти полностью, поскольку в состав ГПС входят унифицированные станки, системы управления, транспортные, инструментальные и другие системы. Сведения об унифицированных элементах ГПС, типовых технологиях, инструменталь-

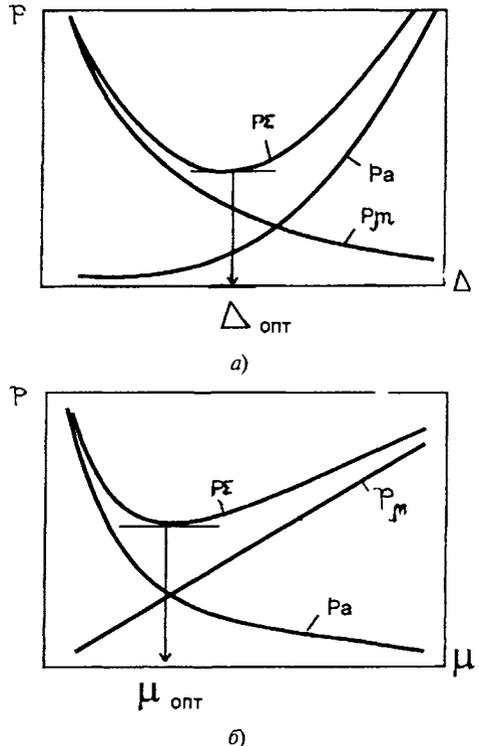


Рис. 4.5.29. Оптимизация параметров элемента конструкции гидростатического шпиндельного подшипника

ном обеспечении и т.д. хранятся в банках данных. В соответствии с номенклатурой деталей, предназначенных для обработки на ГПС и типовыми технологиями их обработки, определяют номенклатуру обрабатывающего оборудования и его расположение. Схема автоматизированного проектирования кулачка с последующим его изготовлением на ГПС показана на рис. 4.5.30.

Качество и скорость подготовки управляющих программ для оборудования, входящего в состав ГПС, являются двумя основными критериями при построении предназначенных для этого интегрированных CAD/CAM систем. Исходя из этого была разработана структура CAD/CAM системы (рис. 4.5.31), применение которой дает возможность качественно готовить управляющие программы в реальном масштабе времени.

Несмотря на то, что CAD/CAM - система выступает в качестве единого целого, ее части, имеется в виду CAD и CAM, четко разделены. Для их стыковки разработан модуль конвертирования «в формат - из формата» VDA FS. Этот модуль не замкнут и может быть расширен для применения других графико-технологических форматов. Предусмотрена возможность добавления формата STEP.

Возможно два режима ввода информации на уровень PC - NC. Ручной режим ввода информации предполагает, в свою очередь, частичное использование автоматического режима ввода или применение только ручного ввода. При выборе пользователем ручного режима ввода с частичным использованием автоматического режима, цепочка передачи информации будет состоять из следующих шагов:

- создание чертежа вручную;

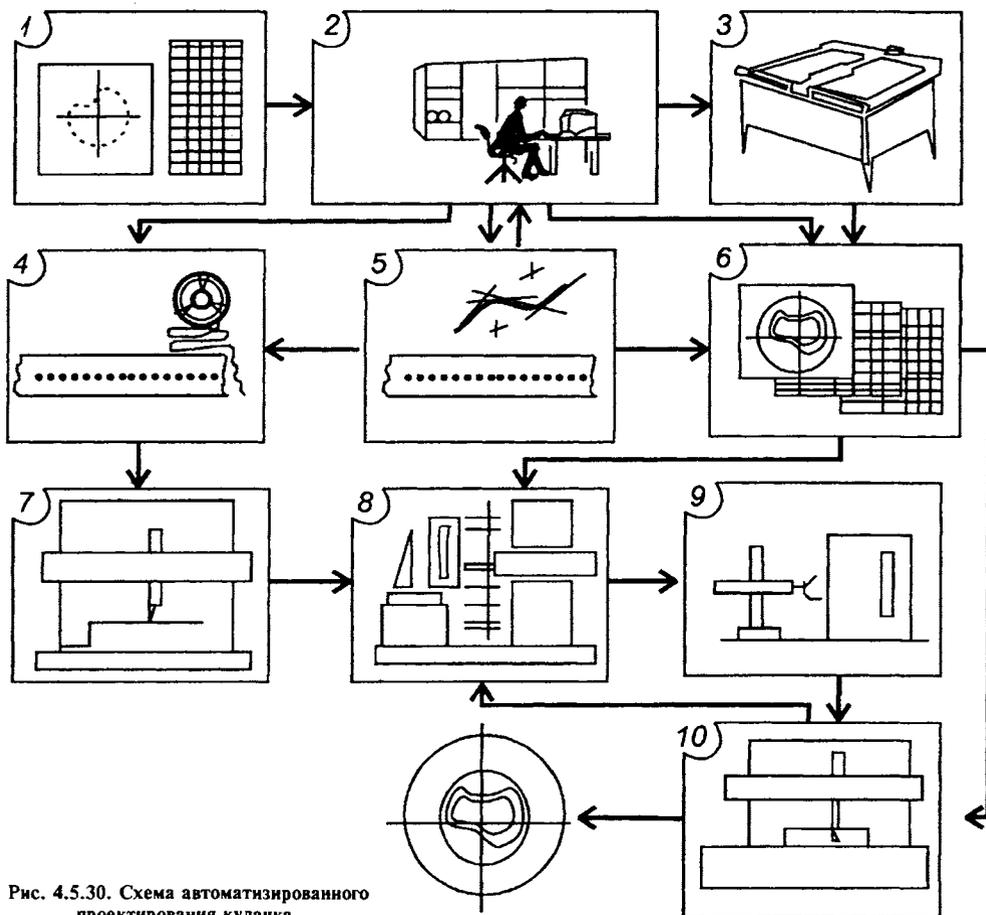


Рис. 4.5.30. Схема автоматизированного проектирования кулачка, изготовляемого на ГПС

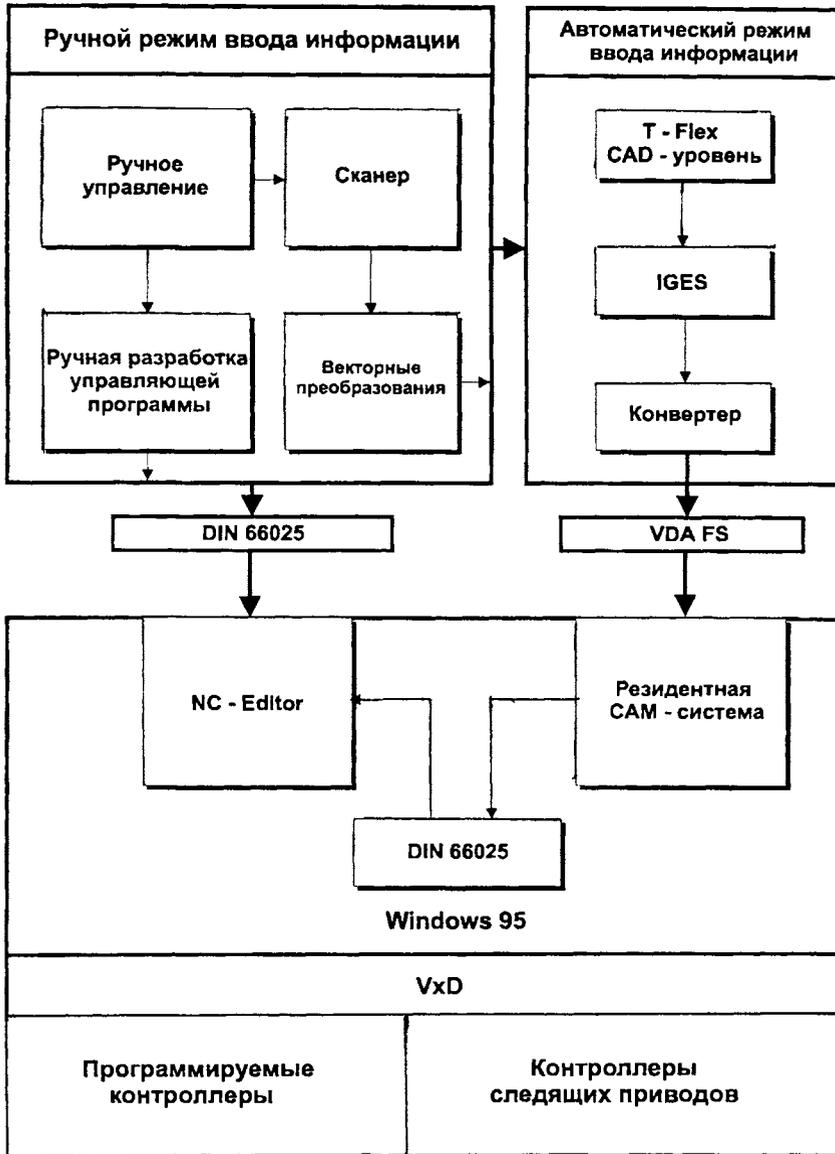


Рис. 4.5.31. Структура CAD/CAM системы для станков с ЧПУ

- сканирование чертежа;
- передача данных после этапа сканирования в модуль векторных преобразований;
- передача данных на CAD - уровень;
- конвертирование данных в формат IGES;
- конвертирование данных в формат VDA FS;
- передача данных в формате VDA FS в резидентную CAM - систему (PC-NC - уровень);

- конвертирование данных в CAM - системе из формата VDA FS в графическое изображение;
- разработка технологического процесса обработки на поступившую деталь в CAM-системе;
- передача данных в модуль генерации управляющих программ в соответствии с DIN 66025;
- передача управляющих программ в NC-Editor;

– конвертирование управляющих программ в машинных кодах;

– отработка программ.

Если пользователь использует режим только ручного ввода информации, то представляется следующая последовательность шагов:

– создание чертежа вручную;

– разработка вручную управляющей программы для изготавливаемой детали, представленной на чертеже (программа разрабатывается в соответствии с DIN 66025);

– ввод вручную управляющей программы в NC-Editor;

– конвертирование управляющих программ в машинных кодах;

– отработка программы.

И наконец, последний режим работы CAD/CAM - системы - автоматический. Его отличие от ручного режима с частичным использованием автоматического заключается в том, что отсутствуют 2-й, 3-й и 4-й шаги по порядку, а также на первом шаге чертеж создается не вручную, а с применением CAD - системы T-Flex.

CAD/CAM система описанной выше конфигурации имеет одно важное преимущество: она может быть адаптирована к любому станку, так как является незамкнутой, что позволяет ее постоянно дорабатывать, улучшать и расширять.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автоматизированное проектирование гибких производственных систем / А.И. Левин, Л.Ю. Лишинский, С.В. Пичев и др. // Станки и инструмент. 1987. №3. С. 4-7.**
2. **Горностаев Ю.М., Дрожжинов В.И.** Сетевая интеграции автоматизированного машиностроительного производства на базе протоколов связи MAP/TOP. М.: МЦНТИ. 1988. 123 с.
3. **Зайцев С.С., Кравцунов М.И., Ротанов С.В.** Сервис открытых информационно-вычислительных сетей. М.: Радио и связь. 1990. 235 с.
4. **Калин О.М., Ямпольский С.Л., Песков Л.В.** Моделирование гибких производственных систем. Киев: Техника. 1991. 180 с.
5. **Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник в 3-х т. Т.1: Проектирование станков / Под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана: Машиностроение. 1994. 444 с.**
6. **Проников А.С.** Надежность машин. М.: Машиностроение. 1978. 592 с.
7. **Пуш А.В.** Шпиндельные узлы. Качество и надежность. М.: Машиностроение. 1992. 288 с.
8. **Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л.** Управление гибкими производственными системами. М.: Машиностроение. 1988. 352 с.
9. **Сосонкин В.Л.** Взгляд на предстоящую эволюцию устройств ЧПУ // Станки и инструмент. 1992. №9. С. 27-32.
10. **Сосонкин В.Л.** Концепция персональных систем управления в реальном времени // Приборы и системы управления. 1995. № 7. С. 15-17.
11. **Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.** Принципы построения систем ЧПУ с открытой архитектурой // Приборы и системы управления. 1996. № 8. С. 18-21.
12. **Сосонкин В.Л.** Программное управление технологическим оборудованием: Учебник для вузов. М.: Машиностроение. 1991. 509 с.
13. **Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.** Концепция геометрического процессора для систем ЧПУ // СТИН. 1994. № 7. С. 17-20.
14. **Соболь И.М., Статников Р.Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука. 1981. 108 с.
15. **Сосонкин В.Л., Пуш А.В., Пирогов И.В.** Интегрированная система для малогабаритных станков // Тез. докл. V Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем. Ростов-на-Дону: ДГТУ. 1997. С. 92-94.

## РАЗДЕЛ 5

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Глава 5.1

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ

##### 5.1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВАЛОВ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ ТРЕБОВАНИЯ

Валы относятся к классу деталей типа тел вращения с длиной  $L$ , превышающей три диаметра  $D$  ( $L > 3D$ ).

В технологическом отношении валы подразделяют: по размерам; по конфигурации; по точности.

Валы, у которых отношение  $L$  к  $D$  меньше 12, относятся к валам жестким; если же это отношение больше 12, то валы - нежесткие.

По конфигурации валы могут быть: беступенчатые, ступенчатые, цельные и пустотелые, гладкие и шлицевые, валы-шестерни, а также комбинированные валы в разнообразном сочетании приведенных выше групп. По форме геометрической оси валы могут быть прямыми, коленчатými, кривошипными и эксцентровыми (кулачковыми).

По точности валы разделяются на четыре группы:

1) валы особо точные - рабочие шейки изготавливают с точностью 4-5 качества; остальные поверхности с допусками по 6-7 качеству;

2) точные валы - основные рабочие поверхности изготавливают по 6 качеству точно, а остальные поверхности по 8 качеству;

3) валы нормальной точности - поверхности этих валов выполняют с точностью 8-9 качества;

4) валы пониженной точности - поверхности основных размеров изготавливают с точностью 10-14 качества.

Требования к точности и качеству поверхностного слоя валов устанавливают исходя из необходимости обеспечения того или иного эксплуатационного свойства (износостойкости, контактной жесткости, прочности посадки, сопротивления усталости, герметичности, коррозионной стойкости), определяю-

щего их надежность. Так, опорные шейки валов под подшипники качения должны обеспечивать требуемую прочность посадки с внутренним кольцом подшипника и сопротивление усталости в опасном сечении, а под подшипники скольжения - необходимую износостойкость и контактную жесткость. Посадочные шейки валов под зубчатые колеса должны обеспечивать необходимую прочность посадки, рабочие поверхности кулачка - необходимую износостойкость. При работе в химически агрессивных и влажных средах поверхности валов должны обладать необходимой коррозионной стойкостью; в некоторых случаях отдельные участки одной и той же поверхности валов, например, кулачки распределителей, могут работать при различных давлениях и скоростях, что будет вызывать их неравномерный износ, а следовательно, и уменьшение долговечности. Во избежание этого к этим поверхностям должны предъявляться особые требования по закономерному изменению их качества. Боковые поверхности зубьев и шлицев, наряду с износостойкостью должны обладать у своего основания высоким сопротивлением усталости, а в районе делительной окружности - контактной прочностью и т.д. Все это должно отражаться в технических требованиях на изготовление валов.

Исходя из функционального назначения, к валам предъявляются следующие технические требования:

1) отклонения от соосности и прямолинейности всех участков вала должны быть в пределах установленного допуска - допустимая искривленность оси вала  $0,03...0,06$  мм/м;

2) радиальное биение посадочных шеек валов относительно базирующих шеек допускается в пределах  $0,01...0,03$  мм;

3) осевое биение упорных торцов или уступов не должно быть больше  $0,01$  мм на наибольшем радиусе;

4) отклонение от параллельности шпоночных канавок или шлицев и оси не должно превышать  $0,01$  мм на  $100$  мм длины;

5) допуски на длину ступеней  $0,05...0,2$  мм;

6) овальность и конусообразность обрабатываемых шеек вала должны находиться в пределах 0,2...0,4 допуска на диаметр шеек;

7) поверхности посадочных шеек валов под зубчатые колеса должны быть обработаны с параметром шероховатости  $Ra=0,5...2,0$  мкм, под подшипники качения -  $Ra=0,63...20$  мкм,  $S_m=0,04...0,06$  мм,  $t_{50}=45...50\%$ , под подшипники скольжения -  $Ra=0,2...0,5$  мкм,  $S_m=0,03...0,05$  мм,  $t_{50}=45...70\%$ , торцовые поверхности должны быть обработаны с получением параметра  $Ra=3,2...10$  мкм;

8) центровочные отверстия валов должны быть сохранены в готовых деталях, кроме случаев, оговариваемых техническими требованиями;

9) трещины, раковины и другие дефекты в материале заготовки не допускаются;

10) сварка валов не допускается;

11) особо ответственные валы должны проходить контроль на твердость;

12) обработанные поверхности валов перед сдачей на склад должны быть покрыты антикоррозийной смазкой.

### 5.1.2. ВЫБОР ЗАГОТОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ

На выбор метода получения заготовки оказывают влияние: материал детали; ее назначение и технические требования на изготовление; объем и серийность выпуска; форма поверхности и размеры детали.

Главным при выборе заготовки является обеспечение заданного качества готовой детали при ее минимальной себестоимости. Себестоимость детали определяется суммированием себестоимости заготовки по калькуляции заготовительного цеха и себестоимости ее последующей обработки до достижения заданных требований качества по чертежу. Выбор заготовки связан с конкретным технико-экономическим расчетом себестоимости готовой детали.

При выборе технологических методов получения заготовок учитываются прогрессивные тенденции развития технологии машиностроения. Решения задачи формообразования деталей целесообразно перенести на заготовительную стадию и тем самым снизить расход материала, уменьшить долю затрат на механическую обработку в себестоимости готовой детали.

Валы, в основном, изготавливают из конструкционных и легированных сталей, которые должны обладать высокой прочностью, хорошей обрабатываемостью, малой чувствительностью к концентрации напряжений, а для повышения износостойкости должны подвергаться термической обработке. Этим требованиям наиболее полно отвечают стали 35, 40, 45, 40X, 50X, 40Г2 и др.

Легированные стали по сравнению с конструкционными применяют реже ввиду их более высокой стоимости, а также повышенной чувствительности к концентрации напряжений. Производительность механической обработки валов во многом зависит от вида материала, размеров и конфигурации заготовки, а также от характера производства. Заготовки получают отрезанием от горячекатаных или холоднотянутых прутков и сразу подвергают механической обработке. Заготовки такого вида применяют в основном в мелкосерийном и единичном производстве, а также при изготовлении валов с небольшим числом ступеней и незначительной разницей их диаметров. В производстве с достаточно большим масштабом выпуска, а также при изготовлении валов более сложной конфигурации со ступенями, значительно различающимися по диаметру, заготовки целесообразно получать методами пластического деформирования. Эти методы (ковка, штамповка, периодический прокат, обжатие на ротационно-ковочных машинах, электровысадка), позволяют получать заготовки, по форме и размерам наиболее близкие к готовой детали, что значительно повышает производительность механической обработки. При этом значительно снижается металлоемкость, которая характеризуется коэффициентом использования металла  $K = Q_3 / Q_m$ , где  $Q_3$  - масса заготовки;  $Q_m$  - норма расхода материала.

С увеличением масштаба выпуска особое значение приобретает эффективность использования металла и сокращения механической обработки. Поэтому в крупносерийном и массовом производстве преобладают методы получения заготовок с коэффициентом использования металла от 0,7 и выше (иногда до 0,95). Штучную заготовку из прутка целесообразно заменять штампованной, если коэффициент использования металла повышается не менее, чем на 5%, учитывая, конечно, экономическую целесообразность других факторов.

При механической обработке валов на настроенных и автоматизированных станках приобретает большое значение и точность заготовки. Заготовки, полученные методом радиального обжатия, отличаются малыми припусками и высокой точностью. Сущность метода заключается в периодическом обжатии и вытягивании по уступам отрезанной от прутка цилиндрической заготовки путем большого числа последовательных и быстрых (примерно через 0,01 с) ударов несколькими специальными матрицами. Радиальное обжатие заготовки проводится как в горячем, так и в холодном состоянии. Вследствие такого обжатия материал пластически деформируется

и течет в осевом направлении, уменьшая поперечное сечение заготовки и придавая ей полученную форму.

После радиального обжатия в холодном состоянии можно получить заготовки (в зависимости от диаметра) с точностью  $\pm(0,02...0,20)$  мм и параметром шероховатости поверхности  $Ra=0,63...0,32$  мкм. При ротационной ковке заготовок в горячем состоянии точность снижается до  $\pm 0,3$  мм, а по длине до  $\pm 1$  мм (за исключением общей длины, где погрешность достигает 10 мм и более). Коэффициент использования металла в заготовках, полученных этим способом, составляет  $0,85...0,95$ . Процесс высокопроизводительный, длительность операции 40...70 с. Заготовки небольших ступенчатых валов диаметром до 25 мм изготавливают сочетанием холодной высадки и прессованием (экструзионг-процесс), а именно: из штучной заготовки за несколько переходов высаживают ступенчатую часть, а затем вытягивают ту часть, диаметр которой меньше размера исходной прутковой заготовки.

Оригинальным процессом непрерывного изготовления заготовок ступенчатых валов и других деталей тел вращения переменного сечения по длине является поперечно-винтовая прокатка на трехвалковых станках. Работу станов можно полностью автоматизировать, включая движение подачи заготовки, ее нагрев, прокатку, резку на мерные заготовки, охлаждение готового проката, укладку и упаковку.

Особую группу валов представляют шпиндели, для изготовления которых применяют высокопрочный (магнеливый) чугуны, серый чугун СЧ15, СЧ20 и модифицированный чугун, значительно реже стальные отливки. В зависимости от серийности в качестве заготовок для шпинделей применяют поковки, реже стальные отливки, прутковый материал и трубы. Заготовки чугунных полых шпинделей получают центробежным литьем в металлические формы. В крупносерийном производстве заготовки стальных шпинделей целесообразно изготавливать горячей высадкой на горизонтально-ковочных машинах или ковкой на ротационно-ковочных машинах.

Основными базами большинства валов являются поверхности его опорных шеек. Однако использовать их в качестве технологических баз для обработки наружных поверхностей, как правило, затруднительно, особенно при условии сохранения единства баз, что очень важно при автоматизированном технологическом процессе. Поэтому при большинстве операций за технологические базы принимают поверхности центровых отверстий и торцов заготовки, что позволяет

обрабатывать почти все наружные поверхности вала на единых базах с установкой его в центрах.

При выполнении фрезерных и сверлильных операций в качестве баз чаще используют наружные цилиндрические поверхности вала.

### 5.1.3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ

Обработку валов подразделяют на предварительную, как правило, осуществляемую в заготовительных цехах или отделениях, и окончательную, реализуемую в механических цехах.

К методам предварительной обработки валов относятся: резка, правка и центровка.

**Резку заготовок** из проката проводят на металлических и гидравлических прессах, фрикционных пилах, специальных отрезных станках, станках для анодно-механической резки, резки абразивными кругами. К перспективным методам резки заготовок относятся плазменная и лазерная.

Стальной прокат малой и средней прочности ( $\sigma_B=300...900$  МПа) при диаметре 20...30 мм и 60...80 мм экономически выгодно разрезать сегментными дисковыми пилами, при диаметрах 40...50 мм - на токарно-отрезных станках; из высокопрочных сталей ( $\sigma_B=900...1200$  МПа) при диаметре прутков 20...30 мм - на абразивно-отрезных станках, а при диаметрах 40...80 мм - на анодно-механических ленточных станках.

**Правка заготовок** валов может проводиться в горячем и холодном состояниях. В зависимости от требуемой точности правку можно осуществлять различными методами:

- 1) в центрах токарного станка;
- 2) под прессом;
- 3) правкой и калибровкой на специальных правильно-калибровочных станках.

**Центровка** валов может осуществляться на различных станках: сверлильных, токарных, центровочных и фрезерно-центровальных. Перед зацентровкой валов обычно проводят обработку их торцов. Крупные валы в условиях единичного и мелкосерийного производств зацентровывают по разметке на горизонтально-сверлильных (расточных) станках. Мелкие валы в условиях единичного и мелкосерийного производств зацентровывают обычно на токарных или вертикально-сверлильных станках.

В серийном, крупносерийном и массовом производствах зацентровку валов обычно проводят на фрезерно-центровальных полуавтоматах. После предварительной обработки заготовки валов поступают в механические

цеха, где проводится обработка их наружных поверхностей вращения, шпоночных пазов, отверстий, нарезание резьб, правка центровочных отверстий.

**Обработка наружных поверхностей вращения.** Наружные поверхности вращения обрабатываются различными методами: точением, шлифованием, суперфинишированием, полированием, притиркой, отделочно-упрочняющей обработкой, поверхностным пластическим деформированием.

**Точение** подразделяется на черновое, получистовое, чистовое и тонкое (алмазное). При черновом точении снимаем большую часть общего припуска и напуск с приданием заготовке формы, приближающейся к форме детали. Достигаемая при этом точность - 12-14 квалитета, параметр шероховатости  $Rz=60...200$  мкм.

Получистовое точение позволяет получить точность - 10-12 квалитета, параметр шероховатости  $Rz=10...80$  мкм.

Чистовое точение позволяет получить точность 8-10 квалитета, параметр шероховатости  $Ra=0,8...2,5$  мкм. Как правило, тонкое точение проводится алмазными резцами или резцами, оснащенными твердым сплавом или керамикой при высоких скоростях резания ( $v=800...1000$  м/мин) и малых подачах ( $S_0=0,03...0,08$  мм).

Тонкое (алмазное) точение позволяет обеспечить точность 6-7 квалитета и параметр шероховатости  $Ra=0,1...0,6$  мкм. Тонкое (алмазное) точение, как правило, применяется для отделочной обработки деталей из цветных металлов и сплавов (бронзы, латуни, алюминиевых сплавов и т.п.) и для деталей из высокопрочных чугунов и закаленных сталей.

Для повышения производительности труда при точении наружных поверхностей вращения применяется многолезцовая обработка.

**Шлифование** наружных поверхностей вращения может проводиться периферией и торцом абразивных или алмазных кругов, конечными или бесконечными лентами и лепестковыми кругами. Шлифование, как и точение, может быть черновым, получистовым, чистовым и тонким; оно может осуществляться с продольной или радиальной подачей. Черновое шлифование обеспечивает точность 8-9 квалитета и параметр  $Rz=5...12,5$  мкм; получистовое - точность 7-8 квалитета и параметр  $Ra=0,63...3,0$  мкм; чистовое - точность 6-7 квалитета и параметр  $Ra=0,2...0,25$  мкм; тонкое - точность 5-6 квалитета и параметр  $Ra=0,05...0,25$  мкм.

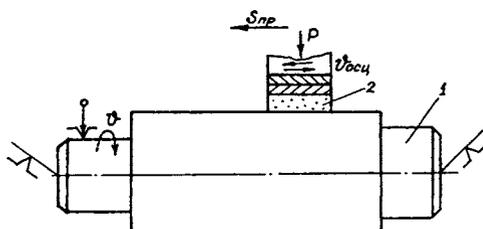


Рис. 5.1.1. Схема суперфиниширования:

- 1 - обрабатываемая деталь;  
2 - суперфинишный брусок

Для абразивной обработки бесступенчатых наружных поверхностей вращения широкое применение получил высокопроизводительный процесс бесцентрового шлифования. Для автоматического обеспечения точности размеров и шероховатости как при точении, так и при шлифовании используют различные адаптивные системы управления процессами обработки. При необходимости улучшения качества наружных поверхностей вращения применяют отделочную обработку: суперфиниширование, полирование, притирку.

**Суперфиниширование** осуществляется мелкозернистыми абразивными или алмазными брусками за счет их осциллирующего движения в сочетании с вращением и продольной подачей детали или брусков (рис. 5.1.1). Суперфиниширование, как правило, осуществляется после чистового шлифования и позволяет получить точность 5 квалитета и параметр  $Rz=0,03...0,1$  мкм, уменьшить на 50...80% овальность, огранку и волнистость.

**Полирование**, как правило, осуществляется мягкими кругами (войлок, фетр, парусина, кожа), с нанесенными на них мелкозернистыми абразивными или алмазными порошками, смешанными со смазкой. Для обработки наружных поверхностей вращения вместо кругов широко используют полировальные ленты. Достижимый параметр шероховатости  $Rz=0,05$  мкм,  $t_{10}=30...40\%$ . Точность и погрешность формы определяется предварительной обработкой.

Для полирования, а иногда и шлифования наружных поверхностей вращения, применяют и магнитоабразивную обработку. Обрабатываемую деталь 1 (рис. 5.1.2) помещают между полюсными наконечниками 2 электромагнита с некоторым зазором, в которые подается порошок 3, обладающий магнитными и абразивными свойствами. Силами магнитного поля зерна порошка удерживаются в рабочих зазорах, прижимаются к поверхности детали и проводят ее полирование. В рабочие зазоры подается СОТС (эмульсия, керосин и т.д.). Точность

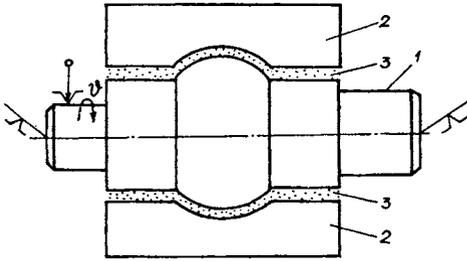


Рис. 5.1.2. Схема магнитно-абразивной обработки наружной фасонной поверхности вращения  
1 - обрабатываемая заготовка;  
2 - полюсные наконечники электромагнита;  
3 - абразивный порошок

размеров определяется предшествующей обработкой, достигаемый параметр шероховатости -  $Rz=0,11$  мкм,  $t_{10}=20...30\%$ .

**Притирка** наружных цилиндрических поверхностей выполняется притирами, изготовленными из чугуна, бронзы или меди, которые обычно предварительно шаржируются абразивным или алмазным микропорошком с маслом или специальной пастой. Достижимая точность 4-5 квалитета, параметр шероховатости  $Rz=0,05...0,1$  мкм,  $t_{10}=50...60\%$ . Для повышения эксплуатационных показателей наружных поверхностей вращения широкое применение имеет отделочно-упрочняющая обработка пластическим деформированием (ОУО ППД) (накатывание, выглаживание, вибронакатывание, обработка инструментами центробежно-ударного действия, электрохимическая обработка), нанесение покрытий (мягких, твердых, многослойных) и легирование поверхностей.

**Накатывание** может проводиться роликами или шариками. Оно применяется как для упрочнения поверхностного слоя ( $u_n=160...220\%$ ), так и для уменьшения высотных параметров шероховатости и увеличения ее несущей способности:  $Ra=0,05$  мкм,  $t_{10}=30...40\%$ . Исходная погрешность формы и

размеров при всех методах ОУО ППД практически не устраняется.

**Выглаживание** производится шариком или алмазом. При этом рабочей части алмаза придают сферическую форму ( $R=2...4$  мм). Обеспечивается как упрочнение поверхностного слоя ( $u_n=150...200\%$ ), так и уменьшение исходной шероховатости  $Rz=0,05$  мкм и увеличение ее несущей способности  $t_{10}=30...40\%$ .

**Вибронакатывание** может применяться как для отделочно-упрочняющей обработки наружных поверхностей вращения, так и для увеличения маслоемкости опорных поверхностей трения валов, шпинделей. Сущность вибронакатывания заключается в том, что на движение подачи рабочего шарика накладываются его колебательные движения (рис. 5.1.3). В зависимости от сочетания режимов ( $P, r, v, S_{пр}, v_{осц}, A$ ) может быть обеспечено упрочнение поверхности ( $u_n=150...200\%$ ), сглаживание исходной шероховатости ( $Rz=0,1$  мкм,  $t_{10}=40...50\%$ ), формирование нового регулярного микро рельефа или системы масляных каналов (рис. 5.1.4).

Широкое распространение для повышения сопротивления усталости деталей в авиационной промышленности получила центробежно-ударная обработка (рис. 5.1.5.). В инструментах центробежно-ударного действия рабочие шарики или ролики определенной массы размещают в радиальных пазах диска или сепаратора в определенном порядке. Это позволяет за счет заданных частот вращения инструмента и детали и продольной подачи обеспечить необходимое число ударов, определенной силы на каждый  $1$  мм<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности. Параметр шероховатости поверхности снижается с  $Ra=1,0...2,5$  мкм до  $Ra=0,2...0,8$  мкм и может достигать  $Ra=0,05$  мкм,  $t_{10}=30\%$ , поверхностная микротвердость увеличивается на  $30...80\%$  при глубине наклепа  $0,3...2,0$  мм; остаточные напряжения сжатия на поверхности достигают  $400...800$  МПа.

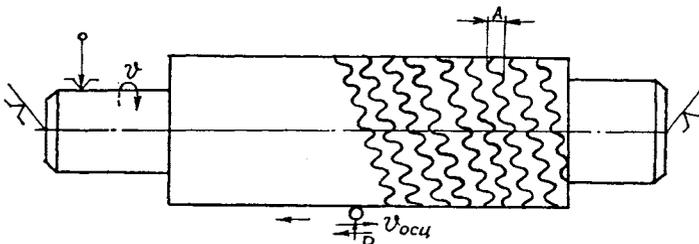


Рис. 5.1.3. Схема вибронакатывания

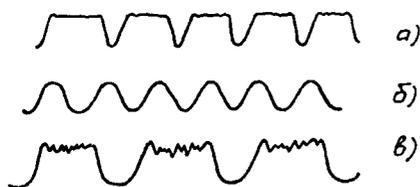


Рис. 5.1.4. Различные профили поверхности после вибронакатывания:

- а - сглаживание исходной шероховатости;
- б - формирование регулярного микрорельефа;
- в - нанесение системы масляных каналов

**Электромеханическая обработка (ЭМО)** позволяет значительно повысить поверхностную твердость ( $u_H = 180...220\%$ ), уменьшить параметр исходной шероховатости в 5-15 раз (например, с  $Ra=1$  мкм до  $Ra=0,08$  мкм) и увеличить ее несущую способность ( $t_{10} = 40...50\%$ ) при незначительных рабочих усилиях. Это обеспечивается нагревом зоны контакта рабочего ролика и обрабатываемой поверхности при пропускании через него тока большой силы ( $I = 200...1500$  А) (рис. 5.1.6). Для повышения коррозионной стойкости и износостойкости валов и штоков или отдельных их рабочих поверхностей могут применяться различные покрытия или легирование. Как правило, гальванические способы нанесения покрытий (хромирование, кадмирование, свинцевание, никелирование) применяют для защиты от коррозии. Механические, лазерные и ионно-плазменные методы нанесения покрытий и легирования поверхностей служат для повышения износостойкости рабочих шеек валов, штоков, шпинделей.

**Обработка шлицев на валах.** Шлицы на валах обрабатываются фрезерованием, строганием, протягиванием, шлифованием, накатыванием.

**Фрезерование шлицев** на валах небольших диаметров (до 100 мм) обычно осуществляется за один переход, а больших диаметров (более 100 мм) - за два перехода. Фрезерование шлицев может проводиться методом копирования (фасонными фрезами) или методом обкатки (червячными фрезами). Для повышения производительности труда при черновом шлицефрезеровании применяют многозаходные червячные фрезы. В серийном производстве применяют более совершенный процесс фрезерования прямобочных шлицев, а именно - предварительное фрезерование фасонными дисковыми фрезами и чистовое фрезерование боковых поверхностей шлицев торцовыми фрезами, оснащенными пластинками из твердого сплава.

**Шлицестрогание** проводится набором фасонных резцов, собранных в головке и применяется в крупносерийном и массовом производствах. Параметр шероховатость обработанной поверхности после шлицестрогания  $Ra=1,0...2,5$  мкм.

**Шлицепротягивание** осуществляется двумя блочными протяжками одновременно двух диаметрально противоположных впадин на валу с последующим его поворотом после каждого хода протяжки на один шлиц. Данный метод применяется в массовом производстве и позволяет получить параметр шероховатости  $Ra=0,63...1,2$  мкм. По производительности шлицестрогание и шлицепротягивание в 5-8 раз выше шлицефрезерования.

**Шлифование шлицев** может проводиться фасонными кругами всей впадины: отдельно за две операции; одним кругом внутреннего диаметра и двумя кругами боковых поверхностей прямобочных шлицев; одновременно внутреннего диаметра и боковых поверхностей прямобочных шлицев тремя кругами. Достижимый параметр шероховатости шлицев  $Ra=0,32...0,63$  мкм. Наиболее распространен-

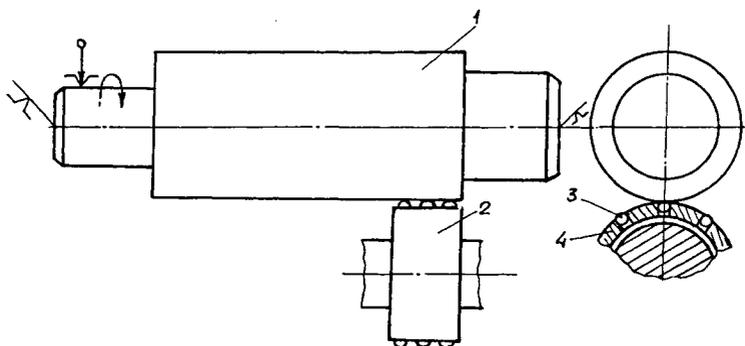


Рис. 5.1.5. Схема обработки центробежно-ударным инструментом:

- 1 - обрабатываемая деталь;
- 2 - инструмент центробежно-ударного действия;
- 3 - рабочие шарики;
- 4 - сепаратор

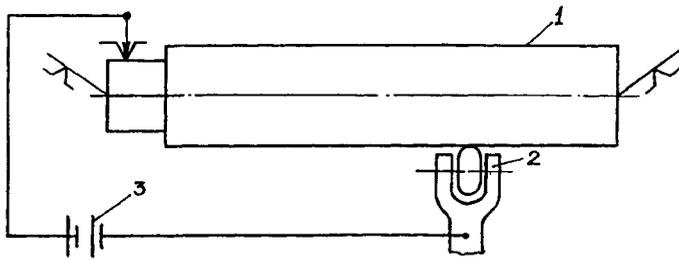


Рис. 5.1.6. Схема ЭМО:

1 - обрабатываемая деталь; 2 - рабочий ролик; 3 - трансформатор

ным и производительным, но менее точным, является шлифование фасонными кругами.

**Накатывание шлицев** может проводиться как в горячем ( $m > 5$  мм), так и холодном состоянии ( $m \leq 5$  мм). Накатывание шлицев может осуществляться роликами, рейками и многороликовыми головками. При накатывании шлицев обеспечивается параметр шероховатости  $Ra = 0,32 \dots 0,63$  мкм и значительно повышается их долговечность.

**Обработка шпоночных канавок на валах.** Шпоночные канавки в зависимости от конфигурации и серийности производства фрезеруются дисковыми или концевыми фрезами или двухзубыми концевыми фрезами за каждый рабочий ход (0,1...0,3 мм) на специальных шпоночно-фрезерных станках, работающих по маятниковому методу. Последний способ обработки шпоночных канавок более точный и используется в серийном, крупносерийном и массовом производствах.

При необходимости повышения точности шпоночных канавок после термообработки может осуществляться их шлифование.

**Обработка отверстий в валах и шпинделях.** Радиальные отверстия в валах и шпинделях в зависимости от их точности обрабатываются сверлением, зенкерованием и развертыванием, как правило, на вертикально-сверлильных станках. Осевые отверстия большой длины сверлят специальными сверлами для глубокого сверления. При большом диаметре отверстий (например, в полых шпинделях) проводят их растачивание; после заточки возможно и внутреннее шлифование. Отверстия во фланцах валов и шпинделей обрабатывают на радиально-сверлильных или агрегатных станках, или с использованием многошпиндельных головок.

**Обработка резьб на валах.** Наружную резьбу можно получить различными инструментами: плашками, самораскрывающимися резьбонарезными головками, резцами, гребенками, дисковыми и групповыми фрезами, шлифовальными кругами и накатным инструментом. Тот или иной метод нарезания резьбы применяется в зависимости от ее раз-

меров, обрабатываемого материала, точности типа производства. Мелкие резьбы, как правило, нарезают плашками. Для повышения производительности труда в 2-3 раза в крупносерийном и массовом производствах применяют самораскрывающиеся головки.

Более крупные резьбы в единичном и мелкосерийном производствах нарезают резцами. Прямоугольные и трапецидальные резьбы нарезают несколькими резцами за несколько рабочих ходов и переходов. В условиях серийного и крупносерийного производства применяют многорезцовые блоки и резьбовые гребенки. В условиях серийного производства может применяться вихревой метод нарезания резьбы с внутренним или внешним касанием. Широкое применение в серийном и массовом производствах получил метод фрезерования резьбы дисковыми и групповыми фрезами. Фрезерование дисковыми фрезами применяется при нарезании резьб с большим шагом и крупным профилем, а групповой фрезой - для получения коротких резьб с мелким шагом. Шлифуют резьбу одно- и многониточными кругами обычно после закалки для повышения точности и качества поверхности. В массовом производстве может применяться бесцентровое шлифование резьбы многониточными кругами. Накатывание резьбы осуществляют резьбонакатными плоскими плашками или резьбовыми роликами.

**Правка центров.** В некоторых случаях после черновой обработки или термообработки валов производится правка их центров (повторное центрование). Повторное центрование чаще всего осуществляют на токарных станках, так как этот способ обеспечивает меньшие отклонения от соосности (биение 0,01...0,05 мм). В массовом производстве повторное центрование проводится на центровочных или центрошлифовальных станках.

**Выбор методов обработки.** Методы окончательной обработки всех поверхностей заготовки (вала) и промежуточных операций выбирают исходя из требований, предъявляемых

к точности размеров и качеству поверхностей, с учетом характера исходной заготовки, свойств обрабатываемого материала и условий производства.

Для предварительного выбора методов обработки отдельных поверхностей заготовки (вала) используются данные справочных таблиц экономической точности и качества обработки различными методами.

В связи с тем, что одинаковые точность обработки и качество обработанной поверхности могут быть достигнуты различными методами, после предварительного выбора нескольких возможных технологических подходов методов обработки следует провести их сопоставление по производительности и технологической себестоимости. При назначении метода обработки следует стремиться к тому, чтобы число переходов при обработке каждой поверхности заготовки было минимальным. Желательно, чтобы одним и тем же способом обрабатывалось возможно большее число поверхностей заготовки. Это даст возможность разработать высокопроизводительные концентрированные операции с максимальным совмещением обработки поверхностей, сократить общее число операций и установов, длительность цикла обработки, повысить производительность обработки.

В связи с тем, что выбранный метод окончательной обработки отдельных поверхностей, как правило, не может обеспечить экономичное получение требуемых точности и качества поверхности непосредственно из исходной заготовки, то возникает необходимость создания промежуточных операций или переходов, по мере выполнения которых достигается постепенное повышение точности размеров и качество поверхностей до требуемых значений в соответствии с чертежом детали. Так, например, требуется обработать наружную поверхность вала с точностью по 5-му качеству и с параметром шероховатости  $R_a=0,08$  мкм, а заготовкой служит прокат. Данная точность размера и шероховатость поверхности в соответствии со справочными данными достигается одним из методов доводки. Однако известно, что доводка экономична лишь при условии снятия припуска  $0,01...0,02$  мм на диаметр. Это означает, что предыдущая операция должна дать точность заготовки под доводку в пределах допуска  $0,003...0,005$  мм (операционный допуск должен быть в 2-4 раза меньше припуска на последующую операцию) при шероховатости  $R_a=0,3$  мкм. Методом обработки, обеспечивающим достижение такой точности является чистовое шлифование, снимающее припуск порядка  $0,05$  мм на диаметр.

Аналогичные рассуждения приводят к необходимости проведения черного шлифования, чистового и черного точения. При этом экономически целесообразно повышать точность от перехода к переходу на 1-2 качества и уменьшать высотные параметры шероховатости обрабатываемой поверхности в 2-6 раз.

#### 5.1.4. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАСТКИ

Механическую обработку заготовок валов начинают с операции подготовки технологических баз - подрезания торцов и их зацентровки. В зависимости от вида производства эту операцию можно проводить как на токарных и револьверных, так и на центровальных и фрезерно-центровальных станках. Большинство фрезерно-центровальных станков можно встраивать в автоматическую линию. Двухсторонний фрезерно-центровальный станок 73С1 имеет две позиции для крепления заготовки, на которых проводится последовательно фрезерование и центрование.

Фрезерно-центровальные станки МР77 и МР78 барабанного типа одновременно фрезеруют и центруют две заготовки без съема их со станка. Эти станки производительные, но громоздкие; наладка их сложна. В действующих автоматических линиях применяют станки А981 для фрезерования торцов и А982 для центрования.

В условиях крупносерийного и массового производства используют также фрезерно-центровальные-обточные двухсторонние полуавтоматы 2Г942Ф2 с ЧПУ, позволяющие выполнять кроме фрезерования торцов и центрования, обтачивание торцов, резбонарезание, зенкование, цекование. В условиях гибких производственных систем применяют фрезерно-центровальные станки МР179, КЛ-171, МА, 2235МФ4. В перечисленных станках используются стационарные станочные приспособления, базирующие заготовки по наружной цилиндрической поверхности с помощью самоцентрирующих призм и торцу по откидным или жестким упорам. Наружные поверхности ступенчатых валов обтачивают на токарных, токарно-копировальных, горизонтальных многорезцовых станках, вертикальных, одношпиндельных и многошпиндельных автоматах, токарных станках с копировальными устройствами (гидравлический суппорт КСТ-1), а также на токарных станках с ЧПУ и гибких производственных модулях. При обработке валов в центрах для выдерживания линейных размеров от постоянной базы рекомендуется применять плавающие передние центры с упором торца заготовки в упорное кольцо. Это позволяет предотвращать погрешности по глубине зацентровки. При об-

работке валов с одной установки на проход по всей длине заготовки применяют торцовые поводковые центры, что повышает точность и производительность. Передние центры токарных станков объединяют с поводковыми устройствами, вращающими обрабатываемую заготовку с помощью зубьев или штырей, внедряемых в торец заготовки.

Разработано большое количество эффективных конструкций поводковых центров, в том числе широкодиапазонные (регулируемые на различные диаметры торцов валов) и самонастраивающиеся на передачу требуемого крутящего момента. Конструкция самонастраивающегося поводкового центра приведена на рис. 5.1.7. В корпусе 1 размещен центр 3, подпружиненный пружиной 2, и оси 4, расположенные перпендикулярно оси центра, на которых размещены поводковые элементы 5, выполненные в виде зубчатых дисков, рабочая поверхность которых профилирована на архимедовой спирали.

Устройство работает следующим образом. Обрабатываемая заготовка, перемещаемая центром задней бабки, надвигается центровым отверстием на центр 3 и, сжимая пружину 2, утапливает его. При этом выступы зубчатой поверхности поводковых элементов 5 внедряются в торец заготовки. Во время обработки сила резания воспринимается поводковыми элементами 5, которые, поворачиваясь вокруг осей 4, автоматически обеспечивают необходимый для предотвращения проворота заготовки крутящий момент, чем обеспечивается высокая надежность не только при чистовой, но и черновой обработке.

В серийном, и особенно в крупносерийном производстве, широкое распространение находят многорезцовые и токарно-копировальные станки, полуавтоматы и автоматы.

Однопроходная копировальная и однопроходная многорезцовая обработка жестких валов (с отношением длины к диаметру наибольшей ступени 10-15) обеспечивает точность 9-11 квалитета. Многорезцовая обработка может оказаться эффективнее копировальной для валов, имеющих большие длину и диаметры и большие перепады ступеней, так как в продольном суппорте можно установить большое число резцов. Однако чрезмерное увеличение сил резания может привести к деформированию обрабатываемого вала, а это вынуждает снимать подачу по сравнению с подачей на копировальном станке. Поэтому окончательный выбор метода обработки и станочного оборудования должен сопровождаться расчетом на точность и экономическую целесообразность.

На токарно-копировальных станках современных моделей можно проводить черновую обработку многорезцовым суппортом, а чистовое обтачивание - однорезцовым копировальным суппортом, причем, при передаче крутящего момента заготовке торцовым поводковым центром обработку можно вести с одного установка. Некоторые модели токарно-копировальных станков имеют несколько копировальных суппортов, перемещающихся независимо один от другого, например, мод. КМ817 (два копировальных и три крестовых суппортов). Они позволяют вести независимую обработку каждый на своем участке, что зна-

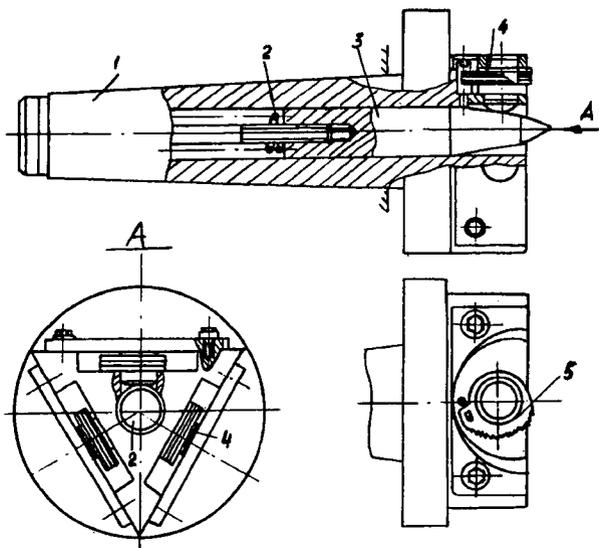


Рис. 5.1.7. Самонастраивающийся поводковый центр

чительно повышает производительность станка. Применение такого станка особенно целесообразно, когда на каких либо ступенях вала имеется большой припуск, который невозможно снять за один рабочий ход. При установке специальных копирных барабанов на токарных гидрокопировальных станках мод. 1722 и 1712 можно также вести многопроходную обработку.

В мелкосерийном производстве экономически целесообразным может оказаться применение при обработке ступенчатых валов универсальных токарных станков мод. 16K20Ф3С5, 1716ВФ3 и др. с ЧПУ. Шлицевые соединения валов представляют собой многошпоночные соединения, у которых шпонки, называемые шлицами, или зубьями, выполнены за одно целое с валом и служат для передачи вращательных движений и крутящих моментов. Валы также выполняются цельными вал-шестернями.

Шлицы и зубья шестерен нарезают фрезерованием, строганием, протягиванием и холодным накатыванием. При черновом фрезеровании используют многозаходные червячные фрезы, которые увеличивают производительность, но требуемой точности не обеспечивают. Валы с короткими опорными шейками, к которым непосредственно выходят шлицы, нельзя устанавливать в центрах с хомутиком, так как он не дает выхода червячной фрезе. В этом случае шлицевый валик со стороны шпинделя базируется на шлифованной опорной шейке в специальной оправке с обратным конусом либо необходимо использовать торцовый поводковый центр.

Для фрезерования шлицев и зубьев валов-шестерен наиболее целесообразно использовать полуавтоматы мод. 5В370, 5В373П и 5А352ПФ2. Более прогрессивными процессами образования шлицев методом снятия стружки являются контурное шлицестрогание и шлицепротягивание. Строгание шлицев на валах проводят набором фасонных резцов, собранных в головке, и эффективно может быть использовано в крупносерийном и массовом производстве. Шлицестрогание выполняют на станке МА4. Шлицепротягивание проводят двумя блочными протяжками одновременно двух диаметралью противоположных впадин на валу с последующим поворотом вала на определенный угол после каждого хода протяжки. При холодном накатывании шлицы образуются пластическим деформированием без снятия стружки. Накатка выполняется роликами, рейками и многороликовыми профильными головками.

Шпоночные пазы в зависимости от их формы обрабатывают пальцевыми или дисковыми фрезами на фрезерных станках. Для

уменьшения погрешности базирования при установке вала в приспособлении с призмами целесообразно их выполнять самоцентрирующимися (самоцентрирующиеся тиски). Внутреннюю резьбу на валах обычно нарезают машинными метчиками на резьбонарезных, сверлильных, револьверных, а также на агрегатных станках-полуавтоматах и автоматах в зависимости от масштаба производства и имеющегося оборудования. При нарезании глухих резьб для точной остановки движения подачи и вращения метчика применяют самовыключающиеся патроны.

Наружные остроугольные резьбы на валах в зависимости от технических требований, масштаба выпуска и имеющегося оборудования нарезают плашками, резьбонарезными головками, резьбовыми резами, гребенками и групповыми резьбовыми фрезами.

Для отделочной обработки ответственных поверхностей валов используются различные станки для алмазно-абразивной обработки (круглошлифовальные, торцокруглошлифовальные, зубо- и шлицешлифовальные, резьбошлифовальные и др). Для отделочно-упрочняющей обработки используются специальные головки для накатывания и электро-механической обработки.

Автоматические линии для обработки валов применяют как в массовом, так и в крупносерийном производстве, причем целесообразно их выполнять переналаживаемыми, позволяющими обрабатывать на одной линии несколько типоразмеров валов, например, автоматическая переналаживаемая линия МРЛ-13.

В мелкосерийном и серийном производстве для обработки валов широко используются различные роботизированные комплексы и типовые комплексно-автоматизированные участки типа АСВ из оборудования с ЧПУ с применением ЭВМ и гибкие производственные системы. Структура автоматизированных участков типа АСВ строится так, чтобы она обеспечивала функции, характерные для производственных участков, на основе более высокого уровня организации и автоматизации производства. При этом каждая структурная составляющая должна отвечать таким требованиям, при которых сохраняется ее автономное функционирование, а взаимосвязь между ними подчинена единой автоматизированной системе организации производства и управления участком в целом.

Общую структуру участков типа АСВ можно разделить на две части: 1) комплекс оборудования; 2) комплекс систем.

На рис. 5.1.8 представлена структура комплекса оборудования автоматизирован-

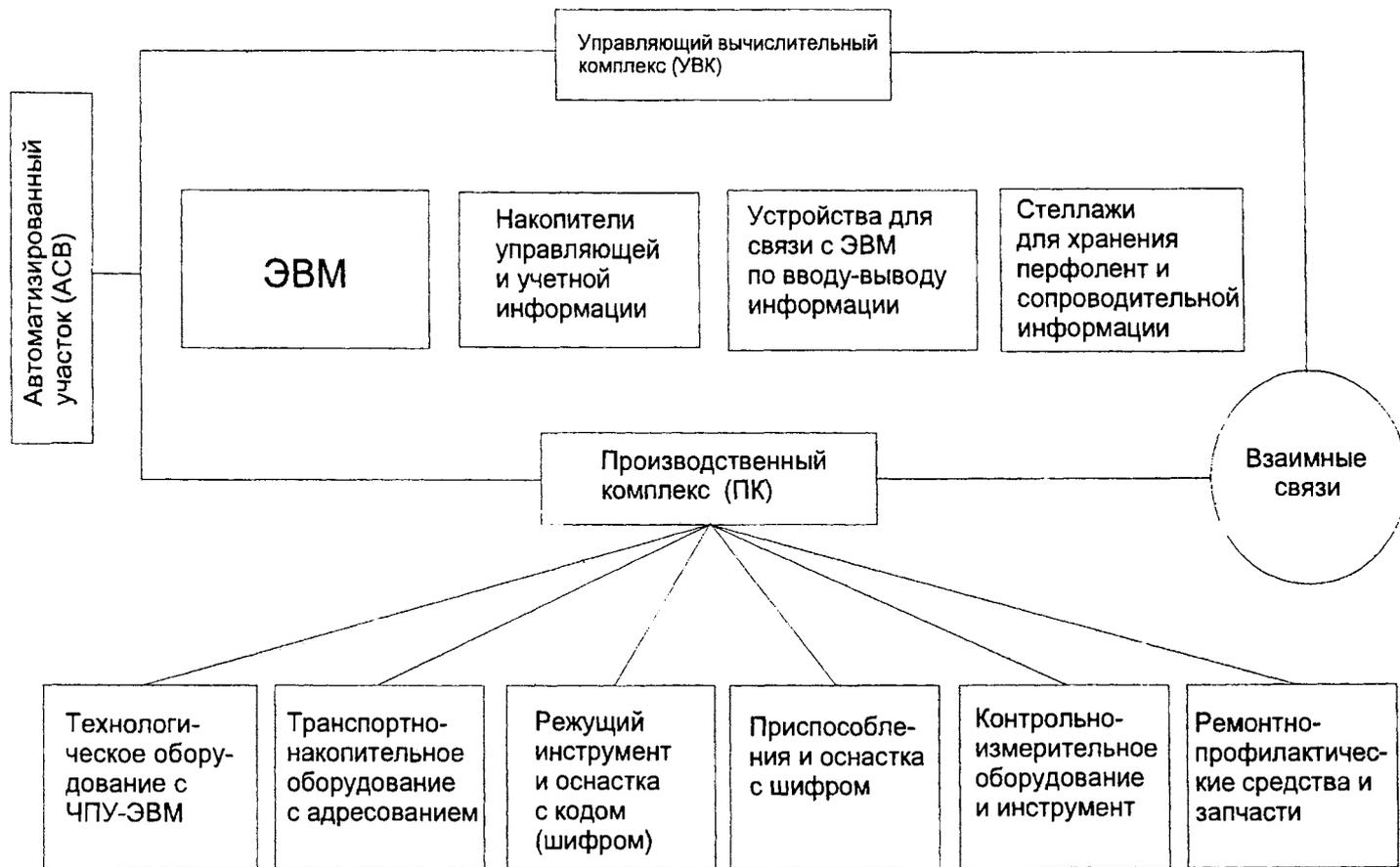


Рис. 5.1.8. Структура комплекса оборудования автоматизированных участков по обработке валов

ных участков. Взаимосвязь управляющего вычислительного комплекса (УВК) и производственного комплекса (ПК) осуществляется через машинную технику (например, при прямом управлении станками в режиме ЭВМ-УЧПУ) или через соответствующий документооборот (например, в случае планирования или учета). Каждый из этих комплексов содержит необходимые виды и типы оборудования, полностью унифицированные при выполнении аналогичных функций. ЭВМ УВК должна быть серийной и не должна содержать чрезмерной избыточности. Автоматизированные участки типа АСВ строятся на основе системного подхода к организации и управлению производством, т.е. каждый вид обеспечения производства рассматривается как система, включающая соответствующие технические средства автоматизации и механизации физического и умственного труда и определенный порядок их взаимодействия.

В состав участков типа АСВ входят токарные полуавтоматы с ЧПУ и сверлильно-фрезерные станки, в том числе многоцелевые станки, охватывающие до 75...80% всей трудоемкости обработки деталей данного типа. С включением в участки шлифовальных и зубообрабатывающих станков с ЧПУ суммарная трудоемкость обработки увеличивается до 90...95%.

Для выполнения отделочных операций в участок встраиваются и универсальные станки. Станки с ЧПУ, рекомендуемые для включения в участки типа АСВ (например, мод. 1П420ПФ30, 1720ПФ30, 1725РФ3), поставляются с расширенными комплектами режущего и вспомогательного инструмента широкоуниверсального назначения. Комплект оснастки для базирования и закрепления заготовок участков АСВ включает оснастку для токарных и сверлильно-фрезерных работ. Токарные станки рекомендуется оснащать трехкулачковыми механизированными клиновыми патронами - центрами типа ПЗКП. Патроны обеспечивают центрирование заготовок самоцентрирующимися быстропереналяживаемыми кулачками (при патронных работах) и самоустановку кулачков по заготовке при обработке ее в центрах. На токарных станках участков АСВ широко используются и торцовые поводковые центры. Для станков сверлильно-фрезерной группы применяются различные системы станочных приспособлений универсального и специального назначения.

Система оперативно-производственного планирования СОПП-4 реализована в рамках операционной системы ДОС РВ-2 на следующих ЭВМ: 1) АСВТ «М-6000»; 2) «СМ-1». В участках типа АСВ применен агрегатно-секционный (модульный) принцип компоновки, в результате чего технологическое и вспомогательное оборудование сосредоточено в станочных и вспомогательных секциях и отделениях.

В состав участка АСВ в его типовом исполнении включены секции: наладки и комплектации инструмента, приема-сдачи и ОТК, силового питания, автоматического манипулятора (трансманипулятора), удаления и сбора стружки, а также диспетчерское отделение, межстаночный транспорт, вспомогательные средства для транспортирования грузов.

#### 5.1.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ (ВАЛЫ, ШПИНДЕЛИ, ХОДОВЫЕ ВИНТЫ)

Последовательность изготовления этих деталей имеет общую закономерность: 1) обработка торцов и зацентровка; 2) черновая обработка наружных поверхностей вращения; 3) обработка шлицев; 4) обработка шпоночных канавок; 5) обработка отверстий; 6) обработка резьб; 7) термообработка; 8) правка центров; 9) чистовая обработка наружных поверхностей вращения; 10) окончательная обработка шлицев, при необходимости и шпоночных канавок; 11) окончательная обработка резьб; 12) окончательная обработка основных рабочих поверхностей (для валов - опорных шеек под подшипники; для шпинделей - шеек под подшипники; внутреннего конуса; для ходовых винтов - ходовой резьбы).

**Изготовление валов.** Маршруты изготовления вала, представленного на рис. 5.1.9 в зависимости от условий производства приведены в табл. 5.1.1 и 5.1.2.

В условиях мелкосерийного производства в качестве заготовки использован прокат, в крупносерийном производстве - поковка.

**Изготовление шпинделей.** Маршрут изготовления шпинделя токарного станка 16К20 (рис. 5.1.10) приведен в табл. 5.1.3.

В качестве заготовки взята поковка, полученная методом свободнойковки.

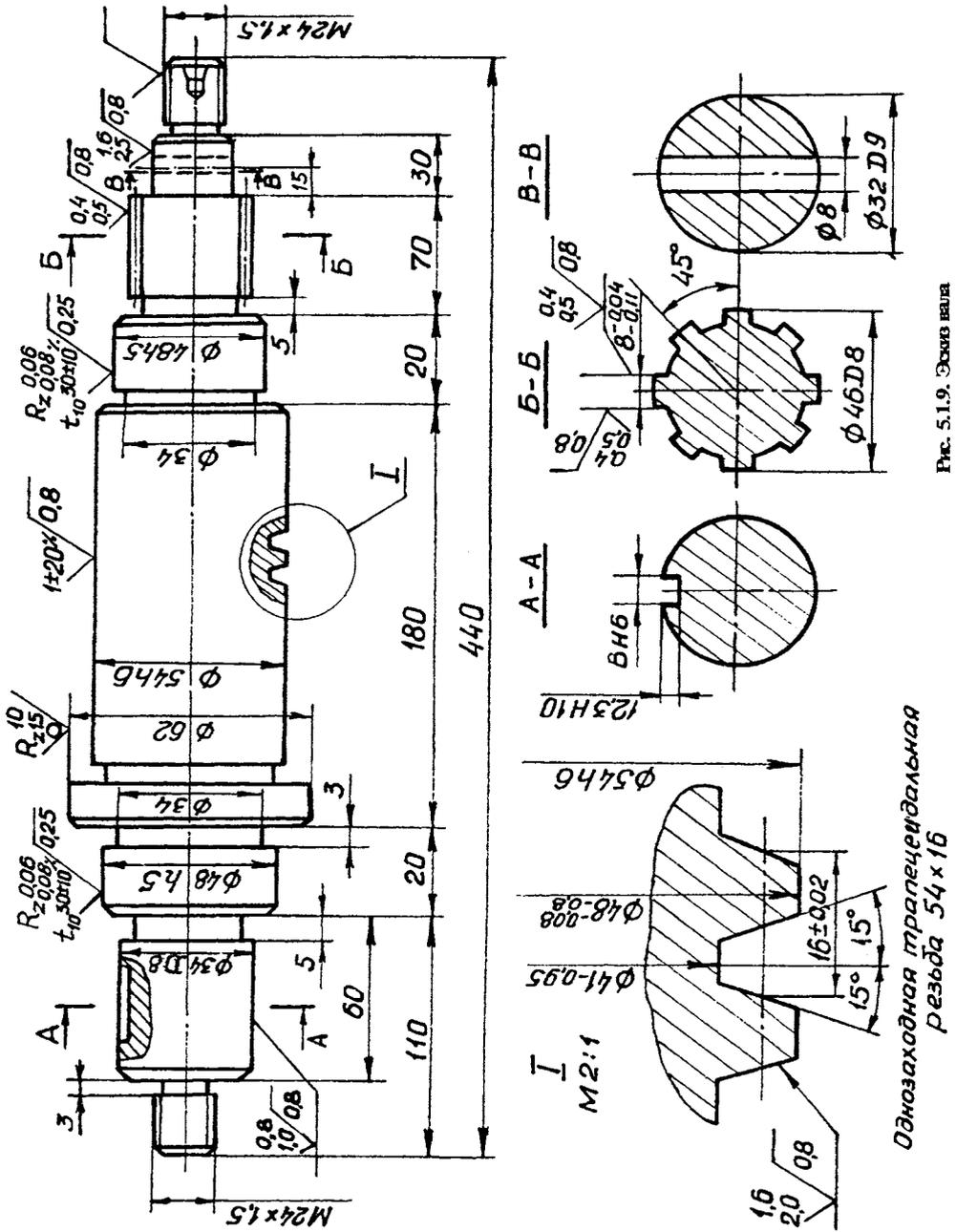


Рис. 5.1.9. Осьев вал

Однозаходная трапециевидальная резьба 54x16

## 5.1.1. Маршрут изготовления вала в условиях мелкосерийного производства

№ операции	Наименование операции	Содержание операции	Технологическая база	Модель
005	Токарно-винторезная	Подрезать и зацентрировать торцы с двух сторон	Цилиндрическая поверхность и торец	Токарно-винторезный станок 1603
010	Токарная с ЧПУ	Точить наружную поверхность вала и нарезать резьбу с одной стороны	Центровочные отверстия и торец	Токарный станок с ЧПУ 1К62ПУ
015	Токарная с ЧПУ	Точить наружную поверхность вала и нарезать резьбу с другой стороны	Центровочные отверстия и торец	Токарный станок с ЧПУ 1К62ПУ
020	Зубофрезерная	Фрезеровать шлицы	Центровочные отверстия и торец	Зубофрезерный станок 5А30П
025	Вертикально-фрезерная	Фрезеровать шпоночный паз	Центровочные отверстия и торец	Вертикально-фрезерный станок 6Н104
030	Вертикально-сверлильная	Сверлить отверстие диаметром 8 мм	Цилиндрическая поверхность диаметром 32 мм и торец	Вертикально-сверлильный станок 2Н125
035	Слесарная	Снять заусенцы и промыть вал	Цилиндрическая поверхность	Слесарный верстак
040	Термическая	Закалить вал 35-40 HRC <sub>3</sub>	Торцовая поверхность диаметром 62 мм	Термопечь
045	Токарно-винторезная	Править центровочные отверстия	Цилиндрическая поверхность	Токарно-винторезный станок 1603
050	Круглошлифовальная	Шлифовать наружные поверхности вала	Центровочные отверстия и торец	Круглошлифовальный станок 3Е12
055	Плоскошлифовальная	Шлифовать шлицы	Центровочные отверстия и торец	Плоскошлифовальный станок 3Б722
060	Резьбошлифовальная	Шлифовать трапецидальную резьбу	Центровочные отверстия и торец	Резьбошлифовальный станок 5К881
065	Токарно-винторезная	Полировать поверхности диаметром 48 мм h5	Центровочные отверстия	Токарно-винторезный станок 1603
070	Слесарная	Промыть и очистить вал	-	Мосечная ванна
075	Контрольная	Проконтролировать вал	Центровочные отверстия	Место контролера

## 5.1.2. Маршрут изготовления вала в условиях крупносерийного производства

№ операции	Наименование операции	Содержание операции	Технологическая база	Модель
005	Фрезерно-центровальная	Фрезеровать и зацентровать торцы с двух сторон	Цилиндрическая поверхность и торец	Фрезерно-центровальный полуавтомат МР-37
010	Токарно-копировальная	Обточить наружную поверхность вала с одной стороны	Центровочные отверстия и торец	Токарно-копировальный полуавтомат 1712П
015	Токарно-копировальная	Обточить наружную поверхность вала с другой стороны	Центровочные отверстия и торец	Токарно-копировальный полуавтомат 1712П
020	Шлицистрогальная	Строгать шлицы	Центровочные отверстия и торец	Шлицистрогальный полуавтомат МА-4В
025	Шпоночно-фрезерная	Фрезеровать шпоночную канавку	Цилиндрическая поверхность диаметром 34 мм и торец	Шпоночно-фрезерный станок ДФ-96Г
030	Вертикально-сверлильная	Сверлить отверстие диаметром 8 мм	Цилиндрическая поверхность диаметром 32 мм и торец	Вертикально-сверлильный станок 2Н125
035	Резьботокарная	Нарезать резьбу	Центровочные отверстия	Резьботокарный полуавтомат К738А
040	Слесарная	Снять заусенцы и промыть вал	Цилиндрическая поверхность	Слесарный верстак
045	Термическая	Закалить вал до 35-40 НRC <sub>2</sub>	Торцовая поверхность диаметром 62 мм	Термопечь
050	Центрошлифовальная	Шлифовать центровочные отверстия	Цилиндрическая поверхность	Центрошлифовальный станок МВ-119
055	Круглошлифовальная	Шлифовать наружные поверхности вала	Центровочные отверстия и торец	Круглошлифовальный станок ЗБ151П
060	Шлицешлифовальная	Шлифовать шлицы	Центровочные отверстия и торец	Шлицешлифовальный полуавтомат ЗП451
065	Резьбошлифовальная	Шлифовать трапецидальную резьбу	Центровочные отверстия и торец	Резьбошлифовальный станок 5К881
070	Круглошлифовальная	Полировать шейки диаметром 48 мм h5	Центровочные отверстия	Круглошлифовальный станок ЗБ151П с двумя полировальными лентами
075	Слесарная	Промыть и очистить вал	-	Моечная ванна
080	Контрольная	Проконтролировать вал	Центровочные отверстия	Контрольная измерительная установка



## 5.1.3. Маршрут изготовления шпинделя в условиях серийного производства

№ операции	Наименование операции	Содержание операции	Технологическая база	Модель
005	Фрезерно-центровальная	Фрезеровать и зацентровать торцы с двух сторон	Цилиндрическая поверхность и торец	Фрезерно-центровальный станок МР-78
010	Токарно-гидрокопировальная	Обточить наружную поверхность и подрезать торец фланца	Центровочные отверстия и торец	Гидрокопировальный станок 1Б732
015	Токарно-гидрокопировальная	Обточить наружную поверхность канавки, фаски и подрезать торцы	Центровочные отверстия и торец	Гидрокопировальный станок 1Б732
020	Токарно-винторезная	Обточить фланец, конус, подрезать торцы фланцев и шпинделя, точить канавки и фаски	Центровочные отверстия и торец	Токарно-винторезный станок 16К20 с гидросуппортом ГСЗ-45
025	Сверлильная	Сверлить осевое отверстие	Цилиндрическая поверхность и торец	Станок РТ-54 для глубокого сверления
030	Слесарная	Снять заусенцы и промыть	Центровочные отверстия	Слесарный верстак
035	Термическая	Провести стабилизационный отпуск	Цилиндрическая поверхность	Термопечь
040	Вертикально-сверлильная	Зенкеровать отверстия под конус	Цилиндрическая поверхность и торец	Вертикально-сверлильный станок 2А150
045	Токарная	Подрезать торец, расточить конус и снять фаски с двух сторон	Цилиндрическая поверхность и торец	Токарный станок МК-6023
050	Агрегатная	Сверлить, зенкеровать, развернуть и нарезать резьбу в отверстиях фланца	Цилиндрическая поверхность и торец	Станок 10А471 восьмипозиционный агрегатно-сверлильный
055	Токарно-копировальная	Обточить все шейки шпинделя	Конусные отверстия и торец	Токарно-копировальный полуавтомат 16К20М
060	Шлицефрезерная	Фрезеровать шлицы	Конусные отверстия и торец	Шлицефрезерный станок 5350А
065	Слесарная	Снять заусенцы и промыть	Конусные отверстия	Слесарный верстак
070	Термическая	Закалить шейки, шлицы, наружный и внутренний конус и торец фланца	Конусные отверстия	Установка ТВЧ

Продолжение табл. 5.1.3

075	Кругло-шлифовальная	Шлифовать наружный конус и торец фланца	Конусные отверстия	Круглошлифовальный станок 3Т161Н29
080	Токарная с ЧПУ	Обточить наружную поверхность и нарезать прямоугольную резьбу	Конусные отверстия и торец	Токарный станок 6722 с ЧПУ
085	Внутришлифовальная	Шлифовать технологический конус с обратной стороны	Цилиндрическая поверхность и торец	Внутришлифовальный станок СШ-148
090	Внутришлифовальная	Шлифовать внутренний конус фланца	Цилиндрическая поверхность и торец	Внутришлифовальный станок СШ-148
095	Круглошлифовальная	Шлифовать наружные рабочие поверхности	Конусные отверстия и торец	Круглошлифовальный станок ХШ-4-32
100	Шлицешлифовальная	Шлифовать шлицы	Конусные отверстия и торец	Шлицешлифовальный станок 3451Б
105	Круглошлифовальная	Шлифовать рабочие поверхности окончательно	Конусные отверстия и торец	Круглошлифовальный станок 3М152М
110	Круглошлифовальная	Шлифовать наружный конус и торец фланца	Конусные отверстия и торец	Круглошлифовальный станок ХШ4-11ПН12
115	Круглошлифовальная	Шлифовать торец фланца с другой стороны	Конусные отверстия и торец	Круглошлифовальный станок ХШ4-11ПН12
120	Круглошлифовальная	Шлифовать опорные шейки под подшипники окончательно	Конусные отверстия и торец	Круглошлифовальный станок 3М1528
125	Внутришлифовальная	Шлифовать внутренний конус фланца	Опорный шейки под подшипники и торец	Внутришлифовальный станок СШ-37
130	Слесарная	Снять заусенцы, калибровать резьбы, промыть и протереть	-	Слесарный верстак
135	Контрольная	Проконтролировать шпиндель	Конусные отверстия	Контрольно-измерительная установка

**Изготовление ходовых винтов.** Маршрут изготовления ходового винта нормальной точности токарного станка 16К20 (рис. 5.1.11) представлен в табл. 5.1.4. В качестве заготовки использован калиброванный прут.

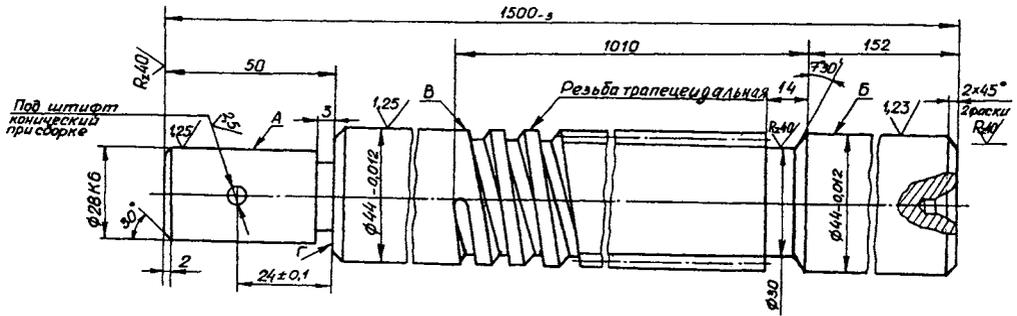


Рис. 5.1.11. Эскиз ходового винта токарного станка 16К20

#### 5.1.4. Маршрут изготовления ходового винта токарного станка 16К20 в условиях серийного производства

№ операции	Наименование операции	Содержание операции	Технологическая база	Модель
005	Токарно-винторезная	Подрезать и зацентрировать торцы и снять фаски с двух сторон	Наружная поверхность	Токарно-винторезный станок 16К20
010	Токарно-винторезная	Обточить поверхность А, подрезать торец Г, прорезать канавку и снять фаски	Центровочные отверстия и торец	Токарно-винторезный станок 16К20
015	Токарно-винторезная	Обточить канавку и снять фаски с другой стороны	Центровочные отверстия и торец	Токарно-винторезный станок 16К20
020	Круглошлифовальная	Шлифовать наружную поверхность ходового винта в размер диаметром 44,5 мм h 6	Центровочные отверстия	Круглошлифовальный станок
025	Токарно-винторезная	Нарезать трапецидальную резьбу $P=12$ мм с припуском 0,5 мм	Центровочные отверстия и торец	Токарно-винторезный станок 1622Б
030	Токарно-винторезная	Точить канавку трапецидальной резьбы с припуском 0,12 мм, снять фаску $7^\circ 30'$	Центровочные отверстия и торец	Токарно-винторезный станок 1К62В
035	Вертикально-сверлильная	Сверлить отверстие диаметром 8 мм под штифт	Наружная поверхность	Вертикально-сверлильный станок 2Н125
040	Слесарная	Зачистить заусенцы, промыть и протереть	-	Слесарный верстак

Продолжение табл. 5.1.4.

045	Круглошлифовальная	Шлифовать до диаметра 44 мм - 0,017	Центровочные отверстия	Круглошлифовальный станок 3М151В
050	Токарно-винторезная	Править винт с припуском до 0,05 мм, проточить боковые стороны резьбы с припуском 0,05 мм, снять фаски 0,25 мм по ниткам резьбы	Центровочные отверстия	Токарно-винторезный станок 1622В
055	Токарно-винторезная	Нарезать трапецидальную резьбу $P=12$ мм окончательно	Центровочные отверстия	Токарно-винторезный станок 1622В
060	Круглошлифовальная	Шлифовать поверхность диаметром 28 мм h6 окончательно	Центровочные отверстия	Круглошлифовальный станок 3М151В
065	Контрольная	Проконтролировать ходовой винт	Центровочные отверстия	Контрольно-измерительная установка
070	Слесарная	Протереть винт и покрыть антикоррозионным раствором		Слесарный верстак

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.А., Ковальчук Е.Р., Колесов И.М. и др. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение. 1986. 480 с.

2. Ильицкий В.Б., Миктянский В.В., Сердюк Л.М. Станочные приспособления. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение. 1989. 208 с.

3. Станочное оборудование автоматизированного производства / Под ред. В.В. Бушуева. М.: Станкин. 1993. 584 с.

4. Сулов А.Г., Браун Э.Д., Виткевич Н.А. и др. Качество машин: Справочник в 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение. 1995. 256 с.

## Глава 5.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ5.2.1. ТРЕБОВАНИЯ К ТИПОВЫМ КОНСТРУКЦИЯМ  
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Служебное назначение корпусных деталей. Корпусные детали машин представляют

собой базовые детали, на которые устанавливают различные присоединяемые детали и сборочные единицы, точность относительного положения которых должна обеспечиваться как в статике, так и в процессе работы машин под нагрузкой. В соответствии с этим корпусные детали должны иметь требуемую точность, обладать необходимыми параметрами жесткости и виброустойчивости, что обеспечивает постоянство относительного положения соединяемых деталей и узлов, правильность работы механизмов и отсутствие вибраций.

На рис. 5.2.1 представлен редуктор конвейера, используемого в системе удаления стружки на автоматических линиях. Корпус 1 является базовой деталью, обеспечивающей требуемую точность относительного положения червяка 2, вала 3, на котором установлено червячное колесо 4. На корпусе базируются также фланцы 5, 6, заглушка 7.

Основной базирующей поверхностью корпуса, по которой его устанавливают на станину, является плоскость А. Поверхности главных отверстий и торцов, на которых базируются подшипники и фланцы, являются вспомогательными базами корпуса. Резьбовые отверстия на корпусе обеспечивают крепление присоединяемых к нему деталей и узлов.

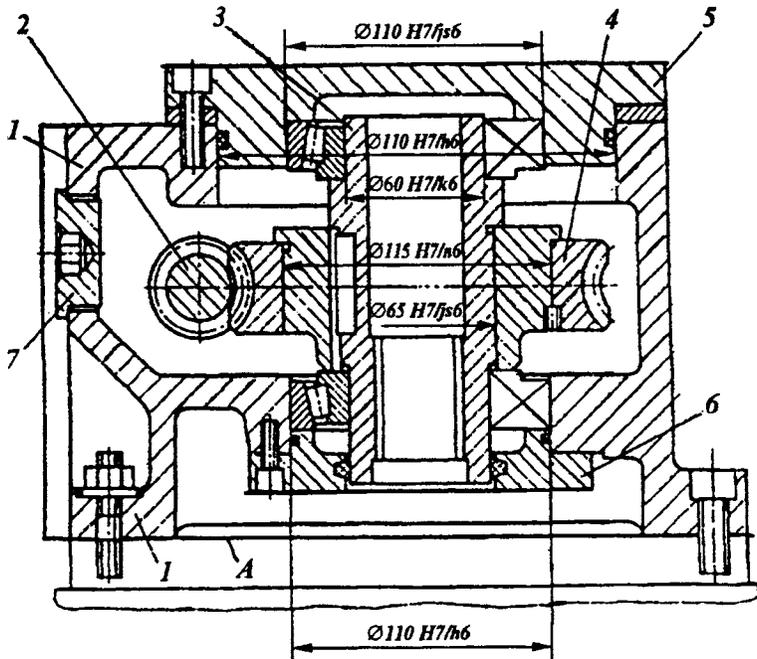


Рис. 5.2.1. Редуктор конвейера

В двигателе внутреннего сгорания базовой корпусной деталью является блок цилиндров. В блоке цилиндров установлены с требуемой точностью различные детали и механизмы двигателя (коленчатый вал, шатунно-поршневая группа, головка блока, масляный и топливный насос, картер двигателя, масляный фильтр и др.). Для базирования этих узлов в блоке цилиндров имеются соответствующие комплексы вспомогательных баз, которые определяют требуемое положение узлов в процессе работы двигателя. Поршни двигателя базируются по внутренним цилиндрическим поверхностям большого диаметра, головка - по верхней плоскости разьема, коленчатый вал - в отверстиях под коренные шейки и т.д. Двигатель базируется на раме. Блок цилиндров работает в условиях вибрации и ударных нагрузок при высоких давлениях и температурах в камерах сгорания. Все это предопределяет повышенные требования к материалу и точности изготовления нагруженных внутренних поверхностей корпуса, в котором циркулируют охлаждающая жидкость и смазочный материал.

Корпусные детали машин в общем случае можно разделить по группам (рис. 5.2.2). Детали, принадлежащие каждой из групп, имеют общность служебного назначения, что означает наличие совокупности одинаковых поверхностей и идентичное по форме конст-

руктивное исполнение. Все это определяет особенности технологических решений, обеспечивающих достижение требуемых параметров точности при изготовлении деталей каждой из групп.

*Группа 1:* корпусные детали коробчатой формы в виде параллелепипеда, габаритные размеры которых имеют одинаковый порядок. К этой группе относятся корпуса различных редукторов, корпуса коробок скоростей, коробки передач, корпуса шпиндельных бабок (рис. 5.2.2, а). В большинстве случаев основными базами таких корпусов являются плоские поверхности, а вспомогательными базами служат главные отверстия и торцы, предназначенные для базирования валов и шпинделей. Конструкция и размеры корпусов зависят от условий размещения в них необходимых деталей и механизмов.

Они имеют также стенки, ребра и перегородки, повышающие их жесткость. С этой же целью имеющиеся бобышки и приливы, на которых расположены главные отверстия, имеют высоту 2,5-3 толщины стенки и диаметр в пределах 1,4...1,6 диаметра отверстия. Корпуса коробчатой формы могут быть цельные и разъемные. При этом плоскость разьема может проходить по осям главных отверстий.

*Группа 2:* корпусные детали с гладкими внутренними цилиндрическими поверхностями-

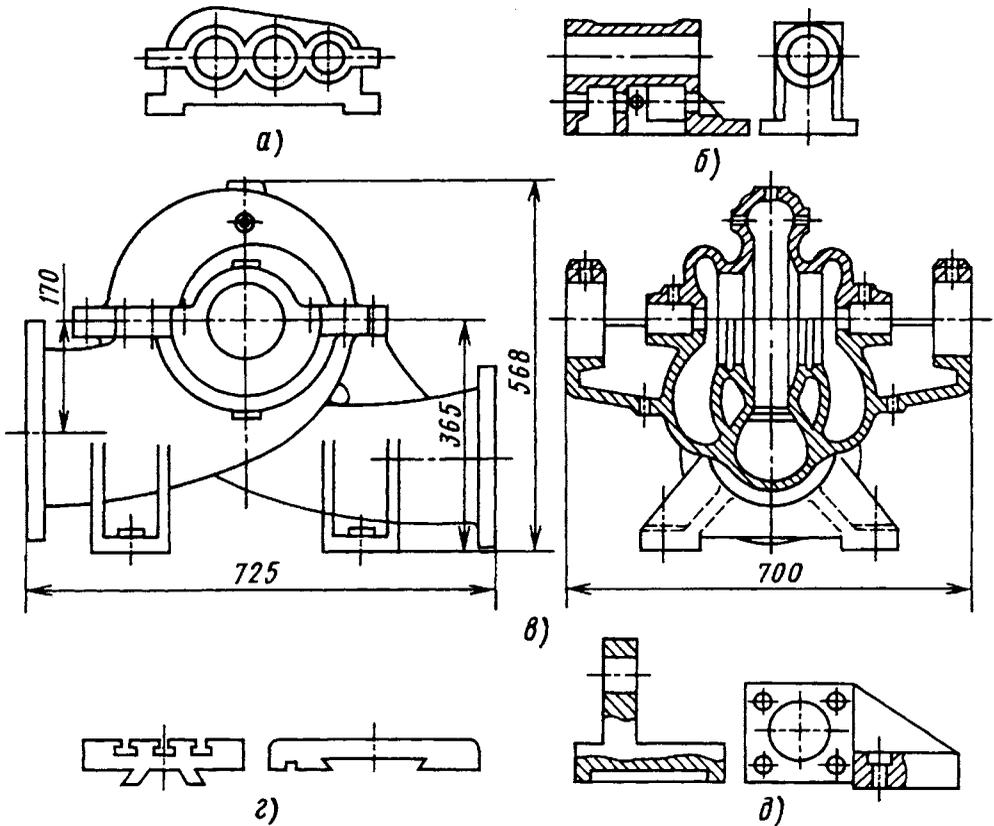


Рис. 5.2.2. Виды корпусных деталей

ми, протяженность которых превышает их диаметральный размеры. К этой группе относятся блоки цилиндров, двигателей и компрессоров, корпуса различных цилиндров и гидрораспределителей, пневмо- и гидроаппаратура (рис. 5.2.2, б), а также корпуса задних бабок, обеспечивающих базирование выдвигной пиноли и заднего центра. В соответствии со служебным назначением к внутренним цилиндрическим поверхностям предъявляются требования по точности диаметральных размеров и точности формы. Эти цилиндрические поверхности обычно работают на изнашивание. Поэтому к ним предъявляют высокие требования по шероховатости и износостойкости.

*Группа 3:* корпусные детали сложной пространственной геометрической формы. К этой группе относятся корпуса паровых и газовых турбин, корпуса центробежных насосов, коллекторов тройников, вентилялей, кранов (рис. 5.2.2, в). Сложная пространственная форма и геометрические размеры таких корпусов предназначены для формирования тре-

буемых потоков движения газов или жидкостей. К этой группе относятся также сложные по форме корпусные детали ходовой части автомашины (картер заднего моста, корпус поворотного рычага и др.).

*Группа 4:* корпусные детали с направляющими поверхностями. Это столы, спутники, каретки, салазки, суппорты, ползуны, планшайбы (рис. 5.2.2, г). В процессе работы эти детали совершают возвратно-поступательное или вращательное движение по направляющим поверхностям, обеспечивая точное относительное перемещение обрабатываемых заготовок или режущего инструмента. Такие корпуса входят в состав несущей системы большинства станков. Требуемая жесткость этих деталей достигается созданием внутренних перегородок и ребер. Отношение высоты плоских столов, спутников, салазок к ширине находится в пределах 0,1...0,18.

*Группа 5:* корпусные детали типа кронштейнов, угольников, стоек и крышек (рис. 5.2.2, д). Эта группа объединяет наиболее простые по конструкции корпусные детали,

которые выполняют функции дополнительных опор для обеспечения требуемой точности относительного положения отдельных механизмов, валов, зубчатых колес.

При обработке корпусных деталей должны быть обеспечены в установленных пределах отклонения от параллельности и перпендикулярности осей основных отверстий друг к другу и к базовым поверхностям, а также от соосности этих отверстий; заданные межосевые расстояния; точность диаметров и правильность формы отверстий; отклонения от перпендикулярности торцовых поверхностей осей отверстий; прямолинейность поверхностей.

Основные отверстия под подшипники выполняют по 7-му качеству точности с параметром шероховатости  $Ra=2,5...0,25$  мкм, реже по 6-му качеству точности с параметром шероховатости  $Ra=0,63...0,08$  мкм. Отклонения от соосности отверстий допускают в пределах половины допуска на диаметр меньшего отверстия, а их конусообразность и овальность не более  $0,3...0,5$  поля допуска на диаметр. Допуски на межосевые расстояния для цилиндрических зубчатых передач с межцентровым расстоянием  $50...80$  мм рекомендуются от  $\pm 25$  до  $\pm 280$  мкм.

Межосевой угол конических передач выдерживают от  $\pm 18$  до  $\pm 210$  мкм на длине образующей делительного конуса  $50...800$  мм. Отклонения межосевого расстояния червячных передач при 7, 8 и 9-й степенях точности и межцентровом расстоянии  $40...630$  мм составляют  $\pm 30... \pm 210$  мкм. Отклонение от параллельности осей отверстий составляет  $0,02-0,05$  мм на  $100$  мм длины.

Поверхности прилегания обрабатывают с параметром шероховатости  $Ra=6,3...0,63$  мкм, а их отклонения от прямолинейности допускают  $0,05...0,2$  мм на всей длине. К поверхностям скольжения предъявляют более высокие требования: параметр шероховатости  $Ra=1,0...0,2$  мкм, отклонение от плоскостности  $0,05$  мм на  $1$  м. Отклонение от перпендикулярности торцовых поверхностей к осям отверстий допускают в пределах  $0,01-0,1$  мм на  $100$  мм радиуса. Параметр шероховатости этих поверхностей задают в пределах  $Ra=6,3...1,25$  мкм. У разъемных корпусов несовпадение осей отверстий с плоскостью разреза допускается  $0,2$  мм, а при диаметре отверстий более  $300$  мм -  $0,3$  мм.

#### **Материалы корпусных деталей (КД).**

Выбор марки материала для КД определяется эксплуатационными, технологическими и экономическими требованиями.

Большинство корпусных деталей изготавливают из серого чугуна и стали; применяют также ковкий чугун, легированные стали и сплавы цветных металлов. Основным конструкционным материалом для корпусных деталей является серый чугун. Он обладает хорошими литейными свойствами, что позволяет изготавливать отливки корпусов сложной конфигурации. При относительно невысокой стоимости и хорошей обрабатываемости серый чугун имеет неплохие физико-механические свойства, которые зависят от структуры металлической основы, формы, размеров, количества и распределения графитовых включений. Поэтому механические свойства серого чугуна можно изменять в достаточно широких пределах путем изменения химического состава, скорости кристаллизации и охлаждения отливки модифицированием и термической обработкой. Кроме того, серый чугун обладает высокой циклической вязкостью, что способствует демпфированию колебаний. Наличие графитовых включений делает чугун практически нечувствительным к надрезам, и это позволяет конкурировать ему с более прочной сталью со сопротивлением усталости и пределу выносливости. Включения графита обеспечивают также высокую износостойкость чугуна в условиях трения скольжения со смазкой. Все это значительно расширяет область использования серого чугуна для корпусных деталей.

Химический состав и механические свойства отливок из серого чугуна с пластинчатым графитом регламентируется ГОСТ 1412. Число, определяющее марку чугуна, соответствует пределу прочности при растяжении.

Для изготовления малонагруженных деталей типа крышек, плит, поддонов применяют чугун марки СЧ 10.

Корпусные детали металлорежущих станков, не имеющие поверхностей систематически работающих на износ, корпуса стационарных редукторов, центробежных насосов, корпусные детали сельскохозяйственных машин изготавливают из серого чугуна СЧ 15, СЧ 18, СЧ 20.

Корпусные детали с направляющими, к которым предъявляются повышенные требования к износостойкости, изготавливают из чугуна СЧ 20 и модифицированного чугуна СЧ 30, СЧ 35.

Ответственные детали автомобильных и тракторных двигателей (блоки цилиндров, головки) делают из чугуна СЧ 21 и СЧ 25. Корпуса паровых турбин, работающие при повышенных температурах до  $250$  °С, изготавливают из серого чугуна СЧ 21 и модифицированного перлитного чугуна СЧ 30.

Корпусные детали, работающие в условиях вибрации и подвергающиеся ударным нагрузкам, изготавливают из ковкого чугуна (корпусы заднего моста, дифференциала и др.) и литейной стали (картеры задних мостов автомобилей большой грузоподъемности изготавливают из стали 40Л).

Корпуса высоконапорных насосов, компрессоров изготавливают из чугунов повышенной прочности СЧ 25, СЧ 30 или стальных отливок. Корпуса паровых турбин, работающих при температуре 250...400 °С и высоком давлении, изготавливают из модифицированных чугунов повышенной прочности и стали 30Л. Для паровых турбин, работающих при температурах 400...500 °С, применяют молибденовые и хромомолибденовые стали.

Плиты спутников изготавливают из сталей 30Л, 40Х, 12ХНЗА. Корпуса электродвигателей отливают из стали 15Л. Корпусные детали, работающие в соприкосновении с агрессивной средой (кислотами, щелочами, морской водой), изготавливают из коррозионно-стойких материалов, в частности хромистых, хромоникелевых сталей (12Х18Н9ТЛ и др.), а также бронз (Бр03Ц12С5, Бр08Ц4, БрА10МЦ2Л) и латуней (ЛЦ30А3).

Для изготовления корпусных деталей малой массы в авиации и транспортном машиностроении используют алюминиевые и магниевые сплавы. Наибольшее распространение получили сплавы системы Al-Si, Al-Si-Mg, которые отличаются хорошими технологическими свойствами.

Сплавы АК9ч (АЛ4), АК7ч (АЛ9), АК9, АК7 применяют для сложных и крупногабаритных деталей (картер ДВС и др.). Сплав АК8 (АЛ34) предназначен для литья сложных по конфигурации корпусных деталей, работающих под высоким давлением (до 45 МПа) и температуре до 200 °С.

Средненагруженные корпусные детали, работающие при температурах до 250 °С и давлениях до 23 МПа изготавливают из сплава АК5М (АЛ5) в термически обработанном состоянии (например, головки цилиндров двигателей воздушного охлаждения).

Характерными особенностями магниевых сплавов являются малая плотность при сравнительно высоких механических свойствах, хорошая работоспособность при ударных нагрузках и высокая способность к поглощению энергии.

Различные корпуса приборов изготавливают из сплава МЛ4. Корпуса, картеры, кронштейны, работающие при температурах до 150 °С, отливают из сплавов МЛ5, МЛ6.

Корпуса насосов, от которых требуется высокая герметичность, изготавливают из сплава МЛ3. Корпусные детали, которые наряду с герметичностью должны обладать и жаропрочностью, изготавливают из сплавов МЛ10 (рабочая температура 250...300 °С) и МЛ11 (выдерживает длительную эксплуатацию при 250...350 °С, а кратковременную до 400 °С).

Химический состав, механические свойства, методы испытаний различных материалов регламентируются соответствующими стандартами.

Сварные корпусные детали редукторов, сварные детали типа кронштейнов, стоек, угольников изготавливают из листовой низкоуглеродистой стали Ст3, Ст4. Штамповарные картеры задних мостов автомобилей изготавливают из листовой стали 35, 40.

## 5.2.2. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК

Выбранный материал для заготовки во многом определяет и метод ее изготовления. Заготовки корпусных деталей получают литьем, сваркой и значительно реже обработкой давлением.

Отливки корпусов изготавливают как литьем в разовые формы - песчаные, оболочковые, по выплавляемым моделям, так и литьем в многократные металлические формы - кокили и под давлением.

Целесообразный способ производства корпусных заготовок зависит от типа производства, массы отливки, ее габаритных размеров и конструктивных особенностей. Сравнительные показатели различных способов литья приведены в табл. 5.2.1.

**Литье в песчаные формы** является наиболее универсальным. Для изготовления крупных и средних отливок корпусов в единичном и мелкосерийном производстве применяют формовку в почве и ручную формовку в парных опоках. Машинная формовка по металлическим моделям применяется для получения мелких и средних отливок в серийном и массовом производствах.

Точность размеров и параметры шероховатости поверхности отливок из основного литейного материала - чугуна при ручной и машинной формовке приведены в табл. 5.2.2.

**Литье в оболочковые формы.** Получают сложные отливки массой до 200 кг с максимальными размерами до 1500 мм. Наиболее целесообразно изготавливать небольшие по массе корпуса в условиях крупносерийного и массового производства. Не рекомендуется отливать крупные отливки коробчатой формы из-за возможной рзностенности отливки.

## 5.2.1. Сравнительные показатели различных способов литья

Способ литья	Параметр отливки		Коэффициент весовой точности *	Относительная себестоимость 1 т отливок	Экономическая оправданная серийность, шт.	Основное преимущество способа литья
	Масса, кг	Максимальный размер, мм				
П	До 10000	Без ограничений	60-70	100	Без ограничений	Универсальность, низкая стоимость отливок
О	До 30	До 500	80-95	1,5-2,0	200-500	Высокая точность отливок
В	До 100	До 1000	90-95	2,5-3,0	1000	Точность отливок при сложной кон- фигурации
К	До 2000	До 2000	75-80	1,2-1,5	400-800	Повышенная точность отливок при улучшенной структуре
Д	До 52	До 1200	90-95	1,8-2,0	1000	Высокая произво- дительность, точность отливок

\*) Отношение массы детали к массе заготовки.

Способы литья: П - в песчаные формы; О - в оболочковые формы; В - по выплавляемым моделям; К - в кокиль; Д - под давлением

## 5.2.2. Точность размеров отливок из чугуна

Литье в разовые песчаные формы	Нормальная точность		Достижимая точность		Rz, мкм
	Класс по ГОСТ 26645	Поле допус- ка	Класс по ГОСТ 26645	Поле допус- ка	
Ручная формовка	9-14	IT12-IT13 и грубее	7-12	IT11-IT13	80-160
Машинная встряхивани- ем с подпрессовкой	8-13	IT11-IT13 и грубее	6-11	IT10-IT13	80-160
Машинная прессованием под высоким давлением	7-12	IT10-IT13 и грубее	5-10	IT9-IT12	40-80

Данные относятся к отливкам II и III групп сложности на размеры до 500 мм включительно.

**Литье по выплавляемым моделям** используют для изготовления корпусных деталей из любых литейных сплавов сложных тонкостенных конструкций. Минимальная толщина стенок может быть 1 мм, а параметр шероховатости поверхности достигается от Rz=20 мкм до Ra=1,25 мкм.

**Литье в кокиль** применяют для получения корпусных деталей из цветных сплавов, чугуна и стали в условиях серийного и массового производства. В общем объеме производства из цветных сплавов на долю кокильного

литья приходится около 40%. Это обусловлено такими преимуществами литья как повышенная размерная точность отливок, высокая производительность процесса, возможность его автоматизации, возможность использования многократной формы и сложных песчаных стержней, более высокие механические и эксплуатационные свойства отливок. Оптимальная толщина стенок кокильных отливок составляет: для отливок из серого чугуна 6...8 мм; из высокопрочного чугуна и стальных отливок 8...10 мм, отливок из алюминии-

## 5.2.3. Параметры точности для отливок из алюминиевых и магниевых сплавов

Литье	Наибольший габаритный размер отливки, мм	По ГОСТ 26645		Квалитет точности размеров	Ra, мкм
		Класс размерной точности	Степень шероховатости поверхности		
Под давлением	До 100	3Т-6	2-6	8-10	2,5-6,3
	Св. 100 до 250	3-7Т	3-7	8-11	3,2-8,0
	» 250 » 630	4-7	4-8	9-11	4,0-10,0
По выплавляемым моделям	До 100	4-8	3-8	9-12	3,2-10,0
	Св. 100 до 250	5Т-9Т	4-9	10-12	4,0-12,0
	» 250 » 630	5Т-9	5-10	10-12	5,0-16,0
В кокиль без песчаных стержней	До 100	5-9	4-9	10-12	4,0-12,5
	Св. 100 до 250	5-9	5-10	10-12	5,0-16,0
	» 250 » 630	6-10	6-11	10-13	6,3-40,0
	» 630 » 1600	7-11Т	-	11-13	-
В оболочковые формы из терморезистивных смесей	До 100	7-11	6-12	11-13	6,3-25,0
	Св. 100 до 250	7-12	7-13	11-13	8,0-32,0
	» 250 » 630	8-13Т	8-14	12-14	10,0-40,0
	» 630 » 1400	9Т-13	-	12-14	-
	» 1400 » 4000	9-13	-	12-14	-

вых сплавов - 3...7 мм; магниевых сплавов 5...10 мм, кремнистой латуни типа ЛЦ16К4 - 8...12 мм.

Литьем под давлением изготавливают сложные по конфигурации тонкостенные отливки, максимально приближающиеся по размерам к готовой детали. Этот способ высокопроизводителен с высоким уровнем автоматизации процесса и применяется для получения заготовок корпусных деталей из цветных сплавов - цинковые, алюминиевые, магниевые, реже медные (латуни типа ЛЦ16К4).

В табл. 5.2.3 приведены средние параметры точности и параметров шероховатости для отливок из алюминиевых и магниевых сплавов. Для мелкосерийного и единичного производства иногда более рационально применять сварные заготовки КД. Некоторые заготовки корпусов трубопроводной арматуры с боковыми отростками, крестовины изготавливают обработкой давлением - выдавливанием в разъемных штампах.

Технологический процесс изготовления заготовок корпусных деталей должен включать меры для уменьшения деформаций за счет неравномерности охлаждения, усадки сплава или сварочных напряжений, особенно, если деталь имеет направляющие отверстия для установки валов.

Очень часто КД подвергают после изготовления термической обработке для уменьшения и перераспределения внутренних напряжений, стабилизации размеров, улучшения структуры и обрабатываемости резанием.

## 5.2.3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ

Выбор технологических баз определяется служебным назначением детали на основании выявления функции ее поверхностей, анализа требований к точности детали. Результатом выполнения этих работ является выявление исполнительных поверхностей, комплектов основных и вспомогательных баз, свободных поверхностей деталей.

Если конфигурация детали достаточно проста и у детали имеется не более одного комплекта вспомогательных баз, то бывает возможна и целесообразна обработка детали за одну установку. В этом случае в качестве технологических баз используют свободные поверхности.

Однако большинство заготовок деталей обработать за одну установку оказывается физически невозможным или экономически не целесообразным. В этом случае задача выбора технологических баз решается в два эта-

па. На первом этапе выбираются технологические базы для обработки большинства поверхностей и получения наиболее точных размеров. На втором этапе выбираются технологические базы для обработки заготовки детали на первой (первых) операциях.

**Первый этап.** В качестве технологических баз для обработки большинства поверхностей следует выбирать поверхность, по отношению к которой ориентировано и наиболее лимитировано положение большинства других поверхностей. Это позволит получать размеры, связывающие эти поверхности, кратчайшим путем. Как правило, этим требованиям удовлетворяют основные базы детали. Использование основных баз детали в качестве технологических при обработке большинства поверхностей сделает возможным соблюдение принципа единства баз на всех операциях.

Отступают от этого требования в следующих случаях:

- при обработке поверхностей основных баз, когда в качестве технологических баз приходится использовать вспомогательные базы, исполнительные или свободные поверхности;

- в случаях, когда требуется обеспечить более высокую точность положения вспомогательных баз и исполнительных поверхностей не относительно основных, а относительно вспомогательных баз. В качестве технологических баз у такого рода деталей следует использовать те вспомогательные базы, с которыми связаны все остальные;

- в случаях, когда размеры поверхностей основных баз малы и использование их в качестве технологических приводит к погрешности установки заготовки, выходящей за допустимые пределы. Во избежание этого в качестве технологических баз используют вспомогательные базы или вспомогательные поверхности;

- в случаях, когда конструкция формы детали такова, что ни одну из ее поверхностей нельзя использовать в качестве технологической базы. Тогда технологические базы создают искусственно или в виде специально обработанных приливов, или в виде центровых отверстий и т.п.

**Второй этап.** Выбор технологических баз для первой (первых) операций. На первой (первых) операции решаются два типа задач:

- 1) устанавливаются размерные связи между обрабатываемыми и необрабатываемыми поверхностями;

- 2) производится распределение фактически имеющихся припусков на обработку меж-

ду поверхностями заготовки, подлежащими обработке.

При решении задач первого типа стремятся добиться:

- равномерной толщины стенок детали с целью обеспечения достаточной ее прочности и динамической уравновешенности;

- достаточной величины зазоров, предусмотренных конструкцией между поверхностями присоединяемых деталей к данной детали, во избежание возможного их соприкосновения во время монтажа и эксплуатации машины.

При распределении припусков на обработку между отдельными поверхностями детали руководствуются:

- необходимостью сохранения плотного однородного слоя материала на наиболее ответственных поверхностях детали, таких как поверхности направляющих станин, кареток и т.д.;

- необходимостью равномерного распределения припуска на каждой отдельной поверхности и, в первую очередь, на охватывающих поверхностях в виде поверхностей пазов, отверстий и т.п.

#### 5.2.4. ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

**Методы обработки наружных поверхностей.** Для обработки наружных плоскостей корпусных деталей применяют строгание, фрезерование, точение, шлифование и протягивание.

В единичном и мелкосерийном производстве, а также при обработке крупных, тяжелых деталей широко используют строгание. Объясняется это: простотой и дешевой инструментом и наладки, возможностью обработки поверхности сложного профиля с помощью простого универсального инструмента; малой чувствительностью инструмента к литейным дефектам и возможностью снимать за один проход большие припуски (до 20 мм).

Производительность строгания низкая из-за холостых ходов и относительно низких скоростей возвратно-поступательного движения. Увеличивать скорости резания и холостых ходов нельзя из-за возникновения больших инерционных сил при перемене направления движения.

Производительность строгания повышается при обработке групп деталей, расположенных в один или несколько рядов на столе станка, из-за уменьшения потерь времени на перебеги стола в конце рабочего и холостого ходов, из-за уменьшения вспомогательного

времени на пуск и остановку станка, приготовление инструмента, закрепление заготовок. Можно применять также групповую обработку деталей различных наименований. Производительность строгания также повышается при обработке длинных узких поверхностей.

Наибольшее распространение при обработке плоскостей корпусных деталей получил метод фрезерования. В зависимости от характера и расположения обрабатываемых поверхностей применяют станки консольно-фрезерные, продольно-фрезерные, с количеством шпинделей один-восемь и более, карусельно-фрезерные, барабанно-фрезерные.

При выборе станка для данной операции следует исходить из того, чтобы на нем можно было обрабатывать все наружные поверхности детали при минимальном количестве перестановок. При этом легче обеспечить точность относительного положения обрабатываемых поверхностей при высокой производительности труда.

Для обработки поверхностей небольших деталей в единичном и серийном производстве могут быть использованы консольно-фрезерные станки с поворотными столами: при этом за одну установку можно обработать четыре поверхности детали. Многие детали типа кронштейнов, угольников, стоек можно обрабатывать на консольно-фрезерных станках. Обработка с использованием двухпозиционных поворотных приспособлений дает возможность сократить вспомогательное время.

При обработке на продольно-фрезерных

станках применяют групповую обработку деталей и одновременную обработку несколькими инструментами. При этом возможны следующие варианты:

1. Установка деталей в один ряд (рис. 5.2.3, а).
2. Установка деталей в два ряда (рис. 5.2.3, б).
3. Установка с перекладыванием деталей.

При обработке на четырехшпиндельном продольно-фрезерном станке корпусных деталей с направляющими (кареток, столов, ползунов) можно применять набор фрез, профиль которых соответствует контуру направляющих.

Набор фрез, включающий обычно как универсальные, так и специальные фрезы, базируют на общей оправке, которую устанавливают в шпиндели двух горизонтальных головок. Преимуществом этого способа является возможность получения за один рабочий ход практически полного профиля направляющих. Однако имеются сложности, связанные с заточкой комплекса фрез и требуемой точностью установки их в наборе. Поэтому этот метод применяют, главным образом, в серийном производстве для обработки направляющих простой формы.

При получении пазов и канавок производительность строгания выше, чем производительность фрезерования. Поэтому строгание достаточно широко применяют при обработке корпусных деталей с направляющими (столов, кареток, ползунов).

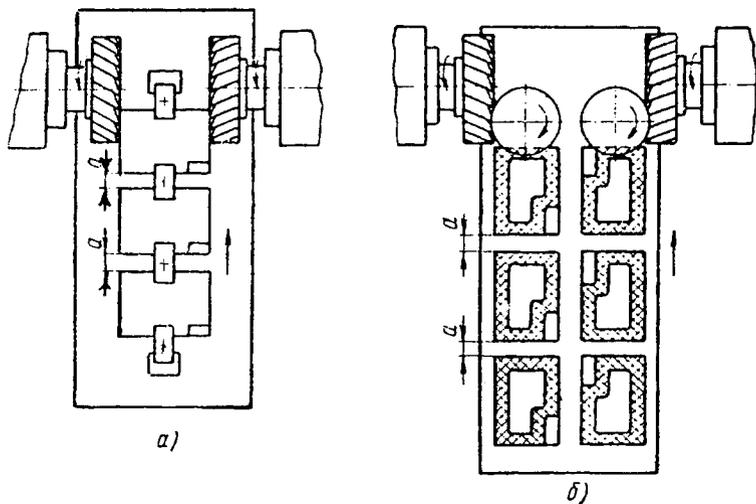


Рис. 5.2.3. Групповая установка деталей на продольно-фрезерном станке

На карусельно-токарных станках точением обычно обрабатывают такие корпусные детали, как корпуса паровых турбин, компрессоров, центробежных насосов, корпуса крупных электродвигателей, генераторов, планшайбы станков и крупногабаритные вентили. Эти детали имеют сложную пространственную форму или форму тел вращения с наружными или внутренними цилиндрическими, коническими поверхностями и перпендикулярными торцами. В условиях серийного производства на карусельно-токарных станках одновременно обрабатывают по открытой плоскости разема группу небольших корпусов и крышек, устанавливаемых в приспособлениях, расположенных по периметру круглого стола. При этом обеспечиваются достаточно высокие требования к отклонениям от плоскостности и параллельности обрабатываемых поверхностей. Использование простого и недорогого инструмента, позволяющего снимать за один рабочий ход до 15 мм, относительно высокие режимы резания и непрерывность обработки - все это способствует высокой производительности на данной операции.

Шлифование наружных плоскостей корпусных деталей применяют в основном как окончательную финишную обработку, обеспечивающую получение повышенных требований по шероховатости и точности геометрических форм обрабатываемых поверхностей. Шлифование выполняют на плоскошлифовальных станках с прямоугольным и круглым столом. Последние обеспечивают более высокую производительность ввиду непрерывности процесса шлифования. При этом возможно шлифование периферией плоского круга, торцом чашечного круга или торцовой поверхностью составного сегментного круга. Сборные сегментные круги применяют для обдирочного шлифования наружных плоскостей. Припуск, снимаемый за один рабочий ход, может составлять при этом до 4 мм.

Преимуществом этого метода обработки является малая чувствительность шлифовального круга к дефектам поверхностного слоя отливки, а также возможность производительной обработки сложных по контуру прерывистых поверхностей чугунных деталей. При обработке поверхностей чугунных деталей строганием или фрезерованием возможны сколы (выкрашивание металла на кромках), что приводит к резкому снижению стойкости режущего инструмента, в особенности торцо-

вых фрез. Устранение этого явления путем занижения режимов резания приводит к снижению производительности обработки.

В табл. 5.2.4 приведены данные по точности, получаемой при различных методах обработки плоских поверхностей.

На автоматических линиях (АЛ) из агрегатных станков (АС) значительное место по объему и продолжительности занимает обработка плоских поверхностей корпусных деталей машин массового производства. Расположение, вид и форма этих поверхностей влияют на технологический процесс и компоновку рабочих позиций АЛ. Поверхности могут располагаться с одной или нескольких сторон заготовки, лежать в горизонтальной и вертикальной плоскостях, быть параллельными, перпендикулярными или наклонными (рис. 5.2.4). Условия обработки и подвода режущего инструмента зависят от вида поверхности (рис. 5.2.4, а): наружные открытые поверхности 1 получают сквозным фрезерованием; для наружных закрытых поверхностей 2 сквозная обработка неприменима; внутренние поверхности 3 могут быть обработаны при вводе инструмента внутрь детали обычно при сложном движении.

При расположении обрабатываемых поверхностей с нескольких сторон заготовки (рис. 5.2.4, б) применяют фрезерный станок с многосторонним расположением фрезерных бабок или ряд станков с различным расположением шпинделей (горизонтальным, вертикальным, наклонным) либо различных поворотных устройств (кантователей, столов и барабанов для поворота); часто необходима смена технологических баз заготовки, что приводит к усложнению и удорожанию АЛ, снижению точности обработки. Существенный фактор - вид и форма поверхностей с одной стороны заготовки: отдельные поверхности могут быть прямоугольными и фасонными, замкнутыми или закрытыми.

Две или несколько параллельных поверхностей могут располагаться (рис. 5.2.4, в, г) на разных глубинах (пазы, выступы) или могут являться торцовыми поверхностями бобышек. Две или несколько поверхностей, расположенных параллельно, перпендикулярно или наклонно, могут образовывать сложные контуры (рис. 5.2.4, д).

Наружные открытые поверхности обрабатывают на АЛ из АС торцовыми фрезами, а несколько взаимосвязанных поверхностей, расположенных на одной стороне заготовки, - наборами фрез. Для удобства обработки пло-

**5.2.4. Точность корпусных деталей, получаемых при обработке плоских поверхностей различными способами**

Обработка	Ra, мкм	Точность угловых размеров относительно установочной поверхности		Квалитет
		Отклонение от параллельности	Отклонение от перпендикулярности	
Фрезерование торцовой фрезой:				
черновое	6,3-12,5	0,08	0,12	12-14
чистовое	3,2-6,3	0,05	0,07	10-11
тонкое	0,8-1,6	0,03	0,03	8-9 (7)
Строгание:				
черновое	12,5-25	0,07	0,1	12-14
чистовое	3,2-6,3	0,04	0,06	11-13
тонкое	0,8-1,6	0,02	0,02	8-10 (7)
Торцовое точение:				
черновое	6,3-12,5	0,1	-	14-15
чистовое	3,2-5	0,05	-	11-13
тонкое	0,8-1,6	0,03	-	8-10 (7)
Протягивание:				
получистовое	6,3	0,07	0,08	8-9
чистовое	0,8-3,2	0,04	0,05	7-8
отделочное	0,2-0,4	0,02	0,02	7
Плоское шлифование:				
получистовое	3,2	0,040	0,06	8-11
чистовое	0,8-1,6	0,020	0,03	6-8
тонкое	0,2-0,4 (0,1)	0,007	0,01	6-7

Примечания: 1. В скобках указаны достижимые значения параметра.

2. Отклонения указаны на длине 300 мм.

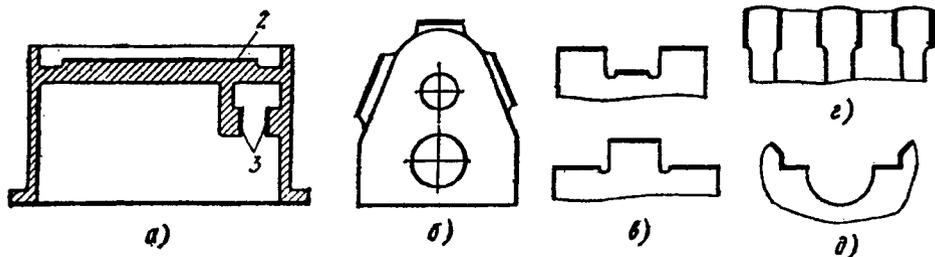


Рис. 5.2.4. Схемы расположения и виды плоских поверхностей корпусных деталей

ских поверхностей на АЛ из агрегатных станков при конструировании корпусных деталей рекомендуется создавать наружные открытые поверхности, обработка которых возможна торцовыми фрезами на проход, и увязывать их ширину с нормальным рядом диаметров торцовых фрез. Пластики, бобышки, уступы и другие отдельные плоскости, находящиеся на одной стороне детали, следует располагать на одном уровне для обработки на проход одной торцовой фрезой. Форма наружных открытых поверхностей должна обеспечивать равномерный и безударный сьем стружки. Расположение технологических (установочных) базовых поверхностей детали должно обеспечивать обработку поверхностей, связанных жесткими требованиями точности взаимного расположения, при одной установке, в одной позиции. Обрабатываемые поверхности должны иметь высокую и равномерную жесткость, способствующую повышению точности обработки и применению высокопроизводительных методов обработки.

Наружные открытые поверхности обрабатывают на АЛ преимущественно торцовыми фрезами, оснащенными пластинками из твердого сплава. Они обеспечивают более высокую производительность (не менее чем в 1,4 раза) и более высокую точность обработки, чем цилиндрические фрезы. Эти преимущества торцовых фрез обусловлены более жестким креплением их на шпинделе станка; более плавной работой за счет большего угла контакта инструмента с заготовкой, числа зубьев и диаметра фрезы; более надежным креплением вставных ножей и пластинок.

Плоские поверхности фрезеруют на агрегатных станках с фрезерными бабками, устанавливаемыми на подвижные силовые столы или на неподвижные элементы станка в стационарное положение. В первом случае подачу производят перемещением координатного стола, на котором установлена фрезерная бабка, во втором - перемещением заготовки, закрепленной на координатном столе.

При построении схем обработки на позициях (станка) АЛ для сокращения основного (машинного) времени и повышения производительности необходимо стремиться к концентрации и совмещению переходов обработки.

При сочетании признаков получают ряд схем: от наименее производительных - одно-

местных одноинструментальных до наиболее производительных многоместных многоинструментальных параллельных и параллельно-последовательных. На рис. 5.2.5 представлена наладка для обработки торцовой фрезой вертикальной плоской поверхности на агрегатно-фрезерном станке АЛ горизонтальной компоновки, выполненная как одностенная одноинструментальная схема обработки с симметричным расположением фрезы относительно заготовки. По такой же схеме выполнена наладка фрезерования горизонтальной плоской поверхности на агрегатно-фрезерном станке вертикальной компоновки (рис. 5.2.6). Она отличается асимметричным расположением торцовой фрезы относительно заготовки, что позволяет вести обработку с большой подачей (при обработке заготовок из алюминиевого сплава  $S_M \leq 5$  м).

Двухинструментальная наладка для фрезерования наклонной и вертикальной плоских поверхностей выполнена (рис. 5.2.7) по одностенной многоинструментальной параллельно-последовательной схеме обработки, причем на одном станке проводят черновую и чистовую обработку поверхностей. Сначала черновое фрезерование плоскости бобышек (вертикальной) и плоскости люка (наклонной) проводят параллельно фрезами на шпинделях 1 и 2. Затем фрезой, установленной на шпинделе 2, осуществляется чистовое фрезерование плоскости люка. На рис. 5.2.8 показана наладка инструментов для чистого фрезерования вертикальных плоских поверхностей, выполненная как одностенная многоинструментальная схема параллельной обработки.

Для уменьшения влияния исходного отклонения от плоскостности торцов заготовки на точность обработки черновое фрезерование осуществляется с подачей в направлении 1-1, а чистовое - в направлении 2-2, перпендикулярном направлению 1-1 (схемы установки заготовки на обоих станках одинаковые).

Точность обработки открытых плоских поверхностей при выдерживании линейных размеров зависит от погрешности установки заготовок, упругих и тепловых деформаций технологической системы, погрешности настройки фрез на заданный размер, размерного износа зубьев фрез. В табл. 5.2.5 приведены опытные данные по точности и шероховатости плоских поверхностей, обрабатываемых на АЛ.

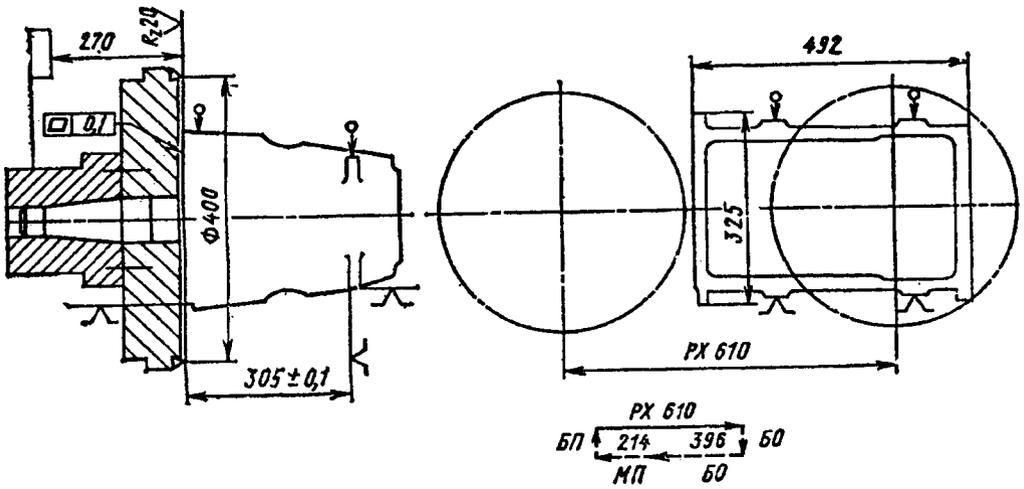


Рис. 5.2.5. Схема обработки вертикальной плоской поверхности

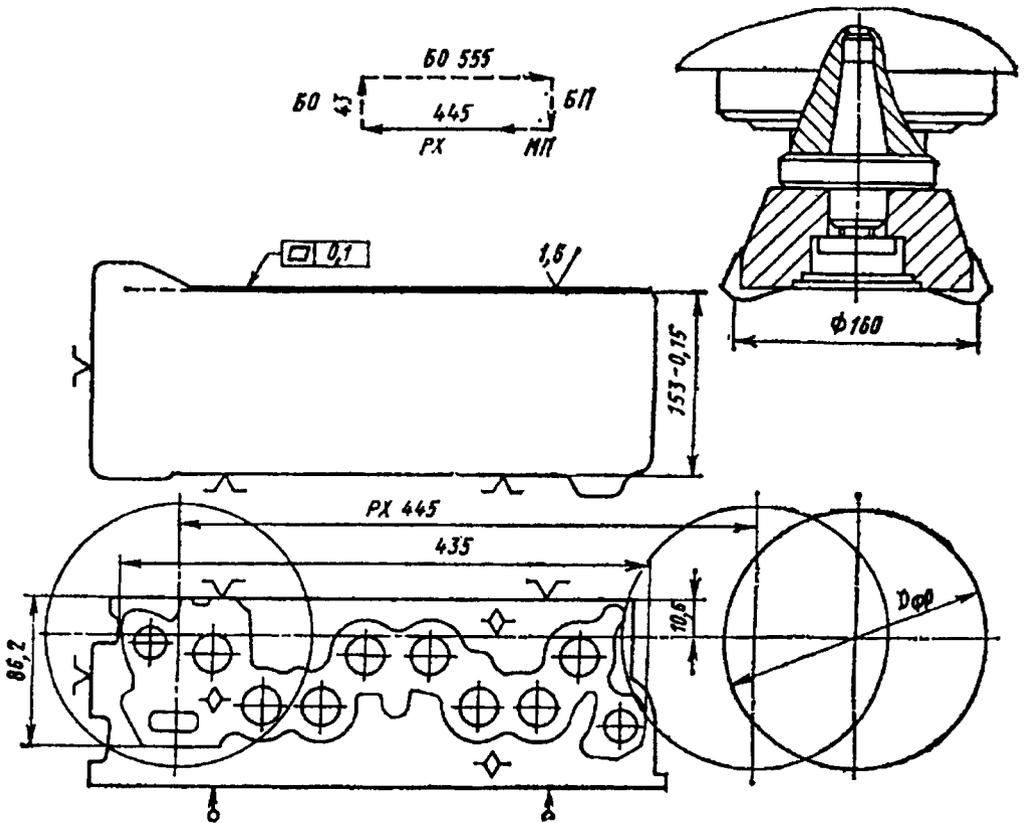


Рис. 5.2.6. Схема обработки горизонтальной плоской поверхности



5.2.5. Характеристики точности обработки при фрезеровании плоских поверхностей

Параметр	Компоновка фрезерного станка															
Число рабочих ходов	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
Отклонение от плоскостности, мкм	100	60	50	100	60	50	100	60	50	100	60	50				
Отклонение от параллельности относительно базовой плоскости, мкм	150	100	80	250	150	100	200	100	70	200	100	70				
Отклонение от перпендикулярности относительно базовой плоскости, мкм	-	-	-	150	100	80	120	80	60	150	80	60				
Точность размера, мкм: от плоскости <i>Б</i> (или <i>А</i> ) до плоскости <i>А</i> для поверхности с размерами, мм:	длина:		ширина:													
100-300	до 100	230	150	100	300	200	150	350	250	160	140	100	50			
	100-300	270	180	120	350	210	170	370	270	180	150	120	70			
300-600	до 100	300	180	120	350	210	170	370	270	180	150	120	70			
	100-300	350	200	140	430	230	180	420	300	210	180	120	80			
от оси базового пальца <i>А1</i> для поверхности с размерами, мм:																
100-300	до 100	-	-	-	270	170	120	250	200	120	250	200	120			
	100-300	-	-	-	320	180	140	270	220	140	270	220	120			
300-600	до 100	-	-	-	320	180	140	270	220	140	270	220	120			
	100-300	-	-	-	400	200	150	320	250	170	320	250	170			

**Методы обработки отверстий.** Обработка отверстий представляет собой наиболее ответственную и трудоемкую часть технологического процесса изготовления корпусных деталей. Обработка отверстий делится на черновую, чистовую и отделочную.

При черновой обработке отверстий удаляется основное количество металла припуска, обеспечивается точность относительного положения оси отверстия и равномерный припуск для чистовой обработки. В связи с

этим для черновой обработки используется высокопроизводительный инструмент и оборудование, обладающие высокой жесткостью и мощностью.

Чистовая обработка обеспечивает точность размеров, геометрической формы и относительного положения обрабатываемого отверстия; особенно важно обеспечить точность положения и прямолинейность оси вращения. Для чистовой обработки используется режущий инструмент, обладающий

большой стойкостью, обеспечивающий высокую точность и малые параметры шероховатости поверхности, а также достаточно точное и жесткое оборудование.

В некоторых случаях для постепенного приближения к требуемой точности по всем параметрам между черновой и чистовой обработкой отверстия проводят получистовую обработку резцами, зенкерами или черновыми развертками.

Отделочную обработку применяют в случае необходимости повышения точности обрабатываемой поверхности.

Для обработки отверстий применяют сверла, резцы, зенкеры, развертки, расточные головки, расточные пластины. Отделочную обработку отверстий выполняют пластическим деформированием с помощью шариковых и роликовых раскаток.

Отверстия, полученные в отливке единичного и мелкосерийного производства, растачивают резцом; при этом достигается заданное положение отверстия и точность размера и формы; обработка резцами уменьшает отклонение оси отверстия, увод и т.д.

Резцы являются простыми универсальными инструментами. Их преимущества особенно заметны при обработке отверстий нестандартных размеров и отверстий большого диаметра, для которых отсутствуют мерные инструменты (рис. 5.2.9, а). Кроме того, резцы применяют в резцовых блоках (рис. 5.2.9, б) и в резцовых головках (рис. 5.2.9, в) при обработке отверстий больших диаметров.

Зенкеры применяют для чернового растачивания литых отверстий, для получистового растачивания отверстий после сверления, чернового зенкерования или обработки резцом. Для отверстий, точность которых не

превышает 10-го качества, зенкеры можно применять для окончательной обработки.

Развертывание является одним из основных методов чистовой обработки и отделки отверстий, обеспечивающее 6-9-й качества. При использовании разверток с пластинами из твердого сплава скорость резания для чугуна составляет 7...20 м/мин, для стали 4...10 м/мин, подача на оборот 2...7 мм. Развертывание обеспечивает получение правильной геометрической формы отверстия, точных диаметральных размеров и параметр шероховатости поверхности  $Ra=1,25...0,63$  мкм. Развертывание как метод чистовой обработки применяют после сверления, а также после зенкерования и растачивания. Припуск под развертывание составляет 0,4...0,9 мм на диаметр для предварительного развертывания и 0,05...0,3 мм для окончательного.

Развертывание необходимо выполнить с охлаждением, так как в процессе резания происходит значительное выделение тепла, вызывающего температурные деформации детали и, как следствие, образование погрешности геометрической формы в виде конусообразности. При обработке чугуна в качестве СОЖ используют эмульсию, а при обработке стали - смесь керосина с машинным маслом.

Растачивание основных отверстий выполняют на горизонтально-расточных, координатно-расточных, радиально-сверлильных, карусельных и агрегатных станках, а в некоторых случаях на токарных станках.

Существует три основных способа растачивания отверстий на горизонтально-расточных станках: а) с консольными оправками; б) с борштангами с использованием опоры задней стойки; в) в кондукторах при шарнирном соединении расточных оправок со шпинделем станка.

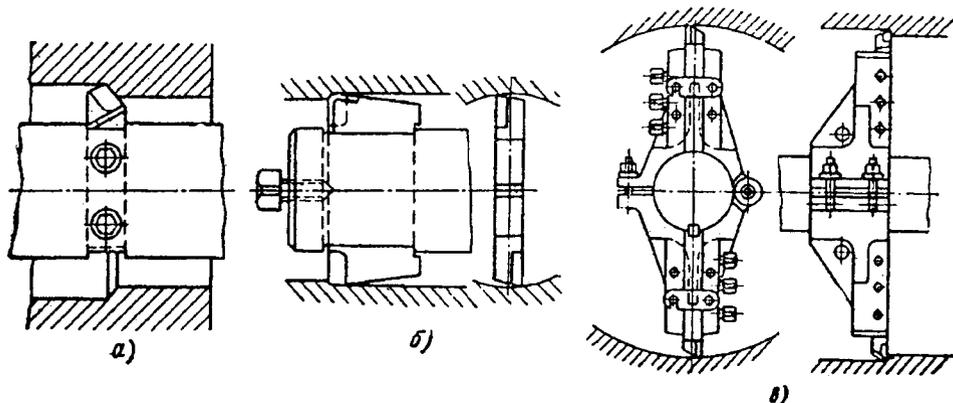


Рис. 5.2.9. Схемы применения резцов для растачивания отверстий корпусных деталей машин

Растачивание с консольными оправками проводят при общем вылете инструмента, равном  $(5...6)d_0$ , где  $d_0$  - диаметр оправки. Оправки должны быть короткие и жесткие. Растачивание консольной оправкой с подачей, осуществляемой столом, проводят при неизменном вылете инструмента. При этом погрешности растачивания будут значительно меньше.

Растачивание с борштангами с использованием опоры задней стойки применяют при обработке крупных тяжелых деталей, имеющих отверстия в противоположных стенках, или при обработке отверстий, имеющих длину, значительно превышающую их диаметр. В этом случае опора задней стойки и шпиндель должны быть соосны. При растачивании с борштангой точность геометрической формы отверстий и размеров в основном зависит от точности борштанги и втулки задней стойки.

При растачивании в кондукторах с шарнирным соединением оправок со шпинделем геометрические погрешности станков практически не оказывают влияния на точность обработки. Точность обработки в этом случае будет определяться точностью расточных кондукторов, точностью оправок и направляющих втулок и величиной зазоров между оправками и втулками.

Точность межосевых расстояний, а также точность положения отверстий относительно баз достигаются с помощью разметки, методом пробных расточек, растачиванием в кондукторах, координатным методом, по накладным шаблонам и т.д.

Для уменьшения увода отверстий сверление выполняют в два или три перехода. Вначале отверстие центруют или засверливают сверлом, диаметр которого в 2-3 раза меньше требуемого. Для отверстий под резьбу диаметром более 25-30 мм помимо сверления выполняют зенкование или растачивание. Диаметр отверстий под резьбу делают на 0,04...0,1 мм больше внутреннего диаметра резьбы, тем самым учитывают подъем витков, возникающий при нарезании. Рекомендуемые диаметры сверл под резьбу с различным шагом и диаметром приведены в специальных нормативных таблицах. Торцы обрабатывают с осевой подачей зенковками или подрезными резцами.

Перед нарезанием резьбы в отверстиях снимают фаску коническими зенковками, резцами или сверлами большого диаметра. Фаску снимают под углом  $90^\circ$  до наружного диаметра резьбы. Резьбу нарезают машинными метчиками. Резьбу с шагом до 3 мм наре-

зают за один рабочий ход; резьбы с большим шагом нарезают комплектом метчиков для дватри рабочих хода. Нарезание резьб выполняют с принудительной осевой подачей, равной шагу резьбы. Для предохранения инструмента от поломки в случае несовпадения на 2...3% шага резьбы и осевой подачи применяют патроны с осевой компенсацией.

В условиях серийного производства мелкие отверстия сверлят с использованием накладных, скальчатых, коробчатых кондукторов. Направление инструмента в этом случае обеспечивают кондукторные втулки; в результате отпадает необходимость разметки и предварительной зацентровки отверстий.

Накладные кондукторы, выполненные в виде плит, непосредственно базируются по предварительно обработанным поверхностям детали. В коробчатых и скальчатых кондукторах имеются базирующие поверхности для обрабатываемой заготовки, относительно которых определенным образом расположены кондукторные втулки. Достижимая точность положения отверстий относительно баз составляет 0,1...0,2 мм.

Для сверления отверстий с разных сторон детали применяют одно- или двухопорные поворотные приспособления, на которые устанавливают требуемый кондуктор. Нормализованные поворотные стойки обеспечивают возможность фиксации кондуктора с деталью в необходимом угловом положении, что позволяет получить отверстия с любой из четырех сторон, в том числе и со стороны технологических баз детали.

Для получения в корпусных деталях отверстий высокой точности (6-7-го квалитетов) на заключительном этапе технологического процесса вводят отделочные операции - развертывание, тонкое растачивание, планетарное шлифование, хонингование, раскатку роликами, а в отдельных случаях притирку и шабрение. Выбор необходимого метода обработки зависит от требований точности, определяемых служебным назначением детали. Например, для окончательной обработки отверстий под пиноль задней бабки или отверстий в блоках цилиндров двигателей и компрессоров, где требуется достижение повышенных требований к шероховатости поверхности, применяют хонингование. А для отверстий в шпиндельных коробках или корпусах, где требуется достижение высокой точности относительно положения отверстий, применяют тонкое растачивание и планетарное шлифование. При необходимости получения на поверхности отверстия упрочнения с целью уменьшения изнашивания поверхностного слоя применяют раскатку роликами.

Развертывание является наиболее распространенным методом окончательной обработки главных отверстий, применяемых в условиях единичного и серийного производства.

Тонкое алмазное растачивание выполняется на специальных алмазно-расточных станках. Станки для тонкого растачивания обладают высокой жесткостью и повышенной виброустойчивостью. Они могут иметь вертикальную или горизонтальную компоновку с одним или несколькими шпинделями. Станки горизонтальной компоновки бывают одностороннего и двустороннего исполнения.

Растачивание отверстий выполняют однолезвийными резцами, оснащенными твердосплавными пластинами с тщательно доведенными режущими кромками. Для обработки корпусных деталей из цветных сплавов применяют также алмазные резцы. Специальная геометрия затачивания таких резцов позволяет обрабатывать отверстия с очень малыми глубинами резания. Инструмент устанавливают в жестких консольных оправках, у которых отношение длины к диаметру 5...6. Для повышения жесткости и виброустойчивости при растачивании отверстий малого диаметра вместо стальных оправок применяют твердосплавные, которые при одинаковых размерах имеют показатели в 2-3 раза лучше. С точки зрения точности обработки предпочтительным является вертикальное расположение шпинделя, при котором масса расточной оправки практически не влияет на точность геометрической формы отверстия.

Особенностью процесса тонкого растачивания является обработка на высоких скоростях резания при очень малых глубинах резания и продольных подачах. Припуск, оставляемый на тонкое растачивание в пределах 0,2-0,35 мм на сторону, снимается за два рабочих хода. На первом ходе снимают 3/4, а на втором 1/4 часть припуска. Охлаждение в процессе растачивания обычно не применяют. В табл. 5.2.6 приведены режимы резания для тонкого растачивания, используемые при обработке деталей из чугуна, стали и цветных сплавов.

**5.2.6. Режимы резания при тонком растачивании**

Материал заготовки	Скорость резания, м/мин	Глубина, мм	Подача на оборот, мм
Чугун	100-220	0,1-0,35	0,03-0,15
Сталь	120-260	0,1-0,3	0,02-0,12
Цветные сплавы	300-860	0,05-0,5	0,02-0,1

Тонкое алмазное растачивание обеспечивает получение точности диаметральных размеров отверстий по 6-7-му квалитетам, отклонения геометрической формы (овальность, конусообразность) отверстий диаметром до 120 мм не превышает 0,003...0,005 мм, параметр шероховатости поверхности  $Ra = 1,25...0,30$  мкм. Точность межцентровых расстояний и положения отверстия относительно базы составляет 0,005...0,03 мм.

Внутреннее планетарное шлифование применяют главным образом для обработки отверстий диаметром выше 150 мм. Однако имеются также координатные, планетарно-шлифовальные станки, позволяющие обрабатывать в корпусных деталях отверстия диаметром 10 мм и выше. Припуск, оставляемый под шлифование отверстий, составляет 0,1...0,2 мм на диаметр.

Планетарное шлифование обеспечивает получение отверстий не выше 0,004 мм и параметр шероховатости поверхности  $Ra = 0,32...0,16$  мкм. При обработке на координатных планетарно-шлифовальных станках можно получить точное положение оси отверстия относительно базы и межцентровое расстояние с точностью до 0,01 мм. Недостатком этого процесса является невысокая производительность по сравнению с другими подобными методами обработки.

Хонингование применяют при обработке сквозных гладких отверстий диаметром от 25 до 500 мм в корпусных деталях главным образом из чугуна и стали.

С помощью хонингования достигают точности диаметральных размеров отверстий по 6-му квалитету, точности геометрической формы отверстий (диаметром до 250 мм) в пределах 0,003...0,004 мм, параметра шероховатости поверхности  $Ra = 0,16...0,004$  мкм. Однако этот процесс не позволяет исправить положение оси отверстия относительно базы.

Припуски, оставляемые под хонингование, зависят от диаметра обрабатываемого отверстия, материала и вида предшествующей обработки. Для отверстий диаметром до 125 мм припуск в деталях из чугуна составляет 0,02...0,1 мм, а в деталях из стали 0,01...0,04 мм. Припуски для деталей из серого чугуна, оставляемые в зависимости от предшествующей обработки, составляют после растачивания 0,05...0,08 мм, после развертывания 0,02...0,04 мм, после шлифования 0,02 мм. При обработке заготовок из чугуна окружная скорость относительного движения хона равна 60...75 м/мин, скорость возвратно-поступательного перемещения 15...20 м/мин; при обработке заготовок из стали окружная скорость 45...60 м/мин, скорость возвратно-

поступательного перемещения 10...12 м/мин. Соотношение этих скоростей хона выбирают из условия получения на цилиндрической поверхности отверстия штрихов, скрещивающихся под углом 40...60°.

Раскатывание отверстий является методом окончательной обработки, основанным на пластическом деформировании обрабатываемой поверхности. Раскатывание выполняют на сверлильных, токарных или специальных станках. Инструментом являются различные по конструкции многороликовые раскатники, которые вращаются относительно оси отверстия с частотой  $n = 20...30$  мин<sup>-1</sup> и совершают осевое перемещение с подачей на оборот  $S_0 = 1...3$  мм. Ролики, равномерно расположенные по периметру сепаратора, могут свободно вращаться вокруг своей оси. Их изготавливают из высококачественных инструментальных сталей; твердость после закалки 62...64 HRC. Конструкция многороликовых раскатников позволяет в определенных пределах регулировать получаемый диаметр отверстия. Раскатывание выполняют после чистого растачивания; точность отверстия, обрабатываемого под раскатывание, составляет 0,01...0,015 мм. Припуск, оставляемый под раскатывание, равен 0,02...0,05 мм на диаметр.

Раскатник не исправляет положения оси отверстия; он самоустанавливается по отверстию, поэтому точность расположения отверстия относительно базы должна обеспечиваться на соответствующей расточной операции.

Обработку методом раскатывания применяют для окончательной обработки сквозных и глухих отверстий в корпусах из различных материалов, способных в холодном состоянии пластически деформироваться. Твердость таких материалов обычно не превышает 35...40 HRC.

Раскатка обеспечивает достижение точности отверстия по 6-9-му квалитетам, параметр шероховатости получаемой поверхности  $Ra = 0,016...0,008$  мкм, погрешность геометрической формы для отверстий диаметром до 120 мм находится в пределах 0,005...0,008 мм. В результате раскатывания обеспечивается уплотнение поверхностного слоя и повышение его твердости на 20%.

Производительность раскатывания по сравнению с хонингованием более высокая; в отдельных случаях она увеличивается до 5 раз. Этот метод применяют для окончательной обработки длинных отверстий в стальных корпусных деталях типа корпусов гидrocилиндров, пинолей, поршневых и винтовых насосов, гидравлических стоек и др.

Притирку (доводочно-притирочную операцию) применяют в единичном и мелкосерийном производстве для получения высокой точности размеров и геометрической формы отверстий малых и средних диаметральных размеров. Притирку выполняют с использованием абразивных порошков и паст, наносимых на сопряженную деталь или на специальные притиры. Эта операция не требует применения специального станочного оборудования; ее можно выполнять на сверлильных, токарных и других станках или вручную. С помощью притирки обеспечивается требуемый зазор в золотниковых парах у различных корпусов топливной, пневмо- и гидроаппаратуры.

Для отверстий, обрабатываемых осевым инструментом на агрегатных станках АЛ, типично соотношение длины и диаметра  $l/d \leq 4...5$ ; однако часто встречаются отверстия длиной  $l = (6...12)d$ .

На рис. 5.2.10 приведены основные варианты инструментальных наладок сверлильных позиций. При сверлении отверстий глубиной до  $7d$  рекомендуется применять наладки с длинной переходной втулкой 4 (рис. 5.2.10, а); можно использовать наладки с короткой переходной втулкой 5, особенно в случае применения унифицированных шпинделей для обработки на одной позиции отверстий, расположенных на различных уровнях. При сверлении на одной позиции большого числа отверстий глубиной до  $7d$  применима наладка с переходной оправкой 6, а для отверстий глубиной свыше  $7d$  целесообразно использовать наладки с быстросменным патроном 7. Комбинированные сверла (рис. 5.2.10, б) позволяют сократить число рабочих позиций в АЛ при сверлении ступенчатых отверстий или отверстий с фаской. Однако при обработке комбинированным инструментом снижаются точность диаметра и расположения осей отверстий. При этой схеме вылет инструмента определяется не расстоянием между втулкой и торцом заготовки, а расстоянием от торцевой поверхности части инструмента с большим диаметром в момент касания инструмента обрабатываемой детали до торца заготовки (рис. 5.2.10, б).

С уменьшением длины направляющей инструмента до  $l_2$  ухудшаются условия направления, увеличиваются геометрическое и упругое смещения оси инструмента и снижается точность обработки. Если глубина отверстия меньше диаметра  $l \geq 2d$ , то точность диаметра отверстия не может быть выше 14-го квалитета. Еще более значительным оказыва-

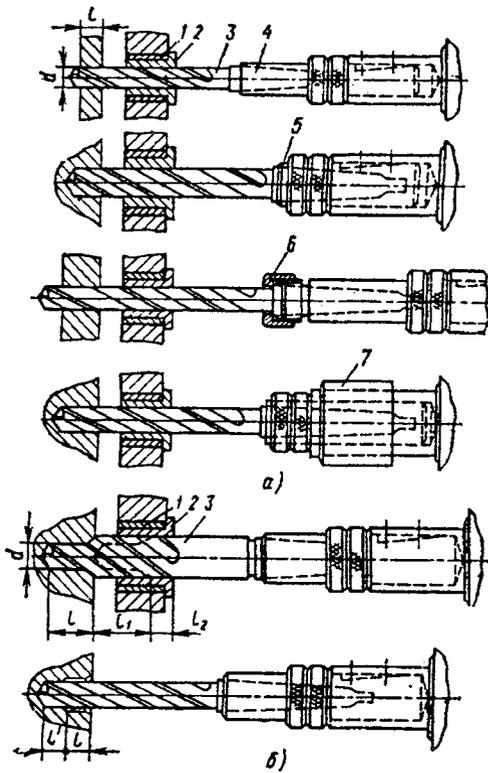


Рис. 5.2.10. Типовые схемы инструментальных наладок сверлильных позиций:

- а - сверление гладких отверстий;  
 б - сверление ступенчатых отверстий;  
 1 - постоянная втулка;  
 2 - сменная кондукторная втулка;  
 3 - сверло; 4 - длинная переходная втулка;  
 5 - короткая переходная втулка;  
 6 - переходная оправка;  
 7 - быстросменный патрон

ется влияние комбинированного инструмента на точность расположения отверстия. Наряду с увеличением вылета инструмента уменьшается рабочая длина кондукторной втулки в момент начала обработки, что дополнительно увеличивает геометрическое смещение оси инструмента. Кроме того, следует учитывать, что изготовление и заточка такого инструмента сложны.

Для обработки глубоких отверстий ( $l > 5d$ ) на АЛ применяют схему последовательного сверления в нескольких рабочих позициях. На первой позиции отверстие сверлят с направлением по кондукторной втулке на глубину  $l$ . В последующих позициях для сверления участка  $l'$  и др. кондукторные втулки не применяют, так как сверло направ-

### 5.2.7. Допустимая глубина сверления (в мм) различных материалов без вывода инструмента из отверстия

Диаметр отверстия, мм	Чугун при сверлении		Сталь	Алюминий
	горизонтальном	вертикальном		
До 6	50	40	25	35
Св. 6 до 10	70	55	35	50
» 10 » 15	90	70	45	65
» 15 » 20	100	80	55	80
» 20 » 25	110	90	65	90
» 25 » 30	120	100	75	100
» 30 » 40	-	-	90	-
» 40 » 50	-	-	100	-
» 50 » 60	-	-	110	-
» 60 » 80	-	-	120	-

ляется конусом, образованным сверлом на предыдущей позиции. При этом отверстие получается ступенчатым с перепадом диаметров 0,2...0,4 мм, что в большинстве случаев не снижает эксплуатационных качеств детали, так как глубокие отверстия обычно служат для доставки жидкостей или газов к различным точкам машины (табл. 5.2.7).

**Зенкерование** применяют при обработке отверстий, выполненных в литой или кововой заготовке (черновое зенкерование), и для обработки отверстий после сверления или чернового зенкерования (чистовое зенкерование). Благодаря более высокой устойчивости его во втулке точность обработки отверстий при зенкерowaniu существенно выше, чем при сверлении. Точность диаметра отверстия при обработке в разных условиях - в пределах 13-7-го квалитетов.

Зенкерование можно проводить жестко закрепленным инструментом без направления и с направлением по одной втулке или с дополнительным направлением (по передней втулке) по специальному цилиндрическому хвостовику цельного зенкера или цилиндрической части оправки насадного зенкера (рис. 5.2.11-5.2.13).

При обработке с направлением по одной втулке зенкер можно направлять непосредственно по режущей его части (рис. 5.2.11, а-в) и по специальному ленточкам (рис. 5.2.11, г-е), расположенным за режущей частью ближе к хвостовику инструмента, диаметр которых превышает диаметр режущей части инструмента. По удобству эксплуатации инструмента предпочтителен второй вариант.

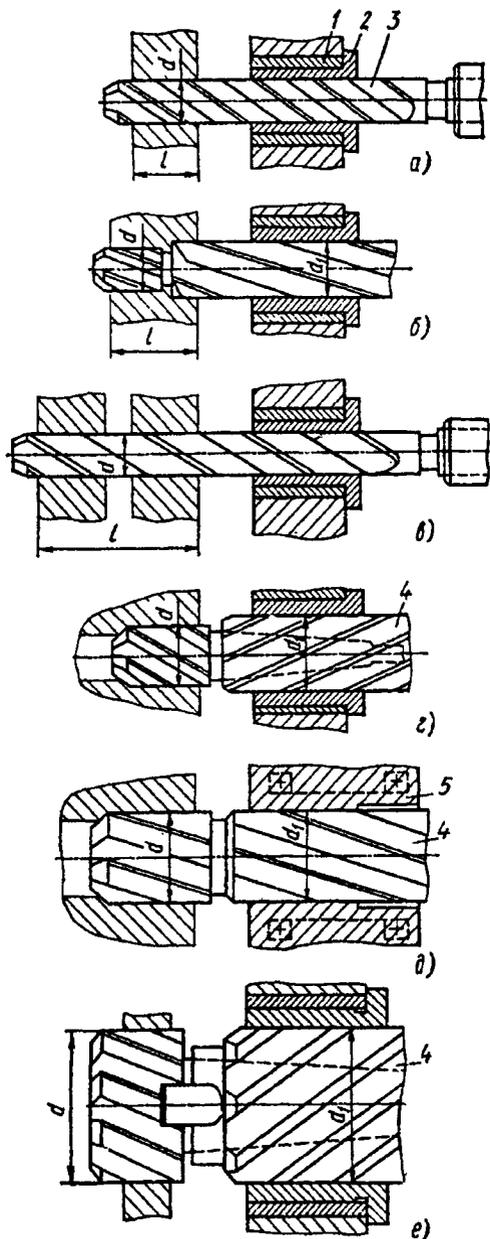


Рис. 5.2.11. Типовые схемы зенкерования с направлением по режущей части инструмента (а, б, в), по специальным направляющим ленточкам инструмента в неподвижной (г, е) или вращающейся (д) кондукторных втулках:

- 1 - постоянная втулка; 2 - сменная втулка;
- 3 - зенкер; 4 - направляющая часть зенкера;
- 5 - вращающаяся втулка

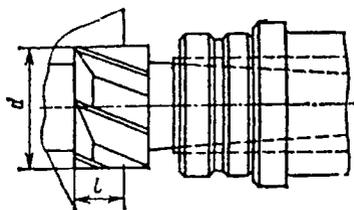


Рис. 5.2.12. Схема зенкерования без направления

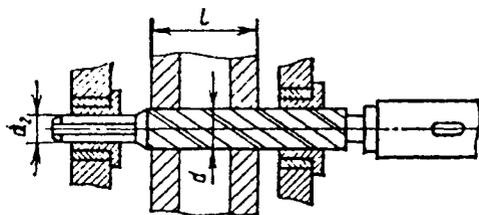


Рис. 5.2.13. Схема зенкерования с дополнительным направлением  
( $d$ ,  $l$  - диаметр и длина отверстия;  
 $d_2$  - диаметр направляющей части)

Необходимость в дополнительном (по передней втулке) направлении (рис. 5.2.13) определяется диаметром и длиной обрабатываемого отверстия и зависит от припуска и механических характеристик материала обрабатываемой детали.

В табл. 5.2.8 и 5.2.9 приведены рекомендации по назначению дополнительного направления при зенкерования и выбору диаметра направляющего хвостовика.

**5.2.8. Предельные значения длины  $L$  (в мм) отверстия при зенкерования без передней направляющей втулки**

Диаметр отверстия $d$ , мм	Чугун	Алюминий	Сталь
До 25	70	80	60
Св. 25 до 35	80	90	65
» 35 » 50	100	110	75
» 50 » 70	130	150	90
» 70 » 85	165	190	110
» 85 » 100	200	220	135

Примечания: 1. Значение  $L$  при обработке сплошного, ступенчатого и прерывистого отверстий определяют по рис. 5.2.11, а-в.

2. При обработке отверстий разных диаметров принимают диаметр  $d$  меньшего отверстия.

### 5.2.9. Рекомендации по назначению диаметров $d_2$ передней направляющей втулки при зенкеровании и развертывании

Диаметр отверстия $d$ , мм	Разность диаметров $d_2$ и $d$ , мм	
	Рекомендуемая	Максимальная
До 25	4	7
Св. 25 до 35	5	9
» 35 » 50	8	13
» 50 » 70	12	15
» 70 » 85	15	18
» 85 » 100	18	22
100	22	27

### 5.2.10. Точность расположения осей отверстий при развертывании

Параметр	Диаметр отверстия, мм	Допуск (мм) при точности кондукторной втулки	
		Повышенной	Высокой
Смещение оси обрабатываемого отверстия относительно: оси постоянной кондукторной втулки	До 18	0,042	0,038
	Св. 18 до 30	0,047	0,045
	» 30 » 50	0,052	0,049
	» 50 » 80	0,040	0,035
базовых поверхностей* <sup>1</sup>	До 18	0,070	0,066
	Св. 18 до 30	0,074	0,072
	» 30 » 50	0,079	0,076
	» 50 » 80	0,053	0,052
Расстояние между осями двух отверстий, одновременно обрабатываемых на одной позиции АЛ	До 18	0,070	0,067
	Св. 18 до 30	0,076	0,069
	» 30 » 50	0,092	0,087
	» 50 » 80	0,039	0,036

\*1 - Без учета погрешности базирования.

**Развертывание** служит методом окончательной обработки отверстий в деталях ответственного назначения.

Точность диаметра при развертывании обеспечивается в пределах 7-го качества, причем более стабильно при обработке чугуна. Параметры шероховатости поверхности при развертывании: для стали  $Ra=5$  мкм (при обработке мягкой низколегированной стали  $Ra=10$  мкм); для чугуна  $Ra=2,5$  мкм; для алюминия  $Ra=5$  мкм. При обработке чугуна и алюминия с применением СОЖ шероховатость поверхности снижается.

В табл. 5.2.10 приведены данные по точности расположения осей отверстий при развертывании. На рис. 5.2.14 даны различные схемы обработки при развертывании.

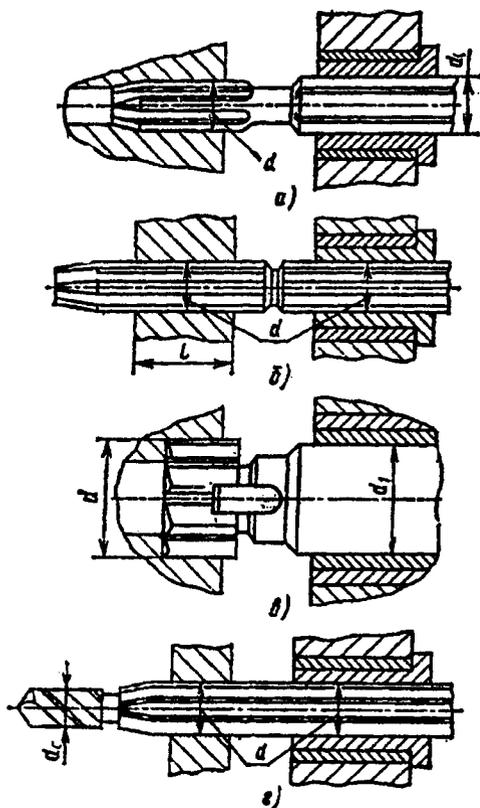


Рис. 5.2.14. Типовые схемы развертывания с направлением по специальной направляющей части инструмента (а) или по режущей части инструмента (б) насадными ревертками с направлением инструмента по оправке (в), а также сверления и развертывания отверстий комбинированным инструментом (з)

Развертывание на АЛ осуществляется при плавающем и жестком соединении инструмента со шпинделем станка с направлением по режущей части инструмента (рис. 5.2.14, б, з) или со специальной направляющей части (рис. 5.2.14, а, в).

В большинстве случаев направляющей служит режущая часть инструмента. Достижимое при этом уменьшение расстояния между торцами втулки и инструмента способствует повышению точности обработки. Однако под влиянием обратной конусности режущей части инструмента точность расположения осей отверстий снижается.

Для обеспечения соосности точных отверстий, расположенных в двух или нескольких стенках на одной оси и имеющих достаточный перепад по диаметру, целесообразно применять комбинированные развертки.

В связи с тем, что скорости резания при развертывании невысоки, вращающиеся кондукторные втулки обычно не применяют. При направлении инструмента по неподвижным втулкам точность размеров и расположения отверстий повышается с уменьшением зазора между втулкой и инструментом.

Для сокращения числа станков в АЛ при обработке коротких отверстий в детали из чугуна одновременное сверление и развертывание проводят комбинированным инструментом (рис. 5.2.14, з); при этом достигается точность диаметра по 10-му качеству.

**Обработка резьбовых отверстий**, нарезание резьбы в корпусных деталях обычно проводят метчиками (рис. 5.1.5), реже - саморас-

крывающимися резьбонарезными головками (рис. 5.2.16).

При нарезании резьбы метчиками стабильно обеспечивается точность резьбы в пределах поля допуска Н6 по ГОСТ 16093. Для получения резьбовых отверстий более высоких классов точности необходимо особенно тщательно изготавливать метчики по диаметру и шагу. Особенно важно, чтобы разность шагов между отдельными витками не превышала 3...5 мкм. Необходимо строго выдерживать средний диаметр резьбы метчиков.

Для нарезания резьбы метчиками в деталях из сталей (особенно вязких легированных) требуются метчики особой конструкции. При этом существенное значение имеет правильный выбор режимов резания и СОЖ. При нарезании резьбы можно применять сульфозрезол, масло, 50%-ную смесь масла с керосином или 5%-ную эмульсию Э2. Для устранения опасности поломки метчиков при нарезании резьбы в отверстиях, глубина которых больше трех диаметров, рекомендуется периодически выводить метчик (2-3 раза за время нарезания).

В отверстиях диаметром 56 мм и более резьбу нарезают с помощью самораскрывающихся резьбонарезных головок. Основные нормативные данные (режимы резания, диаметры отверстий под резьбы и т.д.) остаются такими же, как и при нарезании резьбы метчиками. Точность резьбы несколько ниже точности резьбы, полученной шлифованными метчиками, однако поле допуска Н6 может быть обеспечено с достаточной стабильностью.

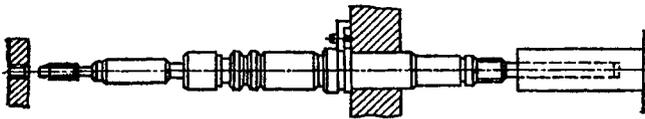


Рис. 5.2.15. Схема нарезания резьбы метчиком

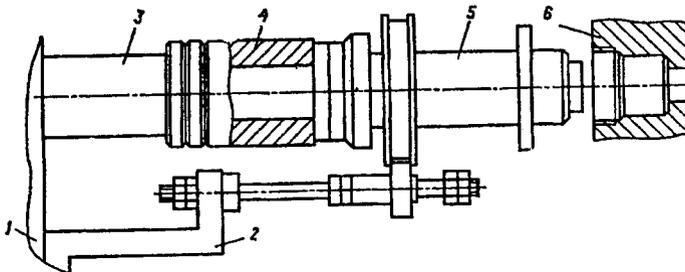


Рис. 5.2.16. Схема нарезания резьбы самораскрывающейся резьбонарезной головкой:

1 - шпиндельная коробка; 2 - стопор; 3 - шпиндель; 4 - патрон;  
5 - самораскрывающаяся головка; 6 - заготовка

**5.2.11. Рекомендуемые скорости (м/мин) резания при нарезании резьбы в чугунных деталях**

Инструмент	Резьба	Номинальный диаметр резьбы, мм				
		От 3 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 16	Св. 16 до 27	Св. 27
Метчик	Внутренняя	9	10	11	12	13
Самораскрывающаяся головка	Внутренняя и наружная	-	-	-	-	18

Примечания: 1. Рекомендуемая скорость резания для обоих способов 6...8 м/мин.  
2. Минимальная скорость резания для обоих способов 3 м/мин.

**5.2.12. Рекомендуемые скорости (м/мин) резания при нарезании резьбы в стальных деталях**

Инструмент	Резьба	Номинальный диаметр резьбы, мм							
		6	8	10	12	16	20	24	>30
Метчик	Внутренняя	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,5	8,5	9,5
Самораскрывающаяся головка	Внутренняя и наружная	-	-	-	-	-	-	-	13

Примечания: 1. Рекомендуемая скорость резания в обоих случаях 4...6 м/мин.  
2. Минимальная скорость резания в обоих случаях 2,5 м/мин.  
3. Самораскрывающаяся головка применяется св. 56 мм.

При применении резьбонарезных и самораскрывающихся головок необходимо тщательно регулировать и выставлять резьбонарезные гребенки, а также обеспечивать беззазорное перемещение гребенок по корпусу головки. Без соблюдения этих требований качественную резьбу получить не удастся. В табл. 5.2.11 и 5.2.12 приведены скорости резания, рекомендуемые для нарезания резьбы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бесполов А.М., Глейзер Л.А. и др. Технология машиностроения (специальная часть). М.: Машиностроение. 1965. 398 с.
2. Классификатор ЕСКД: Классы 71, 72, 73, 74, 75, 76: Иллюстрированный определитель деталей. М.: Изд-во стандартов. 1966. 40 с.
3. Машиностроительные материалы. Справочник / Под ред. В.М. Раскатова. М.: Машиностроение, 1978. 512 с.
4. Проектирование технологии / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцова. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.
5. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гишовича, Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
6. Справочник технолога по автоматическим линиям / А.Г. Косилова, А.Г. Лыков, О.М. Деев и др. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

7. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов и др. М.: Машиностроение, 1985. 480 с.

**Глава 5.3****ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

В данной главе под деталями сложной формы подразумеваются детали, включающие сложные поверхности. Сложной, или фасонной называется поверхность, специально отличающаяся по форме от цилиндрической или плоской поверхности. В силу широкого распространения некоторые сложные поверхности получили собственные названия: шлицы, резьба и др.

**5.3.1. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ, ЗАГОТОВКИ, ИНСТРУМЕНТ, ОБОРУДОВАНИЕ**

Фасонные поверхности, входящие в конструкцию деталей сложной формы, можно разделить на следующие основные группы: 1) конические; 2) фасонные и сферические поверхности вращения (рис. 5.3.1, а); 3) прямолинейно- или линейчато-фасонные (рис. 5.3.1, б); 4) объемно-фасонные (рис. 5.3.1, в).

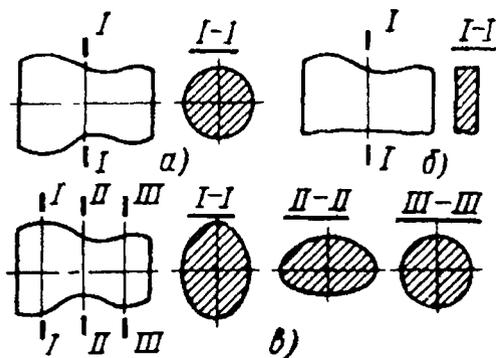


Рис. 5.3.1. Типы фасонных поверхностей:  
 а - поверхность вращения;  
 б - прямолинейно-фасонная поверхность;  
 в - объемно-фасонная поверхность

Объемно-фасонные поверхности наиболее сложные и встречаются относительно редко.

Обработка фасонных поверхностей осуществляется, в основном, двумя основными методами:

1) фасонным режущим инструментом (резец, протяжка, фреза, зенкер, шлифовальный круг), форма режущей кромки которого соответствует форме обрабатываемой фасонной поверхности и копируется на нее;

2) простым режущим инструментом (резец, фреза, шлифовальный круг), режущее лезвие которого находится в точечном или линейчатом контакте с обрабатываемой фасонной поверхностью.

Во втором случае образование фасонной поверхности обеспечивается кинематикой процесса обработки, которая сообщает инструменту соответствующее криволинейное движение относительно обрабатываемой заготовки, что обеспечивается применением копировальных систем или станков с числовым программным управлением.

Часто можно встретить и комбинацию указанных двух способов обработки: фасонному инструменту сообщается движение по заданной траектории (нарезка и шлифование резьбы на станках, фрезерование спиральной канавки сверла и др.).

С точки зрения производительности и простоты по выполнению наиболее эффективна обработка фасонным инструментом. К другим методам обработки прибегают в случаях, когда применению фасонного инструмента препятствуют форма и размеры поверхности или экономические соображения.

Копировальные системы объединяют в себе копировальные устройства, применяющиеся на универсальных станках, и копировальные станки определенного назначения.

Копировальные устройства оправдываются в серийном производстве и конкурируют с копировальными станками в массовом производстве. Если в условиях производства крупного масштаба копировальное устройство не в состоянии обеспечить необходимую производительность операции, то следует использовать копировальные станки определенного назначения.

Обработка фасонных и сферических поверхностей вращения осуществляется преимущественно на станках токарного типа. Короткие детали шириной не более 70 мм обтачивают фасонными резцами с поперечной подачей. При увеличении ширины обработки возможно возникновение вибраций из-за больших радиальных сил. Поперечная подача на оборот с целью уменьшения  $P_y$  составляет 0,01...0,05 мм.

Чем меньше диаметр детали и чем больше ширина резца, тем меньше должна быть подача. Скорость резания в этом случае меньше, чем при наружном обтачивании цилиндрических поверхностей и составляет примерно 25...40 м/мин. С целью уменьшения вибрации в некоторых случаях осуществляют закрепление резца в пружинящей державке.

Такой метод обработки имеет следующие преимущества: высокая производительность благодаря короткому рабочему ходу резца; контроль диаметра можно осуществлять лишь в одном сечении, а остальные размеры обеспечиваются автоматически точно профилем резца; сокращение времени наладки за счет того, что один фасонный резец заменяет иногда несколько (до четырех-пяти) отдельных резцов.

Обработка фасонных поверхностей особенно нуждается в разделении на черновую и чистовую. В процессе черновой обработки не обязательно получать поверхность эквидистантную окончательной, но для улучшения условий работы чистового инструмента желательно избегать резкой разницы припуска по длине фасонной поверхности. Длинные фасонные поверхности вращения обрабатываются с использованием копирных устройств. Работа ведется с продольной подачей суппорта  $S_{\text{прод}}$  (задающая подача), которая может быть либо постоянной (однокоординатное копирование), либо переменной (двухкоординатное копирование). Винт поперечной подачи отключается. Поперечная подача  $S_0$  обеспечивается за счет копира. Варианты и кинематика процесса такого вида обработки представлены на рис. 5.3.2. Пунктиром условно обозначена связь следящего ролика с попе-

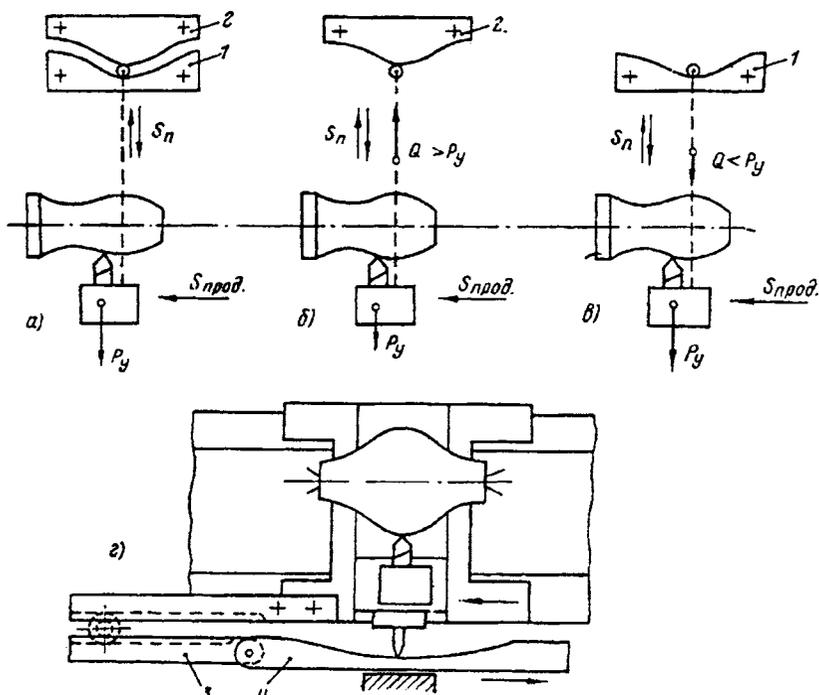


Рис. 5.3.2. Схемы obtачивания фасонных поверхностей с помощью копирующих устройств: а - с использованием передней (1) и задней (2) копирующих линеек; б - с использованием задней линейки; в - то же, передней линейки; г - с применением растянутого копира 4; 3 - реечная передача

речным суппортом и резцедержателем. Во время обработки следящий ролик прижимается к поверхности копира в случаях, представленных на рис. 5.3.2, б и в, с силой, которая должна быть больше радиальной составляющей силы резания (рис. 5.3.2, б) или меньше ее (рис. 5.3.2, в).

При большой величине угла ( $>45^\circ$ ) между касательной в любой точке профиля копира и направлением продольной подачи в целях предотвращения поломки копирного устройства применяют растянутые копиры (рис. 5.3.2, г), т.е. увеличенные по длине в 2 раза. При движении суппорта влево реечная передача обеспечивает движение копирной линейки с такой же скоростью в противоположном направлении, что в 2 раза увеличивает путь следящего штифта относительно линейки. Итак, пологий профиль копира дает возможность обрабатывать крутой профиль детали.

Фасонные поверхности вращения можно шлифовать по методу врезания или с использованием копира. Метод врезания дает хорошие результаты при перепадах фасонного профиля в радиальном направлении не более 25 мм. Превышение этой величины приводит к быстрому снижению точности обработки

из-за различной интенсивности износа фасонного профиля круга, обусловленной большой разностью окружных скоростей.

Соответствующий профиль круга поддерживается с помощью специальных устройств для правки. Примеры расчета параметров правки круга приведены в [3]. Кинематика процесса обработки шлифованием по копиру аналогична подобной обработке на токарных станках. Разница состоит в том, что при шлифовании по копиру может меняться не только инструмент (шлифовальный круг), но и деталь. Режимы обработки соответствуют, в основном, режимам врезного и продольного шлифования.

Фасонные поверхности вращения можно шлифовать на бесцентрово-шлифовальных станках, а также с помощью абразивных лент.

Обработка фасонных линейчатых поверхностей. Такие поверхности образуются при движении образующей в виде прямой линии по заданной кривой (направляющей). Направляющая кривая может быть замкнутой и разомкнутой. В первом случае образуются некруглые детали в виде кулачков, эксцентрик и др. Такие детали можно обрабатывать точением, фрезерованием, шлифованием.

При точении оправка с закрепленными на ней обрабатываемой деталью 2 и копиром 1 устанавливается в центрах станка (рис. 5.3.3). Поперечный суппорт отключается от ходового винта. Ролик к поверхности копира прижимается пружиной. При вращении оправки резец получает поперечную подачу, воспроизводящую профиль копира. При включенной продольной подаче осуществляется обработка поверхности детали по всей ее ширине. Другие схемы обработки фасонных линейчатых поверхностей приводятся в [11].

Незамкнутые поверхности обрабатывают строганием, фрезерованием, протягиванием и шлифованием. Стругание применяют в единичном производстве. Фрезерование проводится на специальных приспособлениях, позволяющих сочетать продольное движение с поперечным или поступательное с вращательным.

Обработка объемных фасонных поверхностей проводится на копирующе-фрезерных станках, которые разделяются на следующие группы: 1) с механической следящей системой (СС); 2) с гидравлической СС; 3) с электрической СС; 4) с комбинированной СС. Сущность указанного метода обработки состоит в том, что объемная форма модели, осязаемая следящим штифтом, передается инструментом заготовке. Одна из схем работы копирующе-фрезерного станка представлена на рис. 5.3.4, а. Здесь 1 - обрабатываемая заготовка; 2 - стол, перемещающийся по координате  $X$ ; 3 - фрезерная головка, перемещающаяся по координате  $Y$ ; 4 - каретка, перемещающаяся по координате  $Z$ . В корпусе фрезерной головки 3 размещены следящий штифт 6 и пальцевая фреза 7. Осязающая контур фасонной модели 5, штифт через копирующийся прибор подает команды в виде электрических импульсов соответствующим приводам подачи по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Подробно работа таких систем изложена в [5].

Фасонная поверхность на детали образуется фрезерованием отдельными строчками с шагом  $s$  (рис. 5.3.4, б). Перемещение каретки 4 регламентируется ограничителями на колонне станка и выдерживается в пределах расстояния  $l$ . После прохождения по всей длине одной строчки стол 2 перемещается в продольном направлении на величину шага  $s$ , а фреза меняет направление перемещения. Перемещение стола в горизонтальном направлении в пределах расстояния  $l$  также ограничено упорами.

Обработка может осуществляться в несколько проходов. За каждый проход удаляется слой металла глубиной  $t$ .

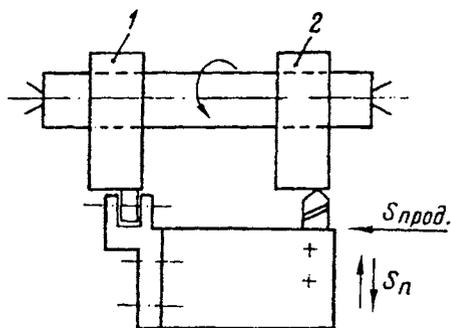


Рис. 5.3.3. Схема обтачивания фасонной линейчатой поверхности

Заготовки деталей сложной формы должны отвечать ряду требований, главным из которых является обеспечение заданного качества готовой детали при ее минимальной себестоимости. Особенно важны правильные выбор заготовки и назначение оптимальных условий ее изготовления в автоматизированном производстве, когда обработка деталей сложной формы ведется на автоматизированных гибких и автоматических линиях, оснащенных системами ЧПУ, микропроцессорами и микроЭВМ.

Проектирование заготовок деталей сложной формы должно соответствовать требованиям действующих стандартов, а при их отсутствии - требованиям технических условий.

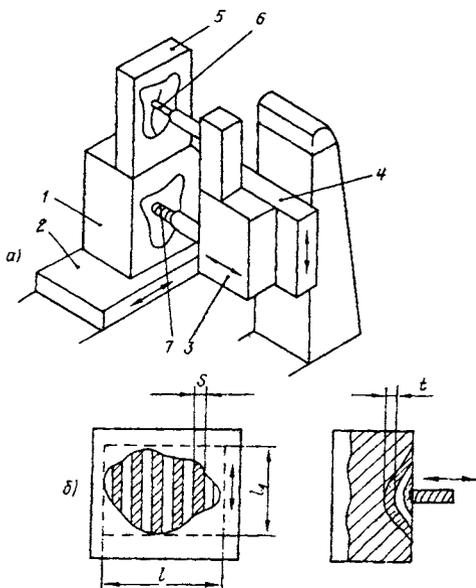


Рис. 5.3.4. Схема объемного копирования

Методика проектирования заготовок достаточно полно изложена в [8]. Она отражает особенности заготовок деталей сложной формы и включает такие вопросы, как способ получения заготовки, допустимые отклонения их размеров, термическая обработка с целью улучшения свойств заготовки и др.

Инструмент для обработки деталей сложной формы должен удовлетворять общим требованиям, предъявляемым к металлорежущим инструментам. При обработке фасонных поверхностей используются фасонные резцы с точечным контактом, фрезы, протяжки, шлифовальные круги и ленты.

Одним из основных вопросов проектирования инструмента для обработки деталей сложной формы являются: 1) расчет профиля фасонного инструмента; 2) выбор материала режущей части лезвийных инструментов или марки применяемого абразивного инструмента.

Первый вопрос подробно изложен в [7]. Второй должен решаться с учетом целого ряда факторов: материал заготовки, ее твердость, технические условия на изготовление, наличие СОЖ и др. Исчерпывающие рекомендации по выбору инструмента в зависимости от этих факторов даны в справочной литературе [7, 9].

Назначение режимов обработки должно отвечать требованиям технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств фасонных поверхностей деталей сложной формы с заданной надежностью [4, 10].

Оборудование для обработки деталей сложной формы выбирается в зависимости от их конструктивных особенностей (форма фасонных поверхностей, габариты, точность обработки и др.). В зависимости от этих факторов можно выбирать оборудование из групп станков: токарных, фрезерных, протяжных, шлифовальных, электрофизических и электрохимических. При этом выбираются следующие типы для групп станков:

1) *Группа 1.* Токарные - тип 7 - копируемые.

2) *Группа 6.* Фрезерные - тип 4 - копируемые.

3) *Группа 4.* Электрофизические и электрохимические - типы 4, 5, 7 - электрохимические, электроэрозионные копируемые.

4) *Группа 7.* Протяжные - типы 5, 6, 7 - протяжные горизонтальные и вертикальные.

5) *Группа 3.* Шлифовальные - типы 1, 2, 7 - круглошлифовальные, бесцентровошлифовальные, плоскошлифовальные.

Выбор конкретной модели станка в зависимости от вышеуказанных факторов осуществляется в соответствии с рекомендациями [6, 9], в которых учитываются габариты детали, рабочая зона станка и наличие необ-

ходимых рабочих движений инструмента и детали.

### 5.3.2. ОБРАБОТКА НА СТАНКАХ С ЧПУ

Обработка фасонных поверхностей на станках с ЧПУ - это новая ступень обработки на станках с программным управлением. Отличие состоит в том, что в этом случае физический программноноситель (копир) заменен программой обработки, записанной на определенном языке программирования. Это позволяет резко повысить точность, гибкость и мобильность системы обработки в целом.

Как в России, так и за рубежом, используется целая гамма станков с ЧПУ различных групп с широким спектром технологических возможностей и систем ЧПУ. Наибольшее применение при обработке сложных деталей получили станки токарной и фрезерной групп, а также многоцелевые станки. При этом используются следующие типы систем ЧПУ:

1) NC (Numerical control) - ЧПУ обработкой на станке по программе, заданной в алфавитно-цифровом коде. Ввод программы проводится, как правило, с перфокарты;

2) HNC (Hand NC) - разновидность систем ЧПУ с ручным заданием программы с пульта устройства (оперативные системы управления);

3) SNC (Speicher NC) или MNC (Memory NC) - разновидность систем ЧПУ, имеющая память для хранения всей управляющей программы;

4) CNC (Computer NC) - автономная система управления станком, содержащая ЭВМ (мини-ЭВМ или микро-ЭВМ) или процессор.

Устройства SNC и CNC имеют переменную структуру и являются более современными. В табл. 5.3.1 приведен краткий перечень устройств, оснащенных разными типами систем ЧПУ.

Все станки для обработки фасонных поверхностей должны иметь контурную или комбинированную систему управления. Для комплексной обработки деталей сложной формы, включая обработку фасонных поверхностей и нарезание резьб, предназначены токарные станки с ЧПУ мод. 16K20Ф3 (модификация 16K20Ф3С5), 1725МФ3 и др. Для обработки плоских или пространственных деталей сложной формы, типа штампов, пресс-форм, кулачков и др. предназначен консольный вертикально-фрезерный станок с ЧПУ мод. 6P13Ф3-01 и др. Обработка сложных контуров осуществляется также и на многооперационных станках, которые имеют высокую степень автоматизации. Опыт эксплуатации показывает, что эффективность их использования возрастает с ростом сложности детали.

5.3.1. Устройства, оснащенные разными типами систем ЧПУ

Тип системы ЧПУ	Модель устройства	Станки, для управления которыми система предназначена
NC	H221M и др.	Токарные станки с автоматической сменой режущего инструмента
NC	H331M и др.	Фрезерные станки с автоматической сменой режущего инструмента
HNC	Устройство на базе микро-ЭВМ «Электроника НЦ-31»	Токарные станки в условиях мелкосерийного и единичного производства
SNC	H331M с модулями памяти	Фрезерные станки с автоматической сменой режущего инструмента
CNC	2У22, 2Р22, 2С42, 2У32-61, 2С85 и др.	Токарные, фрезерные и многооперационные станки

Одним из основных этапов разработки технологии обработки деталей сложной формы на станках с ЧПУ является разработка управляющей программы. Для этого в системах типа NC, HNC, SNC необходимо образующие фасонных поверхностей представить в виде кусочно-линейной аппроксимации. Если используется система типа CNC, то достаточно знать аналитическое выражение функции, описывающей образующую фасонной поверхности в декартовых или полярных координатах. Все необходимые вычисления будет выполнять ЭВМ системы ЧПУ в ходе отработки составленной программы.

Блок-схема программы при этом (рис. 5.3.5) является практически универсальной и аналогична работе ЭВМ с графопостроителем, но в качестве последнего выступает станок.

Вопросы разработки и отладки управляющих программ для различных групп станков и типов систем ЧПУ подробно рассмотрены в работе [1].

Обработка деталей сложной формы на станках с ЧПУ открывает новые возможности обеспечения эксплуатационных свойств фасонных поверхностей. Это связано с тем, что системы ЧПУ позволяют программно изменять режимы обработки по заранее заданному закону. Если этот закон соответствует закону изменения условий эксплуатации, то реализуется возможность адаптации фасонной поверхности в ходе обработки к переменным условиям эксплуатации в функции ее координат (длина, угол поворота и др.). В результате можно получить поверхность, например, равного износа. Такое решение задачи в обычных системах обработки деталей сложной формы невозможно.

К фасонным поверхностям относятся также поверхности микрорельефов, которые наносятся на функциональные поверхности деталей с целью улучшения их эксплуатаци-

онных свойств. Традиционно при этом использовались различные сложные технические устройства. В работе [10] показана возможность программного метода получения микрорельефов различных классов на станках с ЧПУ с системами управления типа CNC.

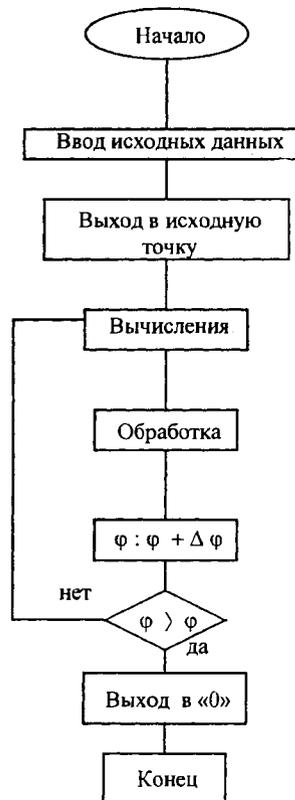


Рис. 5.3.5. Блок-схема работы системы ЧПУ типа CNC при обработке фасонных поверхностей

Парк существующего станочного оборудования с ЧПУ в большой степени оснащен системами типа NC и возникает задача реализации в этих условиях приемов обработки фасонных поверхностей, свойственных системам CNC. Решение такой задачи представлено на рис. 5.3.6 и предполагает взаимодействие с системой САПР. Здесь предусматривается три этапа: 1) моделирование фасонной поверхности (в данном случае микрорельефа), 2) синтез управляющей программы и 3) обработка. На этапе моделирования технолог определяет исходные данные обработки с целью получения микрорельефа с заданными пара-

метрами. При получении положительного результата (блок 4) осуществляется генерация управляющей программы с помощью одной из систем автоматического программирования. Синтезированная программа выводится либо на перфоленту (в случае отсутствия непосредственной связи ЭВМ с устройством ЧПУ), либо на модуль согласования ЭВМ с УЧПУ (блок 7), если такая связь существует.

Такой подход может быть осуществлен при обработке на станках с ЧПУ типа NC любых фасонных поверхностей, образующие и направляющие которых имеют аналитическое описание.

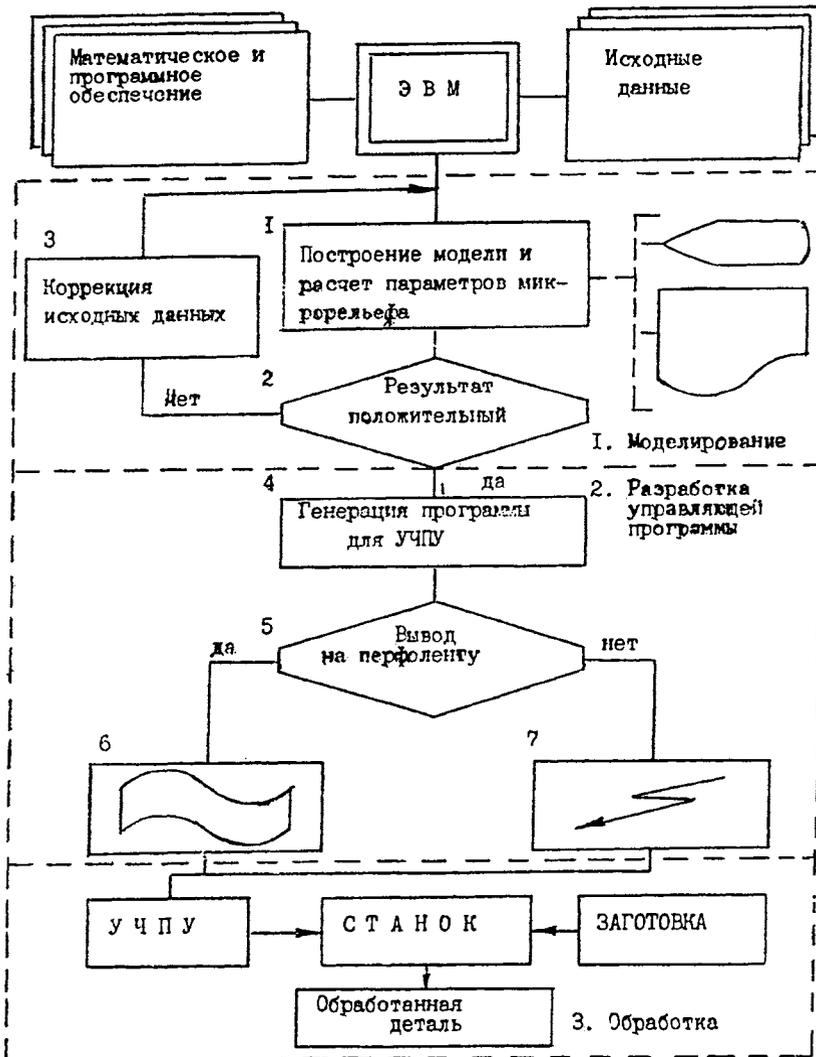


Рис. 5.3.6. Блок-схема моделирования и реализации фасонных поверхностей на станках с ЧПУ (NC) в условиях САПР ТП

### 6.3.3. ОБРАБОТКА РЕЗЬБ, В ТОМ ЧИСЛЕ НА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЯХ

Резьба является самым распространенным элементом деталей машин. В особенности это относится к крепежным деталям - винтам, болтам, шпилькам, установочным стойкам и гайкам, которые широко применяются в разнообразных отраслях промышленности. В одном автомобиле, например, свыше двух тысяч крепежных деталей, и в любой корпусной детали (блоке, картере или кожухе) насчитываются десятки резьбовых отверстий.

Функции резьбовых соединений весьма разнообразны. Они служат для соединения между собой отдельных деталей и узлов, арматуры, трубопроводов, передачи значительных осевых нагрузок и крутящих моментов, осуществления точнейших перемещений в механизмах. В зависимости от функционального назначения резьбовых соединений они должны обеспечивать определенные эксплуатационные свойства, среди которых такие как: надежность стопорящих свойств на протяжении всего срока службы, сопротивление усталости и статическая прочность соединения, коррозионная стойкость, износостойкость и др. Все эти эксплуатационные свойства зависят как от материалов деталей, так и от технологии изготовления резьбы. Учитывать единство процессов изготовления и эксплуатации необходимо при выборе метода получения резьбовых деталей.

Традиционные способы изготовления резьбы [13] представлены в табл. 5.3.2, хотя встречаются и отклонения от приведенной схемы, обусловленные наличием оборудования, оснастки и другими причинами.

5.3.2. Способы изготовления резьбы

Тип производства	Инструмент для изготовления наружной резьбы	Инструмент для изготовления внутренней резьбы	Оборудование
Единичное и мелкосерийное	Круглые плашки. Резьбовые резцы и гребенки. Дисковые и гребенчатые резьбовые фрезы	Метчики ручные. Резьбовые резцы и гребенки. Метчики машинные	Универсальные металлорежущие станки, станки с ЧПУ
Серийное и крупносерийное	Круглые плашки. Винторезные головки. Гребенчатые резьбовые фрезы. Вихревые головки. Резьбовые резцы. Винтонакатные головки. Резьбонакатные ролики	Метчики гаечные и машинные. Гайконарезные головки. Вихревые головки. Метчики-раскатники. Резьбовые резцы	Универсальные металлорежущие станки с усовершенствованной технологической оснасткой. Полуавтоматы и автоматы. Агрегатные станки и АЛ
Массовое	Резьбонакатные плашки, ролики, сегменты, головки. Резьбонарезные головки, пресс-формы	Метчики гаечные и машинные. Метчики-раскатники. Гайконарезные головки. Резьбовые резцы, пресс-формы	Высокопроизводительные автоматы, агрегатные станки и АЛ. Машина для литья под давлением

При отработке конструкции резьбовой детали на технологичность следует учитывать влияние следующих факторов: шага, длины и точности резьбы, взаимного расположения резьбы с другими поверхностями, термической обработки, механических свойств материала детали, допустимых длины сбега и недореза резьбы, особенностей конструкции, таких, как наличие пазов, лысок, отверстий, пересекающих резьбовую поверхность. Кроме того, особенности конструкции определяют возможность автоматизации резьбообработки и последующей сборки.

Шаг резьбы влияет на условия резьбообразования: силу резания или усилие накатывания, трудоемкость изготовления и стойкость инструмента. В связи с этим, является нежелательным использование резьб с шагом более 2,5 мм. Точность резьбы и параметры взаимного расположения резьбы с другими поверхностями влияют на себестоимость и трудоемкость изготовления резьбовой детали.

При назначении твердости резьбовой детали необходимо учитывать ее существенное влияние на работоспособность и стойкость резьбообразующего инструмента. Термообработка до твердости 285 НВ может выполняться как до получения резьбы, так и после нее. Если твердость превышает указанное значение, то в условиях серийного и массового производства нарезание или накатывание резьбы следует проводить до термической обработки. При более высокой твердости и возможности деформации резьбы в процессе термообработки, резьбу необходимо изготовлять за одну операцию после термической обработки. Возможны два варианта построения технологического процесса. По первому

варианту участок заготовки, на котором будет формироваться резьба, предохраняют от воздействия температуры, а термическую обработку выполняют лишь на требуемых поверхностях заготовки. После этого резьбу можно обрабатывать обычными методами. Если резьбовую поверхность нельзя изолировать в процессе термообработки, то применяют второй вариант, по которому резьбу получают на заготовке повышенной твердости шлифованием, точением или вихревым нарезанием твердосплавными резцами. При невозможности осуществления указанных способов обработки, резьбу выполняют за две операции: формирование резьбы на заготовке в "сыром" виде и зачистка поверхности резьбы после термообработки.

Участки детали, обработанные ТВЧ, должны располагаться на расстоянии не менее 5-7 мм от поверхности резьбы.

Заготовки крепежных изделий изготавливают методами резания, холодной и горячей пластической деформации, сварки, литья, прессованием из порошков и комбинированными способами. В условиях крупносерийного и массового производств основное количество заготовок изготавливают различными способами холодной и горячей пластической деформации. В необходимых случаях используют так называемые вторые операции - методы резания, которые служат для снятия фасок, обрезки граней головки, прорезки шлицев на головке, обтачивания конуса стержня, сверления отверстий, нарезания внутренних резьб, шлифования гладкой части болтов высокой точности и т.п.

Применяют следующие методы пластического деформирования: прямое и обратное выдавливание, плющение, гибку, просечку отверстий, вырубку контура и др. Как правило, эти операции выполняются одновременно или последовательно в одном автомате, реже с использованием двух автоматов. Применяя различные операции пластического формообразования, почти все крепежные детали массового применения можно изготовить полностью или частично с помощью холодной обработки давлением. По сравнению с резанием обработка давлением позволяет:

резко увеличить производительность процесса;

получить более высокий коэффициент использования материала;

получить высокое качество поверхности, повышенную и стабильную точность геометрических размеров всех деталей в партии (8-11 квалитет точности,  $Ra=0,16...1,25$  мкм);

получить детали с заданными эксплуатационными свойствами за счет деформационного упрочнения металла;

повысить циклическую прочность деталей в несколько раз;

получить значительный экономический эффект.

Однако методом холодной высадки изготавливают крепежные детали, как правило, размером не более M24; в отдельных случаях до M52.

Крепежные детали из малопластичных материалов изготавливают горячей или теплой высадкой практически без ограничения размера с большими степенями деформации. Однако эти методы по сравнению с холодной высадкой имеют ряд недостатков: хуже качество поверхности, меньше точность. Кроме того, появляется необходимость в дополнительных доводочных операциях резания и термообработки, увеличивающих трудоемкость процесса.

В условиях единичного и мелкосерийного производства крепежные детали наиболее эффективно изготавливать методами резания на универсальных металлорежущих станках. При увеличении серийности производства экономически целесообразно использовать различные полуавтоматы и автоматы.

В отдельных случаях крепежные детали из труднодеформируемых сталей и сплавов с большим соотношением площадей сечений головки и стержня экономически целесообразно изготавливать методами резания при любой серийности производства.

В качестве исходной заготовки для токарных автоматов используют калиброванные прутки круглого, квадратного, шестигранного и других сечений.

Определенная номенклатура крепежных деталей изготавливается методами листовой штамповки. Например, заготовки для низких гаек изготавливают из ленты или полосы на простых прессах вырубкой заготовки по контуру с одновременной просечкой отверстия под резьбу. Заготовки для деталей типа фланцевой самоконтрящейся гайки изготавливают на многопозиционных листоштамповочных автоматах и штампах последовательного действия.

Крепежные детали также изготавливают различными методами сварки. Сваривают специальные крепежные детали, состоящие из двух частей и более, сваривают и крепежные детали с одной из частей специального соединения. Все чаще требуется сочетание различных физико-механических свойств у одной крепежной детали, что достигается холодной сваркой трением.

Таким образом, заготовки крепежных деталей можно изготавливать различными методами, при выборе которых необходимо учитывать физико-механические свойства и интенсивность упрочнения исходного металла,

**5.3.3. Технологические возможности методов обработки по обеспечению точности резьбы  
и параметров состояния ее рабочих поверхностей**

Метод обработки	Степень точности	$H_{\max}$ , мкм	$Wz$ , мкм	$S_{mw}$ , мм	$Ra$ , мкм	$R_p$ , мкм	$S_m$ , мкм	$S$ , мкм	$\pm\sigma_{\text{ост}}$ , МПа	$h_{\sigma}$ , мм	$U_h$ , %	$h_H$ , мм
Нарезание резцами, гребенками, резцовыми головками	6-8	3-10	3-20	0,8-3,0	1,6-4,0	4,0-12	0,08-0,25	0,032-0,16	150-250	0,02-0,1	10-30	0,05-0,15
Нарезание метчиками, плашками	6	4-12	2-15	0,8-2,5	1,25-3,2	3,0-10	0,063-0,2	0,025-0,125	200-300	0,02-0,15	10-40	0,05-0,2
Шлифование резьбы	2-6	2-8	2-12	0,8-5	0,63-1,25	1,5-4,0	0,02-0,1	0,01-0,08	150-200	0,02-0,08	0-30	0,05-0,15
Накатывание, раскатывание	2-6	2-6	4-12	0,8-6	0,8-2,5	1,6-7,0	0,063-0,15	0,025-0,1	200-400	0,04-0,2	50-80	0,1-1,0

Обозначения.  $H_{\max}$  - максимальная величина макроотклонений;

$Wz$  - средняя высота волн;

$S_{mw}$  - средний шаг волн;

$\sigma_{\text{ост}}$  - поверхностные остаточные напряжения;

$h_{\sigma}$  - глубина залегания поверхностных остаточных напряжений;

$U_h$  - степень наклепа;

$h_H$  - глубина наклепанного слоя.

требования технических условий и серийности производства, требуемые эксплуатационные свойства.

Существует два основных вида изготовления резьбы: резание и деформирование. Нарезание наружных резьб проводится резцами, гребенками, круглыми плашками, резьбно-нарезными головками, фрезами, вихревым резьбонарезанием, шлифовальными кругами. Внутренние резьбы нарезают резцами, гребенками, метчиками, гайконарезными головками, фрезами.

Основным способом изготовления крепежных деталей с внутренними резьбами диаметром до 16 мм является нарезание или раскатывание их метчиками различной конструкции. В условиях серийного и массового производства процесс нарезания резьб автоматизирован за счет применения автоматов и полуавтоматов, использующих гаечные метчики.

Наружные резьбы изготавливаются, как правило, накатыванием. Все способы накатывания основаны на использовании пластических свойств металла заготовки и заключаются в одновременном или последовательном перенесении профиля накатного инструмента на деталь.

Наибольшее распространение получили следующие способы накатывания: плоскими плашками; роликом и сегментом (планетарное накатывание); роликами различной конструкции; резьбонакатными головками.

Плоскими плашками накатывают резьбу на болтах, винтах, шурупах и различные профили на деталях, входящих в состав крепежных изделий (технологические и обрывные канавки на стержнях заклепок с сердечниками, на винтах высокого сопротивления срезу и т.п.). Планетарный способ применяют в основном для накатывания резьб небольших размеров на стандартных крепежных деталях несложной формы. Это самый производительный способ, но по диапазону номенклатуры накатываемых резьб уступает способам накатывания плоскими плашками и роликами.

Накатывание роликами является самым универсальным методом. Обработка производится двумя (реже тремя) роликами. В зависимости от характера подачи при накатывании различают три разновидности данного способа:

- с радиальной подачей роликов - изготовление метрических резьб повышенной точности  $\varnothing 2...100$  мм;
- с тангенциальной подачей заготовки - изготовление крепежных резьб  $\varnothing 1...10$  мм;
- с осевой подачей заготовки - изготовленные метрических и трапецеидальных резьб

нормальной точности при любой длине накатываемой детали.

Резьбонакатные головки относятся к специальному резьбонакатному инструменту. Их использование по сравнению с резьбонакатным оборудованием позволяет:

- получать окончательно обработанные резьбовые детали без переналадки станка;
- накатывать наружную резьбу на маложестких полых деталях при применении много-роликковых головок;
- накатывать резьбу на деталях с криволинейной осью;
- эффективно накатывать резьбу на деталях небольшой серии за счет быстрой наладки резьбонакатной головки.

Технологические возможности способов резьбообработки представлены в табл. 5.3.3-5.3.5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гжиров Р.И., Серебrenицкий П.П.** Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1990. 588 с.
2. **Гусев И.Т.** и др. Устройства числового управления: Учеб. пособие для техн. вузов / И.Т. Гусев, В.Г. Елисеев, А.А. Маслов. М.: Высшая школа. 1986. 296 с.
3. **Егоров М.Е.** и др. Технология машиностроения: Учебник для вузов. Изд. 2-е, доп. М.: Высшая школа, 1976. 534 с.
4. **Качество машин:** Справочник. В 2-х т. Т1 / А.Г. Сулов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. М.: Машиностроение. 1995. Т. 1. 256 с., Т. 2. 430 с.
5. **Лещенко В.А.** Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. М.: Машиностроение. 1975. 288 с.
6. **Обработка металлов резанием:** / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойли и др.; Под общ. ред. А.А. Панова. М.: Машиностроение. 1988. 736 с.
7. **Справочник инструментальщика /** И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение. 1987. 846 с.
8. **Справочник технолога-машиностроителя.** В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1985. 656 с.
9. **Справочник технолога-машиностроителя.** В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1986. 496 с.
10. **Федоров В.П.** Проблемы повышения надежности технологического обеспечения качества деталей машин // Трение и износ, 18 (1997), № 3. С. 349-360.

## 5.3.4. Методы обработки внутренних резьб

Метод	Диаметр резьбы, мм	Шаг резьбы, мм	Длина резьбы, не более, мм	HRC, не более	Степень точности
Нарезание метчиками	0,2-300	0,075-10	300	46	2-7
Нарезание головками	36-300	0,075-8	200	46	5-8
Точение	10-1000	0,5-100	500	63	4-8
Шлифование	20-400	0,5-100	500	71	Св. 2
Фрезерование	20-200	0,5-100	100	37	6-8
Вихревое нарезание	30-350	3-50	300	46	7-9
Протягивание	10-150	2-10	200	34	6-7
Раскатывание метчиками	1-52	0,25-2,5	200	26	2-6
Раскатывание головками	50-300	0,5-4	500	26	4-6

## 5.3.5. Методы обработки наружных резьб

Метод	Диаметр резьбы, мм	Шаг резьбы, мм	Длина резьбы, мм	HRC, не более	Степень точности
Накатывание планетарное	1,6-27	0,4-2,5	100	34	2-6
Накатывание плоскими плашками	2-70	0,25-3	250	34	6-8
Накатывание роликами	2-250	0,35-20	8000	36	2-6
Накатывание аксиальными головками	1,4-150	0,35-8	6000	34	4-7
Накатывание тангенциальными головками	3-52	0,5-2,5	20	26	4-7
Нарезание головками	1,7-400	0,35-6	6000	37	5-8
Точение	2-1000	0,35-100	6000	63	6-8
Шлифование	0,5-400	0,04-100	6000	71	Св. 2
Фрезерование	10-400	0,5-100	2000	37	6-8
Вихревая	20-1000	2,5-100	2000	46	7-9
Плашками	0,2-72	0,08-3	1000	34	5-8

11. **Фираго В.П.** Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей. М.: Машиностроение. 1973. 468 с.

12. **Фрумин Ю.Л.** Высокопроизводительный режущий инструмент. М.: Машиностроение. 1977. 183 с.

13. **Якухин В.Г., Ставров В.А.** Изготовление резьбы: Справочник. М.: Машиностроение. 1989. 192 с.

14. **Ящерицын П.И.** Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении. Минск: Вышшая школа, 1974. 608 с.

## Глава 5.4

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Назначение технологического процесса - произвести удаление припуска и формообразование поверхностей, а также дать этим поверхностям и внутренним слоям колеса необходимые свойства.

На технологический процесс наибольшее влияние оказывают:

материал и способ получения заготовки, определяющие состав операций, их точност-

ные возможности и параметры режимов резания, характер деформации в процессе термообработки;

габаритные размеры и форма зубчатого колеса, влияющие на выбор оборудования, технологических баз и построение технологического процесса обработки;

форма и расположение зубчатого венца, влияющие на выбор метода обработки зубьев и технологических баз;

форма зубьев, наличие или отсутствие их модификации;

требуемая точность;

вид производства.

#### 5.4.1. МАТЕРИАЛЫ И СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Зубчатые колеса изготавливают из конструкционных сталей и сплавов, чугуна, металлокерамики, бронзы и пластмасс. Наиболее часто применяют углеродистые и легированные стали марок 35, 40, 45, 50, 35 ХГСА, 20Х, 30Х, 40Х, 45Х, 30ХМ, 38ХС, 38ХМЮА, 18ХГТ, 25ХГТ, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА, 20Х2Н4ВА, 20Х2Н4МА, 45ХНМФА и другие.

Высоконагруженные колеса требуют применения высококомбинированных хромоникелевых сталей, подвергаемых химико-термической обработке. Из чугуна и металлокерамики изготавливают зубчатые колеса, работающие при малых окружных скоростях и передающие небольшие усилия.

Бронза обычно применяется для червячных колес, работа которых связана с повышенным скольжением профилей.

Для зубчатых колес, передающих небольшие мощности и работающих при высоких окружных скоростях (до 50 м/с), можно применять пластмассы, текстолит, нейлон, капрон и др., обеспечивающие бесшумность, плавность хода передачи и способные гасить вибрации.

**Способы получения заготовок.** Заготовки зубчатых колес бывают цельные, наплавленные, сварные, паяные, склеенные и сборные как без предварительно отформованных зубьев, так и с ними. Заготовки получают из твердого, жидкого или порошкообразного исходного материала. Способы получения зависят от материала, конструктивных особенностей колес, размеров и объема партии выпуска.

Стальные зубчатые колеса обычно изготавливают из поковок и нормального катаного прутка. Зубчатые колеса диаметром до 65 мм в большинстве случаев экономичнее изготавливать из прутка. В массовом, крупносерийном и серийном производствах колеса с наружным

диаметром более 65 мм изготавливают из заготовок, получаемых штамповкой в подкладных или закрытых штампах на паровоздушных молотах, кривошипных ковочно-штамповочных прессах, прессах двойного действия, сферодвижных прессах, горизонтально-ковочных машинах.

Заготовки для изготовления поковок отрезают от прутка ножницами или дисковой пилой, диаметр прутка - до 80 мм с нагревом до 300...500°С.

Заготовки для единичного и мелкосерийного производства изготавливают, как правило, из прутка и свободной ковкой.

При серийном производстве колес сложной конфигурации, а также при крупносерийном производстве одновенцовых колес с одной ступицей, заготовки получают на молотах в подкладных штампах. Припуск на последующую механическую обработку составляет не менее 3...4 мм на сторону. В крупносерийном и массовом производствах такие же заготовки изготавливают на кривошипном ковочном прессе и штамповочном молоте в закрытых штампах, что обеспечивает большую точность и более высокое качество поверхностей.

Центральное отверстие диаметром до 25 мм в большинстве случаев не прошивается, а при диаметре более 25 мм - прошивается.

Процесс получения поковок на кривошипных штамповочных прессах с усилием 1000...1500 т является более прогрессивным, чем штамповка на молотах, так как обеспечивает повышение производительности в 1,5-2 раза, уменьшение штамповочных уклонов с 7...9 ° до 2...4 °; снижение расхода металла составляет 10...12 % за счет уменьшения припусков на 30...40 %.

Весьма производительным процессом получения заготовок с допуском на диаметр  $\pm(0,5...1,0)$  мм является горячая высадка на многопозиционных автоматах.

При штамповке на кривошипных прессах, горизонтально-ковочных машинах, прессах двойного действия, прессах для холодного и полугорячего выдавливания можно получать заготовки с зубьями с припуском на сторону, равным 0,1...0,3 модуля.

Холодному формованию подвергают заготовки диаметром до 80 мм.

К наиболее точным и производительным способам получения заготовок с зубьями относится накатка на специальных станках. Она может выполняться с нагревом или без него. Нагрев наиболее часто проводится с помощью индукционных устройств. Заготовки, полученные путем деформирования из твердого материала, как правило, подвергают термиче-

ской обработке для снятия напряжений и улучшения обрабатываемости. После термической обработки заготовки очищают от окалины на дробеструйной или гидроабразивной установках или травлением в растворе серной кислоты с последующим промыванием в горячей воде, а затем контролируют их твердость.

Коэффициент использования металла при изготовлении цилиндрических колес из ступчатых штампованных заготовок составляет 0,4-0,95.

В единичном и мелкосерийном производствах иногда изготавливают заготовки из листового материала путем электроэрозионной резки, плазменного раскроя и других методов. Тонколистовой материал позволяет применять холодную штамповку - вырубку в крупносерийном и массовом производствах.

Заготовки крупных колес и колес средних размеров сложной конфигурации из стали, а также колес из цветных металлов и чугунов целесообразно получать из жидкого материала методом центробежного литья, при котором достигается хорошее заполнение формы.

Порошкообразные и гранулированные пластмассы могут преобразовываться в заготовки с зубьями или без таковых литьем на термопласт-автоматах.

Порошкообразные металлические смеси позволяют получать заготовки путем прессования со спеканием в закрытых штампах с последующей динамической калибровкой. Это обеспечивает коэффициент использования материалов до 0,8...0,98.

Механическая обработка заготовок до нарезания зубьев проводится по аналогии с обработкой соответствующих деталей маши-

ностроения. Крутые колеса, имеющие замкнутую делительную поверхность, обрабатываются как обычные тела вращения; некруглые или секторные - как кулачки и фасонные поверхности. Такой же подход к операциям сварки, пайки, склеивания и сборки.

Особенность обработки заготовок колес с предварительно отформованными зубьями состоит в том, что обработка прерывистых поверхностей по вертикали и торцовым частям зубьев обеспечивается, как правило, шлифованием вместо обычной лезвийной обработки. На механическую обработку заготовки должны поступать после соответствующей термической обработки, а также контроля их физико-механических свойств и геометрических размеров.

Требуемая точность обработки базовых поверхностей под нарезание зубьев зависит от типа применяемых установочно-зажимных приспособлений, габаритных размеров колеса и его точности, а также точности и жесткости применяемого в последующем зубообрабатывающего оборудования.

Точность изготовления поверхностей, ограничивающих вершины зубьев, а также линейных размеров заготовок, определяется функциональным и технологическим назначением поверхностей.

Ориентировочные численные значения допусков на диаметры отверстия и шейки вала зубчатых колес приведены в табл. 5.4.1.

Допускаемое биение базового торца  $E_T = 0,5(d/b)E_\beta$ , где  $d$  - диаметр базовой поверхности колеса;  $b$  - ширина зубчатого венца;  $E_\beta$  - допуск на отклонение направления зуба.

#### 5.4.1. Допуски (в мкм) на диаметры отверстия и шейки вала заготовок зубчатых колес

Степень точности зубчатого колеса (ГОСТ 1643)	Обозначение полей допусков по ГОСТ 25347-82	Диаметр отверстия или шейки вала, мм						
		До 10	Св. 10 до 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 120	Св. 120 до 180
3	H3	2,5	3	4	4	5	6	8
	h3	2,5	3	4	4	5	6	8
4	H4	4	5	6	7	8	10	12
	h4	4	5	6	7	8	10	12
5	H5	6	8	9	11	13	15	18
	h5	6	8	9	11	13	15	18
6	H6	9	11	13	16	19	22	25
	h6	6	8	9	11	13	15	18

Продолжение табл. 5.4.1

7	H7	15	18	21	25	30	35	40
	h6	9	11	13	16	19	22	25
8	H7	15	18	21	25	30	35	40
	h6	9	11	13	16	19	22	25
9	H8	22	27	33	39	46	54	63
	h7	15	18	21	25	30	35	40
10	H8	22	27	33	39	46	54	63
	h7	15	18	21	25	30	35	40

Примечание. Предельные отклонения, мм, для отверстий +Н, для шеек валов -h.

Отклонение от параллельности базовых торцов и допуски на взаимное биение посадочных шеек валов-шестерен рекомендуется принимать равным  $0,5(l/b)E_p$ , где  $l$  - расстояние между серединами шеек валов-шестерен.

Для зубчатых колес больших размеров, у которых при зубообработке проверяют биение вершин зубьев, радиальное биение окружности выступов должно быть не более  $0,6E_r$ , где  $E_r$  - допуск на радиальное биение зубчатого венца.

Уточненные значения допусков рассчитывают на основе решения задачи по расчету звеньев размерных цепей.

#### 5.4.2. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНОЛОГИЮ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Особенности влияния типа конструкции колеса на характер технологического процесса приведены в табл. 5.4.2, а на возможность применения методов зубообработки - в табл. 5.4.3.

#### 5.4.2. Характеристики технологического процесса в зависимости от типа и конструкции колеса

Тип колеса	Характеристика
Валы-шестерни: а - двухсторонние; б - односторонние	Заготовку на операциях устанавливают в центрах или (при зубообработке) в люнетах, на рабочих шейках
Шестерни насадные (с малым числом зубьев): а - с цилиндрическим отверстием; б - с коническим отверстием	Заготовку на основных операциях устанавливают в центрах или (при зубообработке) в приспособлениях
Колеса насадные: а - со ступицей; б - с шейками; в - плоские	Заготовку на основных операциях устанавливают в патроне, а на чистовых операциях (в том числе зубообработке) - на оправке или в приспособлениях
Колеса сборные: а - составные; б - венцовые	Ступицы и венцовые колеса обрабатывают отдельно, а затем дорабатывают колесо в сборе. Заготовку на основных операциях (в том числе зубообработка) устанавливают в приспособлениях, а также в патроне (на токарных операциях)
Колеса бандажированные, клесные	Бандаж монтируют на ступице, выполняют с наименьшим допуском 7 или 8 качества. Чистовую обработку заготовки и зубонарезание ведут так же, как и цельных колес
Колеса сварные	Черновая зубообработка выполняется после сварки колеса, чистовая - после насадки колеса на вал и чистовой обработки базовых поверхностей

### 5.4.3. Методы зубообработки в зависимости от типа и конструкции венца

Тип венца	Характеристика
Открытые венцы (свободный выход инструмента)	Нарезание и отделка зубьев возможна любым методом и инструментом на станках всех типов. Наиболее технологичная конструкция зубчатого колеса
Врезные венцы (валы-шестерни)	Нарезание возможно только фрезерованием. Обработка двухсторонних венцов возможна только при радиальном врезании инструмента. Шлифование профиля зубьев возможно при радиусе инструмента более 75 мм
Закрытые венцы (с буртом или фланцем, блочные шестерни)	Нарезание зубьев возможно только долблением или строганием гребенками, а также фрезерованием пальцевыми фрезами

В случае назначения высокой точности колеса его конструкция должна предусматривать возможность отделочной обработки лезвийным твердосплавным инструментом или шлифовальным кругом.

Крупногабаритные колеса должны быть такими, чтобы обеспечивалась возможность одновременной обработки основных и вспомогательных поверхностей заготовок, в том числе технологических и измерительных баз. Базовые поверхности должны иметь возможность обработки после монтажа.

При крупносерийном и массовом производствах рациональна конструкция колес с открытыми венцами.

Информация, задаваемая условными обозначениями на чертежах зубчатых колес, часто является неполной, чтобы с достаточной точностью однозначно воспроизвести геометрию венца для его качественного зацепления с сопрягаемым колесом. Поэтому часть информации может задаваться на сборном чертеже и в технических требованиях на продукцию. Она также должна учитываться при разработке технологического процесса.

#### 5.4.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

При разработке технологического маршрута изготовления зубчатых колес в зависимости:

от габаритов зубчатого колеса и объемов в производстве определяют тип исходной заготовки (пруток, поковка, отливка и т.п.);

от формы зубчатого колеса и венца устанавливают возможные методы его обработки (см. табл. 5.4.3);

от заданной точности зубчатого колеса, его материала и характера химико-термической обработки определяют состав операций обработки зубьев и отделки зубчатого колеса после термической обработки;

от требований чертежа устанавливается характер и содержание отдельных операций.

Основные технологические маршруты обработки зубьев зубчатых колес (без операций по подготовке заготовки и зубонарезанию, по снятию цементованного слоя, зубозакругляющих, слесарных операций, по обработке поверхностей, а также не связанных с венцом) приведены в виде граф-дерева (рис. 5.4.1).

Маршрут обработки зубчатых колес выбирают, исходя из возможности обеспечения заданной точности и производительности, с минимальным количеством операций. При этом учитывается, что для зубчатых колес с твердостью зубьев до 40 HRC при зубоотделочной операции могут применяться лезвийные инструменты, изготовленные из быстрорежущих сталей. Для более высокой твердости применимы твердосплавные и абразивные инструменты.

На поверхностях, которые не должны быть подвергнуты цементации и которые не могут быть защищены предохраняющими покрытиями, оставляют специальные защитные припуски, удаляемые между цементацией и закалкой. Соединительные поверхности, в том числе шлицевые (особенно с эвольвентным и остроугольным профилем), точные резьбы, отверстия и шпоночные пазы обрабатывают окончательно после термической обработки.

При изготовлении сборных (составных) и сварных колес предпочтительна обработка зубьев после сборки венцового колеса на ступице или сборки сварного колеса с валом.

При изготовлении колес высокой точности (св. 6-й степени) с последующей зубоотделочной обработкой после черновых операций желательно проводить промежуточную термообработку для снятия внутренних напряжений.

При азотировании поверхностей зубьев осуществляется термическая стабилизация заготовки после чернового нарезания.

Типовые технологические маршруты обработки зубчатых колес различных видов приведены в табл. 5.4.4-5.4.6.



**5.4.4. Типовой технологический маршрут обработки цилиндрических зубчатых колес типа вал и типа диск из прутковых заготовок средней точности**

№ операций	Технологические операции	Применяемое оборудование		Примечание
		Массовое производство	Серийное производство	
1	Сверление отверстия; подрезание торца; расточивание выемок в отверстиях и торцах; обтачивание снаружи; развертывание отверстия (при необходимости); отрезание заготовки	Многошпиндельный токарный автомат	Револьверно-токарный станок. Токарный обрабатывающий центр	Заготовка устанавливается в цанге или на оправке
2 2а	Протягивание отверстия и шлицев Протягивание шпоночной канавки	Протяжной станок		-
3	Чистовое обтачивание и подрезание торцов	Токарный автомат или полуавтомат	Токарный станок с ЧПУ	-
4	Круговое протягивание зубьев	Специальный автомат или полуавтомат для кругового протягивания	-	Для открытых венцов
5	Фрезерование зубьев	Производственный зубофрезерный станок	Зубофрезерный полуавтомат	Для открытых врезных венцов
6	Шлифование наружного диаметра (при необходимости)	Круглошлифовальный автомат или полуавтомат	Круглошлифовальный станок	-
7	Закругление зубьев	Зубозакругляющий станок		-
8	Термическая обработка	Цементационный и закалочный агрегаты или установки для закалки токами высокой частоты		-
9	Шлифование отверстий	Внутришлифовальный полуавтомат	Внутришлифовальный станок	Базирование по зубьям
10	Калибрование шлицев прошивкой (при необходимости)	Вертикальный пресс		-
11	Шлифование зубьев (при необходимости и возможности)	Зубошлифовальный станок, работающий червячным или профильным кругом	Зубошлифовальный станок, работающий червячным, конусным или тарельчатым кругом	-
12	Контроль	Контрольно-испытательное оборудование		-

**5.4.5. Типовой технологический маршрут обработки высокоточных цилиндрических зубчатых колес типа диск из штампованных и прессованных заготовок**

№ операций	Технологическая операция	Применяемое оборудование	
		Массовое производство	Серийное производство
1	Сверление отверстий и подрезание торца, то же и обтачивание по наружному периметру; растачивание отверстий (по необходимости)	Специальный вертикально-сверлильный станок; многошпиндельный патронный полуавтомат	Токарно-револьверный станок с ЧПУ
2	Протягивание отверстия и шлицев	Протяжной станок	
3	Черновое (при необходимости) и чистовое обтачивание и подрезание торцов	Многорезцовый полуавтомат	Токарный станок с ЧПУ
4	Шлифование базовых торцов	Специальный шлифовальный автомат или полуавтомат	Круглошлифовальный станок
4а	Предварительное и чистовое нарезание зубьев	См. табл. 5.4.4 операции 4 и 5	
4б	Долбление зубьев*	Спиральный автомат (полуавтомат) для контурного или обычного зубодолбления	Полуавтомат для обычного зубодолбления
5	Шевингование зубьев	Шевинговальный полуавтомат	
6	Закругление зубьев	Зубозакругляющий станок	
7	Термическая обработка	Цементационный и закалочный агрегаты или установки для закалки токами высокой частоты	
8	Шлифование отверстия**	Внутришлифовальный полуавтомат	Внутришлифовальный станок
9	Зубохонингование зубьев	Зубохонинговальный полуавтомат	
10	Контроль	Контрольно-испытательное оборудование	
11	Шлифование торцов в размер по длине	Плоскошлифовальный станок с круглым столом	Круглошлифовальный станок

\* Для закрытых венцов и венцов внутреннего зацепления

\*\* Базирование по зубьям

**5.4.6. Типовой технологический маршрут обработки цементованных конических колес типа диск с предварительно отформованными зубьями**

№ операции	Технологическая операция	Применяемое оборудование
1	Обтачивание внутреннего и внешнего торцов. Растачивание и развертывание отверстия. Сверление крепежных отверстий	Токарный вертикальный двухиндексный восьмишпиндельный полуавтомат
2	Операционный контроль припуска под зубонарезание	Контрольное приспособление
3	Обтачивание конуса вершин зубьев, заднего конуса, переднего торца и выточки	Токарный вертикальный восьмишпиндельный полуавтомат
4	Зенкерование фасок и крепежных отверстий одновременно	Сверлильный станок
5	Снятие перемычек во впадинах зубьев на внешнем торце	Зубофасочный станок
6	Шлифование внутреннего торца	Внутришлифовальный полуавтомат
7	Операционный контроль базовых поверхностей и зубьев	Контрольные приборы
8	Черновое нарезание зубьев методом врезания	Зуборезный полуавтомат
9	Операционный контроль припуска	Контрольное приспособление
10	Чистовое нарезание зубьев методом обкатки	Зуборезный полуавтомат
11	Операционный контроль	Контрольно-обкатной станок
12	Маркирование товарного знака и порядкового номера колеса	Специальное приспособление
13	Промывка	Моечный агрегат
14	Термическая обработка. Газовая цементация и закалка	Цементационно-закалочный агрегат
15	Операционный контроль твердости, размеров отверстия, плоскостности базового торца	Измерительные приборы
16	Шлифование отверстий	Внутришлифовальный полуавтомат
17	Подбор колес пары по боковому зазору, пятну контакта и уровню шума	Контрольно-обкатной станок
18	Притирка подобранного комплекта	Притирочный станок
19	Промывка притертого комплекта	Моечный автомат
20	Приемочный контроль	Контрольно-обкатной станок, измерительные приборы
21	Фасфатирование комплекта (при необходимости)	Специальный агрегат

## 5.4.7. Варианты зубообработки червяков и червячных колес

Межосевое расстояние в передаче	Производство		
	Единичное и мелкосерийное	Среднесерийное	Массовое
До 250 мм	<b>Червяк</b>		
	<b>Черновая зубообработка</b>		
	Фрезерование дисковой фрезой	Вихревое зуботочение (фрезерование)	Горячее накатывание
	Нарезание профильным инструментом	Обработка дисковой фрезой или долбяком	Вихревое зуботочение (фрезерование)
Св. 250 мм	<b>Чистовая зубообработка</b>		
	Нарезание профильным инструментом (при 40 HRC), шлифование (при 40 HRC)	Холодное накатывание. Шлифование	
	<b>Черновая зубообработка</b>		
	Фрезерование дисковой или пальцевой фрезой		-
Любое	<b>Червячное колесо</b>		
	Нарезание профильным инструментом		-
	<b>Чистовая зубообработка</b>		
	Нарезание профильным инструментом, шлифованием		-
Любое	Фрезерование червячной фрезой	Фрезерование червячной фрезой	-
	Нарезание фрезой-летучкой		

## 5.4.8. Варианты зубообработки червяков и колес глобидных передач

Межосевое расстояние	Производство		
	Единичное и мелкосерийное	Среднесерийное	Массовое
До 250 мм	<b>Червяк</b>		
	Нарезание трехрезцовой головкой	Нарезание многорезцовой головкой	Нарезание специальными многорезцовыми головками (долбяками)
	Нарезание универсальной резцовой головкой		
Св. 250 мм	<b>Колесо</b>		
	Черновое фрезерование пальцевой или дисковой фрезой		-
	Чистовое нарезание резцовой головкой	Черновое и чистовое нарезание трехрезцовой головкой	
До 250 мм	Нарезание фрезой-летучкой		Фрезерование глобидной фрезой
Св. 250 мм	Нарезание фрезой-летучкой		-

#### 5.4.9. Способы повышения производительности технологических систем и основные мероприятия по их реализации

Прием	Объект	Сущность способа	Основные мероприятия, реализующие способ
Исключение	Простои	Исключение простоев	Переход к непрерывным процессам зубообработки
	Вспомогательные действия	Исключение вспомогательных действий	Выбор рациональных способов непрерывного действия. Переход к поточным технологиям
Уменьшение	Простои	Уменьшение простоев	Повышение надежности оборудования, инструментов и приспособлений. Своевременное снабжение материально-энергетическими ресурсами и информацией
	Вспомогательные действия	Сокращение длительности вспомогательных действий (интенсификация вспомогательных действий + оптимизация объема работ и траекторий нерабочих ходов)	Повышение быстродействия механизмов, агрегатов и устройств, реализующих вспомогательные действия. Минимизация объемов работ, сокращение траекторий на участках, соответствующих нерабочим ходам
	Основные действия	Сокращение длительности основных действий (интенсификация основных действий + оптимизация объемов работ и траекторий рабочих ходов)	Повышение быстродействия, жесткости и виброустойчивости механизмов технологической системы. Оптимизация геометрических, кинематических, динамических и прочностных свойств технологической системы и среды. Адаптация режимов обработки. Уменьшение исходных объемов работ, в том числе за счет уменьшения припусков. Выбор замкнутых рабочих траекторий с минимальной кривизной для инструментов. Выбор разомкнутых рабочих траекторий с оптимальными характеристиками для деталей.
Совмещение	Простои	Совмещение простоев	Оптимизация циклов работ оборудования
	Вспомогательные действия	Совмещение вспомогательных действий	Переход к одновременному выполнению всех вспомогательных функций
	Основные действия	Совмещение основных действий	Повышение уровня концентрации технологического воздействия

Гибкие производственные системы включают в себя роботизированные технологические комплексы, станки-автоматы с ЧПУ, гибкие производственные модули, многоцелевые станки с автоматической загрузкой и автоматической сменой инструмента и другое оборудование. Предусматривается автоматический контроль работы всей системы.

Реализованы гибкие производственные системы для обработки цилиндрических зубчатых колес с использованием зубофрезерных, зубодолбежных, зубошвинговальных и зубошлифовальных станков.

#### 5.4.4. КОНТРОЛЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Контроль зубчатых колес проводится по комплексам контроля, предусмотренным ГОСТ 1643 - для цилиндрических зубчатых передач и колес, ГОСТ 1758 и ГОСТ 9368 - для конических и гипоидных передач и колес, ГОСТ 3675 - для цилиндрических червячных передач и червячных пар, ГОСТ 16502 - для глобоидных червяков колес, передач и пар.

Контроль зубчатых колес других видов и типов проводится по отраслевым или иным нормативным документам.

В комплексах контроля оценка кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и бокового зазора предусмотрена по различным равноправным показателям.

Показатели точности для цилиндрических зубчатых колес приведены в табл. 5.4.10. Аналогичные показатели существуют и для других видов колес.

При изготовлении зубчатых колес обычно принимают контроль трех видов: профи-

лактический, производственный и приемочный.

Профилактический контроль проводят до начала зубообработки по всей системе «станок - приспособление - инструмент - заготовка».

Производственный контроль проводится на стадии зубообработки и предусматривает воздействие на составляющие технологического процесса при обнаружении каких-либо отклонений в обрабатываемой детали. Приемочный контроль выполняют по окончании изготовления партии деталей, либо каждой детали, или же выборочно, через установленный интервал.

Комплексы показателей, проверяемых при приемочном контроле, устанавливают изготовители зубчатых колес.

При выборе комплексов контроля руководствуются следующим.

1. Предпочтение отдают функциональным показателям (пятно контакта).

2. Предпочтительно использование методов контроля, обеспечивающих непрерывность процесса измерений.

3. При окончательном контроле для оценки колеса как элемента будущей передачи измерения необходимо выполнять от рабочей (монтажной) базы.

4. В налаженном производстве контроль может быть ограничен контролем по межосевому расстоянию при двухпрофильном зацеплении с измерительным колесом.

Основные технические требования к приборам для измерения зубчатых колес нормируются ГОСТами.

#### 5.4.10. Комплексы контроля, предусмотренные в ГОСТ 1643 для цилиндрических зубчатых передач и колес

Нормируемый параметр	Степень точности колес и передач	Размеры колеса, мм, не более
<b>Нормы кинематической точности</b>		
Наибольшая кинематическая погрешность зубчатого колеса	3-8	6300
Накопленная погрешность шага зубчатого колеса	3-6	4584
Накопленная погрешность шагов зубчатого колеса		7200
Накопленная погрешность шага зубчатого колеса	7-8	4584
Погрешность обката. Радиальное биение зубчатого венца	3-8	6300
Колебание длины общей нормали. Радиальное биение зубчатого венца	3-8	1600
Колебание длины общей нормали. Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса	5-8	1600

Продолжение табл. 5.4.10

Погрешность обката. Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса	5-8	1600
Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса	9-12	1600
Радиальное биение зубчатого венца	7-12	6300
Наибольшая кинематическая погрешность передачи	3-8	6300
<b>Нормы плавности работы</b>		
Местная кинематическая погрешность зубчатого колеса	3-8	6300
Циклическая погрешность зубцовой частоты зубчатого колеса	3-8	6300
Отклонение шага зацепления. Погрешность профиля	3-8	6300
Отклонение шага зацепления. Отклонение шага	3-8	6300
Колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе	5-12	1600
Местная кинематическая погрешность передачи	3-8	6300
Циклическая погрешность зубцовой частоты в передаче	3-8	6300
Отклонение шага зацепления	9-12	6300
Отклонение шага	9-12	6300
Колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе	9-12	6300
Циклическая погрешность зубчатого колеса	3-8	6300
Отклонение шага	7-8	6300
Циклическая погрешность зубцовой частоты в передаче	3-8	6300
<b>Нормы контакта зубьев</b>		
Отклонение направления зуба	3-12	1250
Суммарная погрешность контактной линии	3-12	1250
Отклонение осевых шагов по нормали. Суммарная погрешность контактной линии	3-9	1250
Отклонение осевых шагов по нормали. Отклонение шага зацепления	3-9	1250
Отклонение от параллельности осей	3-12	1250
Суммарное пятно контакта	3-11	1250
Мгновенное пятно контакта	3-11	1250
<b>Нормы бокового зазора</b>		
Смещение исходного контура	3-12	6300
Отклонение межосевого расстояния	3-12	4000
Отклонение средней длины общей нормали	3-12	1600
Отклонение длины общей нормали	3-12	1600
Отклонение толщины зуба	3-12	6300

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубчатые передачи:** Справочник / Е.Г. Гинзбург, Н.Ф. Голованов, Н.Б. Фирун и др.; Под ред. Е.Г. Гинзбурга. М.: Машиностроение. 1980. 415 с.

2. **Калашников С.Н., Калашников А.С.** Изготовление зубчатых колес. М.: Высшая школа. 1986. 287 с.

3. **Мазуренко Ю.П.** Холодное накатывание зубчатых венцов цилиндрических колес. Львов: Вища школа. 1980. 228 с.

4. **Пономарев В.П.** Оптимизация процессов механической обработки цементованных зубчатых колес. Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство. 1974. 226 с.

5. **Производство зубчатых колес:** Справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган и др.; Под общей ред. Б.А. Тайца. 3-е издание, переработанное и дополненное. М.: Машиностроение. 1990. 464 с.

6. **Федотенок А.А.** Кинематические структуры металлорежущих станков. М.: Машиностроение. 1979. 346 с.

## Глава 5.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ5.5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ  
ЖЕСТКОСТИ, ДОМИНИРУЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ  
И ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ

В машиностроении имеется большое количество деталей малой жесткости, при обработке которых (без применения специальных методов, оборудования и технологической оснастки) возникают деформации и вибрации, приводящие к погрешностям, соизмеримым с допуском на изготовление деталей.

*Основные типы деталей малой жесткости:*

- 1) длинные планки различной конструкции;
- 2) тонкие плиты и пластины;
- 3) тонкие диски и круглые пластины;
- 4) длинные валы, шпиндели, стержни;
- 5) закрученные детали типа стержней и пластин;
- 6) коленчатые валы;
- 7) тонкостенные цилиндры, кольца, втулки, вкладыши подшипников;
- 8) зубчатые колеса и зубчатые муфты с тонким ободом;
- 9) корпусные детали с тонкими стенками, детали коробчатой формы.

Для маложестких деталей погрешности от их технологических деформаций являются доминирующими в суммарной погрешности

обработки. Они могут возникать под действием усилий закрепления, сил резания (обработки), изменения напряженного состояния заготовки (детали) в процессе обработки, массы заготовки, сил инерции, вибрации, дисбаланса заготовки. Деформации могут быть упругими (исчезающими после снятия внешней нагрузки) и остаточными.

*Основные виды технологических деформаций:*

- 1) изгиб: а) однонаправленный по всей поверхности; б) разнонаправленный на отдельных участках поверхности и в разных сечениях детали;
- 2) кручение (равномерное, неравномерное);
- 3) изменение линейных размеров: а) изменение длины (удлинение, укорочение, изменение расстояния между отверстиями, пазами, шага резьбы и т.п.); б) изменение размеров и формы поперечного сечения (изменение диаметральных размеров, образование конусообразности, седлообразности, бочкообразности, изменение формы отверстий - отклонение от круглости и т.п.).

При обработке конкретных заготовок превалирует, как правило, один из перечисленных видов деформаций. Для плоских деталей и длинных стержней определяющими являются изгибные деформации; у тонких втулок и колец в основном происходят изменения диаметральных размеров и отклонения от цилиндричности. Наблюдается одновременное проявление нескольких видов деформаций: изгиб с кручением, изгиб с изменением линейных размеров и др. Такие случаи наиболее сложны. Для разработки эффективных мер снижения деформаций требуется тщательный анализ силового поля и напряженно-деформированного состояния заготовок на основных этапах изготовления.

Технологические деформации условно можно разделить на три вида:

- 1) систематические постоянные (например, в результате закрепления заготовки);
- 2) систематические, закономерно изменяющиеся (например, в результате перемещения точки приложения сил резания и уменьшения жесткости заготовки в процессе удаления припуска, износа инструмента и др.);
- 3) случайные (в результате колебания механических свойств заготовки, припуска на обработку, остаточных напряжений в заготовке и др.).

Проектирование технологического процесса обработки маложестких деталей необходимо начинать с отработки конструкции детали на технологичность, заключающейся в нахождении таких геометрических форм, марок материалов и термообработки, которые

придают детали максимальную жесткость и конструктивными мерами обеспечивают обработку детали прогрессивными технологическими процессами.

Особые требования предъявляются к заготовкам маложестких деталей, к способам их производства. Припуски под их чистовую обработку должны быть минимально возможными и распределенными с учетом технологических упругих и остаточных деформаций. Для этого используются заготовки с минимальной шероховатостью и дефектностью поверхностного слоя, с малой удельной изогнутостью; термообработку заготовок проводят в напряженном (сжатом или растянутом) состоянии, в защитной среде или в вакууме.

Измерительные средства для контроля маложестких деталей должны иметь малые силы воздействия на деталь.

Рекомендации по высокопроизводительной обработке заготовок малой жесткости:

1) применять малонагруженные технологические процессы с равномерно распределенными силами резания и крепления (химическую, электрохимическую, электрофизическую обработку, магнитоабразивную, гидроабразивную, виброабразивную, ультразвуковую обработку, тонкое точение, фрезерование, бесцентровое шлифование и др.);

2) уменьшать упругие деформации заготовок высокоскоростным деформированием, совмещением их продольных осей с направлением волокон материала, устранением коробления перед раскроем, назначением симметричных форм заготовок замкнутого контура для изготовления деталей незамкнутого контура, вытачиванием из групповой заготовки серии близких по размерам тонкостенных колец, симметричным термонагружением при старении с термофиксацией заготовок после обдирочных операций, нормализацией заготовок перед многооперационной чистовой обработкой, одновременным снятием равномерных припусков с противоположных поверхностей симметричных заготовок;

3) выбирать способы установки с учетом отклонения от соосности базовой и обрабатываемой поверхностей круглых деталей, рассчитываемой по следующим формулам:

при установке заготовки в трехлапчатом патроне и плунжерных оправках

$$e = a_1 \sqrt{\delta_D} (1 + 0,2l_{II}),$$

где  $e$  - эксцентриситет между базовой и обрабатываемой поверхностями;  $a_1$  - коэффициент, зависящий от категории установки и приспособления по точности (при нормальной точности  $a_1 = 0,17$ , повышенной  $a_1 = 0,11$ ,

высокой  $a_1 = 0,08$ );  $\delta_D$  - допуск на диаметр базирующей поверхности;  $l_{II}$  - расстояние от торца патрона или оправки до наиболее удаленной точки приложения силы резания;

при установке в цапговых патронах и оправках

$$e = a_2 \sqrt{\delta_D} (1 + 0,01l_{II}),$$

где  $a_2 = 0,12$  коэффициент при нормальной точности;  $a_2 = 0,09$  при повышенной;

$a_2 = 0,06$  при высокой точности установки детали и изготовления приспособления;

4) предусматривать при выполнении данной операции полное удаление погрешностей поверхностных слоев и формы заготовки, оставшихся после предыдущей операции. Для этого операционный припуск тел вращения должен быть

$$Pi_{i \min} = 2 \left[ (Rz + K)_{i-1} + \sqrt{\delta_{и}^2 + \delta_i^2} \right],$$

где  $Rz$  - высота микронеровностей поверхностного слоя заготовки;  $K$  - глубина дефектного слоя;  $\delta_{и}$  - смещение оси заготовки в расчетном сечении за счет изогнутости;  $\delta_i$  - отклонение от соосности поверхности, обусловленное влиянием погрешности установки, базирования и закрепления, возникающих на предшествующей и выполняемой операциях. В случае применения правки  $\delta_{и} = 0$ ;

5) назначать опорной базой элементы заготовки, имеющие максимальные моменты инерции сечений, и поверхности с наименьшим отклонением от плоскостности и наименьшей шероховатостью; преимущественно нагружать эти элементы нормально распределенными силами крепления и резания;

6) армировать неустойчивые и вибрирующие элементы заготовок технологическими наполнителями (мочевинной, резиновыми пробками, кольцами, различными пружинными вкладышами), применять виброгасители, люнеты;

7) оснащать технологические процессы магнитными, электромагнитными, электростатическими, вакуумными приспособлениями, обладающими быстродействующим приводом и равномерно распределенной нагрузкой притяжения;

8) строго регламентировать податливость стыков заготовок с приспособлениями и узлов металлорежущего оборудования;

9) выполнять получистовые и окончательные операции со строго регламентиро-

ванными режимами резания на станках повышенной и высокой точности без перебазиrowания и перезакрепления заготовки;

10) интенсифицировать рассеяние тепловых потоков из зоны резания увеличением площади и толщины опорных элементов оснастки и изготовлением их из высокотеплопроводных материалов.

*Основные принципы выбора конструкции оснастки:*

1) для крепления нежестких заготовок высокой точности рекомендуется конструкция оснастки с установочно-зажимными механизмами, имеющими объемные, плоскостные, линейно-плоскостные и линейные контакты;

2) наиболее полно условию исключения контактных деформаций заготовок отвечают установочно-зажимные механизмы с объемным контактом, так как одновременно обеспечивают крепление, технологическое армирование и виброгашение заготовок деталей;

3) установочно-зажимные механизмы с точечными контактами следует применять лишь в тех случаях, когда силы резания малы, а возникающие от деформаций погрешности детали значительно меньше допустимых отклонений;

4) наиболее равномерное и стабильное давление в контактируемых поверхностях развивается в объемных, электростатических, магнитных, электромагнитных и вакуумных механизмах зажима. Наименьшее вспомогательное время затрачивается на электромагнитное крепление, наибольшее - на электростатическое;

5) объемный контакт превышает другие по прочности крепления заготовок. Один из недостатков установочно-зажимных механизмов с объемным контактом - длительный и трудоемкий процесс закрепления заготовок армирующим веществом, его загрузки в приспособление и последующего удаления. Вспомогательное время часто превышает машинное. Армирующие способы эффективно применяются для одновременного крепления и армирования сечения нескольких заготовок нежестких деталей или заготовок деталей больших габаритов;

6) рационально выбирать многопозиционные конструкции оснастки для последовательного выполнения на одной установке нескольких операций на одной заготовке либо многоместную оснастку для параллельной одновременной обработки нескольких заготовок.

#### 5.5.2. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УПРУГИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

При обработке заготовок маложестких деталей высокой точности критерием силового нагружения служат погрешности формы и размеров, вызванные нежесткостью конструкции, схемой установки и зажима заготовки.

При обработке заготовок валов под действием силы резания  $P_y$  возникает упругий прогиб, который для ступенчатого вала (рис. 5.5.1) рассчитывают по формуле

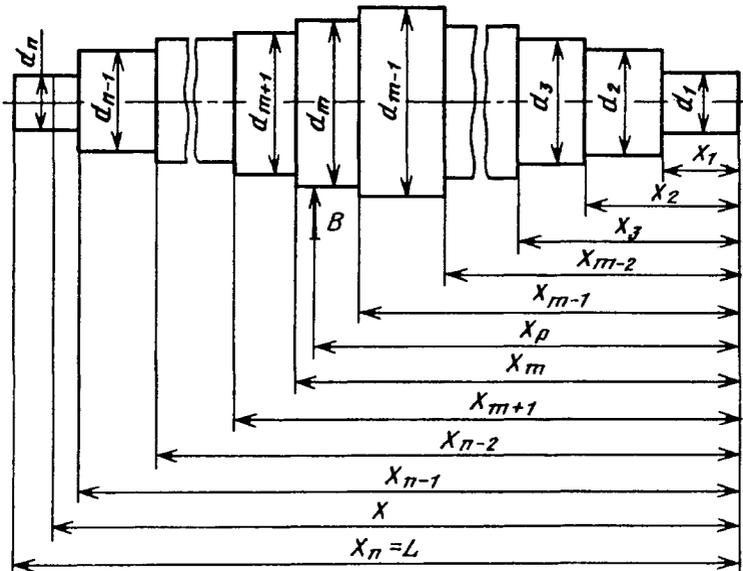


Рис. 5.5.1. Схема ступенчатого вала

$$f_p = \frac{P_y L^3}{0,15 E} \left\{ \left( 1 - \frac{X_p}{L} \right)^2 \left[ \sum_{j=1}^{m-1} \frac{X_j^3}{L^3} \left( \frac{1}{d_j^4} - \frac{1}{d_{j+1}^4} \right) + \frac{X_p^2}{L^2 d_m^4} \right] + \left( \frac{X_p}{L} \right)^2 \sum_{j=m}^{n-1} \left( 1 - \frac{X_j}{L} \right)^3 \left( \frac{1}{d_{j+1}^4} - \frac{1}{d_j^4} \right) \right\},$$

где  $L$  - длина вала;  $n$  - число ступеней вала;  $j$  - порядковый номер текущей ступени;  $m$  - порядковый номер ступени вала, к которой в рассматриваемый момент приложена сила  $P_y$ ;  $d_m, d_j, d_{j+1}$  - диаметр соответствующей ступени вала;  $X_p$  - расстояние точки приложения силы  $P_y$  от правого торца вала;  $X_j$  - расстояние конца  $j$ -й ступени вала от правого торца;  $E$  - модуль упругости материала вала.

При обработке заготовки гладкого вала

$$f_p = -\frac{P_y L^3}{0,15 E} (1 - \bar{X})^2 \bar{X}^2 \frac{1}{d_1^4},$$

где  $d_i = d - \bar{X}(d - d_1) = d - 2t\bar{X}$ ;  $d$  - диаметр заготовки;  $d_1$  - диаметр детали;  $t$  - припуск на обработку;  $\bar{X} = X_p / L$ .

В результате упругой деформации заготовки вала под действием силы резания деталь приобретает бочкообразную форму. Упругая деформация вала малой жесткости, обработанного без учета его жесткости, составляет 80...90 % суммарной погрешности формы вала в продольном сечении.

*Для снижения погрешностей от упругих деформаций технологической системы (станок - приспособление - инструмент - заготовка) используются следующие методы и средства:*

1) при obtачивании заготовок валов малой жесткости образующая спрямляется снижением жесткости задней бабки (например, выдвиганием пиноли);

2) преднамеренное изменение исходного положения элементов технологической системы, в частности, сдвиг задней бабки в поперечном направлении для частичной компенсации искаженной формы вала в продольном сечении;

3) предсказание формы копира или управляющей программы при обработке на станках с ЧПУ. Траектория движения резца должна представлять собой не прямую, а вогнутую линию, которая является зеркальным отражением выпуклой образующей обточен-

ного вала, возникающей вследствие упругой деформации заготовки вала;

4) обработка с непрерывно изменяющейся подачей в зависимости от жесткости технологической системы по такому закону, чтобы упругие деформации были постоянны;

5) уменьшение силы  $P_y$ , применение резцов с углом  $\varphi = 90^\circ$ ;

6) применение подвижных и неподвижных люнетов;

7) многорезцовая обработка со взаимной компенсацией сил резания;

8) управление упругими деформациями приложением внешних изгибающих моментов;

9) обработка заготовки с продольным растяжением.

При обработке по второму способу задняя опора смещается на величину разности деформаций в среднем сечении ( $y_{0,5}$ ) и у правого торца ( $y_0$ ):  $y_{3см} = y_{0,5} - y_0$  (рис. 5.5.2).

В таком положении обрабатывается половина заготовки. После поворота обрабатывается вторая половина. Таким приемом уменьшается бочкообразность в 3-4 раза (рис. 5.5.2, а). Смещение задней опоры на величину  $y_{3см} = 2y_{0,5} - y_0$  уменьшает стрелу прогиба в 8 раз. В случае обработки заготовки ступенчатого вала величина смещения определяется выражением

$$y_{3см} = \frac{P_y L^3}{0,075 E} \left\{ (1 - \bar{X})^2 \left[ \sum_{j=1}^{m-1} \frac{X_j^3}{L^3} \left( \frac{1}{d_j^4} - \frac{1}{d_{j+1}^4} \right) + \frac{\bar{X}^2}{d_m^4} \right] + \bar{X}^2 \sum_{j=m}^{n-1} \left( 1 - \frac{X_j}{L} \right)^3 \left( \frac{1}{d_{j+1}^4} - \frac{1}{d_j^4} \right) \right\}.$$

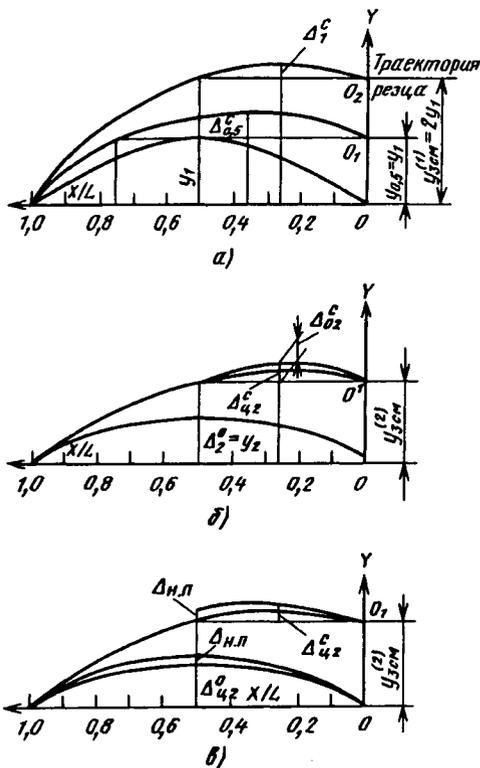
Для гладкого вала  $y_{3см} = \frac{P_y L^3}{1,2 E d_1^4}$ .

Величина смещения задней опоры для обрабатываемого участка произвольной длины ( $L > X > 0$ ) определяется по следующим формулам:

1) длина обрабатываемого участка меньше половины длины вала ( $l_i \leq 0,5L$ ):

$$y_{см\ 0-0,5L} = 2y_{0,5} \left[ 1 + \frac{16(0,5L - l_i)^2 l_i}{L^3} \right];$$

$$y_{0,5} = \frac{P_y L^3}{2,4 E d_1^4};$$



$$\Delta L^c = \left( \frac{l_i}{L} \right)^3 \Delta L^0,$$

где  $\Delta L^0$  - максимальная погрешность формы детали в продольном сечении без преднамеренного смещения;  $l_i$  - длина участка от заднего центра, обработанного с преднамеренным смещением.

Преднамеренное смещение может осуществляться:

- 1) при черновом и чистовом проходе;
- 2) только при чистовом проходе;
- 3) только при черновом проходе.

В первом случае погрешность формы детали в продольном сечении, отнесенная к диаметру, определяется выражением:

$$\Delta d_2^c = \frac{y_2}{4} \left( 1 + \frac{y_1}{8t_2} \right),$$

где  $y_1, y_2$  - упругие деформации заготовки в случае равномерного припуска при черновом и чистовом проходах соответственно;  $t_2$  - глубина резания при чистовом проходе (рис. 5.5.2, б). Второй член в формуле учитывает влияние неравномерности припуска при чистовом проходе. Величина смещения при чистовом проходе  $y_{3см}^{(2)} = 2y_2$ , при черновом проходе  $y_{3см}^{(1)} = 2y_1$ .

При смещении только при чистовом проходе на величину  $y_{3см}^{(2)} = 2y_2$  (рис. 5.5.2, в)

$$\Delta d_2^c = \frac{y_2}{4} (1 + y_1 / y_2).$$

Преднамеренное смещение при черновом проходе наименее эффективно уменьшает погрешности от упругих деформаций заготовки ( $y_{3см}^{(1)} = 2y_1$ ;  $\Delta d_2^c = 2\Delta_2^0$ ).

При смещении на величину  $y_{3см}^{(1)} = 2y_1 + 2(t_2 - t_{0,5})$  распределение припуска по длине заготовки на чистовой проход ( $t_2$ ) будет неравномерным (максимальный - у торцов, 0 - в середине); упругие деформации выравниваются по длине; деталь приобретает практически правильную цилиндрическую форму.

Дополнительный припуск  $t_{0,5}$  на среднюю часть детали определяется выражением

$$Rz_i \leq t_{0,5}/i+1 \leq \frac{t_i}{y_i} \Delta_{i+1}^{доп},$$

Рис. 5.5.2. Схема повышения точности обработки смещением задней опоры:

а - при однопроходной обработке;

б - при черновом и чистовом проходах;

в - только при чистовом проходе;

$\Delta_{н.п}$  - отклонение радиуса вала в результате неравномерности припуска при чистовой

обработке;  $\Delta_{н.п} = \Delta_1^0 \delta$ , где  $\Delta_1^0$  - отклонение

(деформация) вала при черновой обработке;

$\delta$  - коэффициент копирования погрешности

при чистовой обработке;  $\Delta_{y_2}^0$  - упругая

деформация вала при равномерном припуске

(без смещения),  $\Delta_{y_2}^c$  - отклонение профиля вала

при чистовой обработке с равномерным припуском и смещением

- 2) длина обрабатываемого участка больше половины длины вала ( $l_i \geq 0,5L$ ):

$$y_{см0,5L-L} = \frac{P_y(L - l_i)^2 l_i^2}{0,15 E d_i^4}.$$

Максимальная погрешность формы детали с преднамеренным смещением

где  $Rz_i$  - высота неровностей (шероховатости) при черновом проходе (со смещением);  $t_i$  - глубина резания при  $i$ -м проходе;  $y_i$  - упругие деформации при  $i$ -м проходе;  $\Delta d_{i+1}^{доп}$  - допустимое отклонение профиля продольного сечения при чистовом проходе.

Величину преднамеренного смещения задней опоры  $y_{ci}$  и образующуюся погрешность в продольном сечении  $\Delta d_i^c$  с учетом неравномерности припуска для  $i$ -го прохода определяют по формулам (рис. 5.5.3):

$$y_{ci} = 2 \left[ y_i \left( 1 + \frac{\Delta d_{i-1}}{2t_i} \right) + (t_{i+1} - t_{0,5}) \right];$$

$$\Delta d_{i/i-1}^c = \frac{y_{i-1} y_i}{8t_i},$$

где индексы « $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$ » означают: предыдущий, рассматриваемый и последующий проходы.

С учетом припуска  $t_{0,5}$  чистовую обработку можно выполнять за один установ (без поворота заготовки).

Преднамеренное смещение технологической системы осуществляется посредством смещения задней бабки или с помощью регулируемого заднего центра. Путем смещения задней бабки трудно осуществить малые точные перемещения в поперечном направлении; необходимо также учитывать деформации корпуса задней бабки и пиноли при их закреплении после смещения.

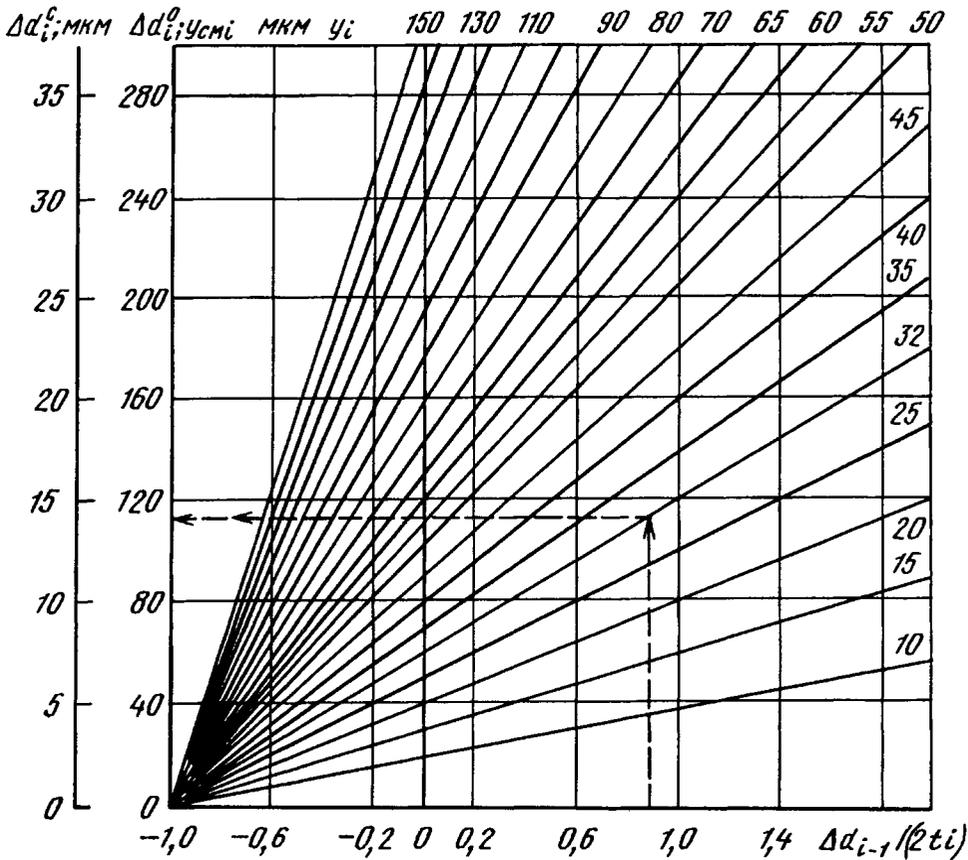


Рис. 5.5.3. Номограмма для определения величины преднамеренного смещения ( $y_{cm i}$ ) и ожидаемой погрешности формы детали в продольном сечении ( $\Delta d_i^c$ ):

$$\Delta d_i^0 = y_{cm i} - \text{погрешность формы детали без смещения}$$

При обработке маложестких длинных валов с использованием неподвижных люнетов их число выбирается из условия

$$l_k \leq 3 \sqrt{\frac{Ed\delta}{P_y}},$$

где  $l_k$  - расстояние между опорами люнетов;  $d$  - диаметр вала;  $\delta$  - допуск на обрабатываемый диаметр вала;  $P_y$  - радиальная составляющая силы резания.

*Типы приспособлений для закрепления тонкостенных цилиндрических деталей:*

1) с концентрированными силами зажима, нормальными к базовым поверхностям (оправки и патроны кулачковые, клиновые, клиноплунжерные, мембранные, цанговые и др.);

2) с распределенными силами зажима (по периметру базовой поверхности), нормальными к базовым поверхностям (патроны и оправки гидропластовые, с тарельчатыми пружинами, с гофрированными втулками, роликовые, с различными элементами постоянного и переменного сечения);

3) с зажимными силами по торцу (вдоль оси детали).

Наиболее эффективны приспособления второй группы, особенно приспособления с зажимными элементами в виде разрезных колец переменного сечения.

Прогиб кольца, закрепленного в приспособлении с концентрированными силами зажима ( $P$ ):

$$\delta_1 = \frac{PR^3}{2 \cos^2 \frac{\pi}{n} EJ_z} \left( \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{n} - \frac{n}{\pi} \sin^2 \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2n} \right),$$

где  $R$  - радиус кольца;  $J_z$  - момент инерции сечения кольца;  $n$  - число зажимных элементов приспособления;  $E$  - модуль упругости.

Выпучивание кольца в местах между точками приложения силы  $P$ :

$$\delta_2 = \frac{PR^3}{4 \cos \frac{\pi}{n} EJ_z} \left( \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi}{n} + \frac{n}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{n} - \frac{n}{\pi} \sin \frac{\pi}{n} \right).$$

Величина некрутости кольца  $\Delta\Phi = 2|\delta_1| + 2|\delta_2|$ .

*Деформация тонкостенных колец при закреплении:*

1) в трехкулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = 0,016 \frac{PR^3}{EJ_z}; \quad \delta_2 = -0,014 \frac{PR^3}{EJ_z};$$

2) в четырехкулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = 0,006 \frac{PR^3}{EJ_z}; \quad \delta_2 = -0,005 \frac{PR^3}{EJ_z};$$

3) в шестикулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = 0,0017 \frac{PR^3}{EJ_z}; \quad \delta_2 = -0,0016 \frac{PR^3}{EJ_z}.$$

При одной и той же силе зажима  $P$  на кулачке погрешность крепления кольца в шестикулачковом приспособлении в 10 раз меньше, чем в трехкулачковом. Если размеры поперечного сечения кольца не малы по сравнению с  $R$ , то деформации колец при закреплении:

1) в трехкулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = \frac{PR}{EF} \left( 0,192 \frac{R^2}{h^2} + 1,324 \right);$$

$$\delta_2 = -\frac{PR}{EF} \left( 0,1716 \frac{R^2}{h^2} + 0,011 \right),$$

где  $h$  - толщина кольца;  $F$  - площадь поперечного сечения кольца;

2) в четырехкулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = \frac{PR}{EF} \left( 0,072 \frac{R^2}{h^2} + 1,212 \right);$$

$$\delta_2 = -\frac{PR}{EF} \left( 0,06 \frac{R^2}{h^2} - 0,321 \right);$$

3) в шестикулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = \frac{PR}{EF} \left( 0,0204 \frac{R^2}{h^2} + 1,313 \right);$$

$$\delta_2 = -\frac{PR}{EF} \left( 0,0108 \frac{R^2}{h^2} - 0,551 \right);$$

4) в восьмикулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = \frac{PR}{EF} \left( 0,012 \frac{R^2}{h^2} + 1,533 \right);$$

5) в десятикулачковом приспособлении:

$$\delta_1 = \frac{PR}{EF} \left( 0,012 \frac{R^2}{h^2} + 2,084 \right).$$

При обработке тонкостенных цилиндрических деталей с креплением в трехкулачковом патроне с учетом допуска на круглость формы  $\Delta\Phi$  необходимо соблюдать следующее условие:

$$P_z \leq \frac{11E\Delta\Phi f_k D(1-\alpha)^3 \beta}{(1+\alpha)^3},$$

где  $f_k$  - коэффициент трения скольжения между заготовкой и кулачками;  $\beta = 2h/D$  - безразмерный коэффициент;  $D = 2R$ ;  $\alpha$  - безразмерный коэффициент отношения внутреннего диаметра к наружному;  $P_z$  - тангенциальная составляющая силы резания.

Сила зажима на кулачке  $Q$

$$Q = \frac{\Delta\Phi EJ_z}{0,06R^3}.$$

**5.5.3. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Под технологическими остаточными деформациями подразумеваются изменения формы, размеров и взаимного расположения поверхностей детали, которые возникают в результате изменения ее напряженного состояния в ходе технологического процесса изготовления и полностью проявляются после освобождения детали от внешних связей и воздействий.

*Технологические остаточные деформации* (ТОД) возникают в результате нарушения равновесия остаточных напряжений в заготовке и образования неуравновешенных технологических начальных напряжений, под которыми понимаются напряжения в детали после обработки, но до ее деформации (рис. 5.5.4). После снятия внешних связей (раскрепления детали) начальные напряжения вызывают ТОД детали и трансформируются в уравновешенные технологические остаточные напряжения, которые являются следствием ТОД (но не причиной). Интегральными характеристиками эпюр начальных (нормальных  $\sigma_{H(x)}$  и касательных  $\tau_{H(x)}$ ) напряжений, по которым оценивается их влияние на ТОД, являются площади эпюр  $P_H$ , а также приведенные к поверхности изгибающие и крутящие моменты  $M_H$ ,  $M_K$ :

$$P_H = \int_0^{a_1} \sigma_H(x) dx; \quad M_H = \int_0^{a_1} \sigma_H(x) x dx;$$

$$M_K = \int_0^{a_1} \tau_H(x) x dx,$$

где  $a_1$  - глубина залегания начальных напряжений;  $x$  - текущая координата толщины слоя (нулевое значение на его поверхности).

ТОД зависят от конструктивных и технологических факторов, структурная схема которых приведена на рис. 5.5.5.

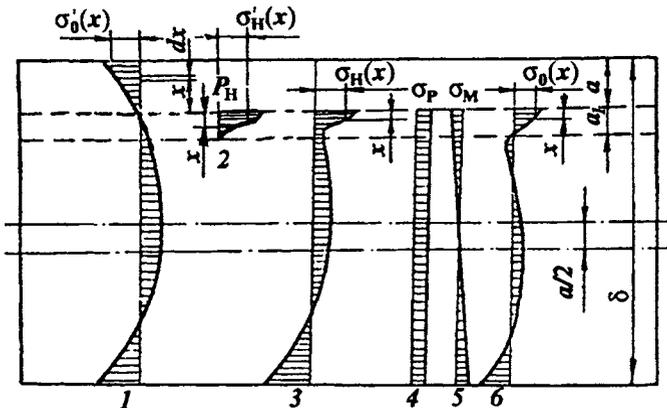


Рис. 5.5.4. Схема изменения напряженного состояния детали прямоугольного сечения в процессе односторонней обработки и технологических деформаций:

- 1 - остаточные напряжения в заготовке; 2 - начальные напряжения от обработки;
- 3 - начальные напряжения после обработки (с учетом напряжений в заготовке);
- 4 и 5 - часть начальных напряжений, которые релаксируют в результате деформаций;
- 6 - остаточные напряжения после обработки

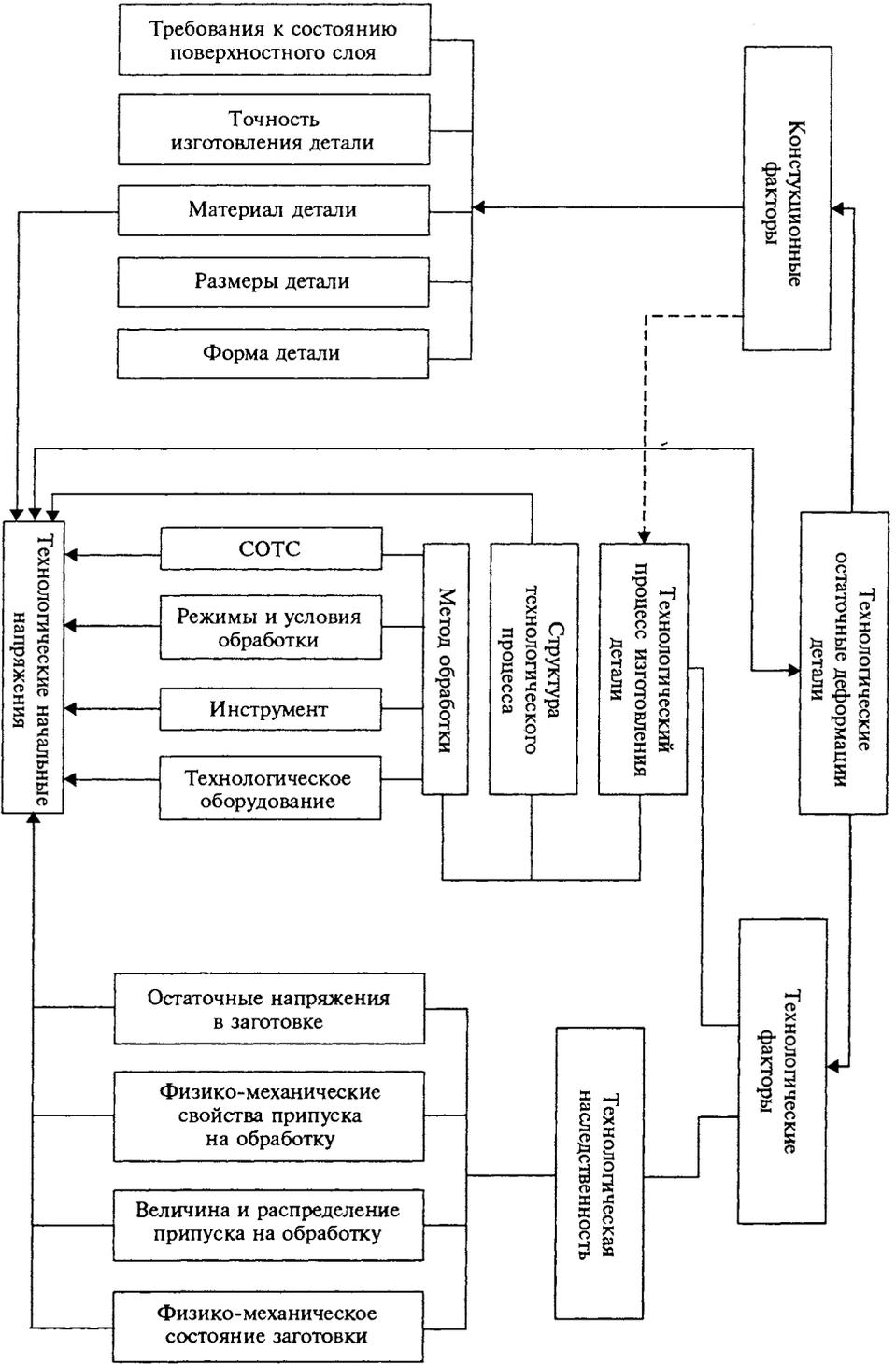


Рис. 5.5.5. Структурная схема основных факторов, влияющих на технологические остаточные деформации деталей

В связи с большим многообразием конструктивных форм маложестких деталей, их размеров, материалов, видов заготовок, методов обработки и вариантов технологических процессов изготовления, не представляется возможным дать универсальные рекомендации по снижению ТОД для деталей всех типов. Однако некоторые общие закономерности ТОД позволяют сформулировать следующие *принципиальные методы снижения ТОД*:

1) регулирование остаточных напряжений в заготовке с учетом технологического процесса обработки;

2) распределение припусков на обработку с учетом остаточных напряжений в заготовке и технологического процесса обработки;

3) выбор методов обработки, структуры технологического процесса, характеристик и геометрии инструмента, режимов обработки, смазочных и охлаждающих технологических сред с учетом остаточных напряжений в заготовке и начальных напряжений от обработки;

4) корректировка технологических или конструктивных баз;

5) применение предварительного напряжения заготовки путем упругого, упруго-пластического изгиба, растяжения, сжатия или кручения;

б) придание заготовке формы, обратной той, которую приобретает деталь в результате ТОД;

7) правка (рихтовка) деталей в холодном или нагретом состоянии:

а) упруго-пластическим изгибом или растяжением;

б) поверхностным пластическим деформированием (ППД);

в) термическим воздействием;

г) наложением вибраций.

При двусторонней обработке маложестких деталей типа стержней, балок или пластин для исключения остаточных изгибных деформаций *необходимо, чтобы в каждом сечении детали соблюдалось следующее условие:*

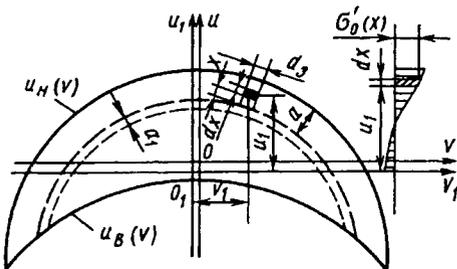


Рис. 5.5.6. Схема поперечного сечения детали сложной формы (турбинной лопатки)

суммарный изгибающий момент от действия удаляемых вместе с припуском на обработку остаточных напряжений и вносимых самим процессом обработки дополнительных начальных напряжений с одной стороны должен быть равен аналогичному суммарному изгибающему моменту, возникающему при обработке противоположной стороны. Значение суммарного изгибающего момента на той или иной криволинейной стороне обрабатываемой детали может быть определено по формуле (рис. 5.5.6):

$$M = \int_{v_1}^{v_2} \int_0^a \sigma'_0(x) u_1 \sqrt{1 + \left(\frac{du}{dv}\right)^2} dv dx + \int_{v_1}^{v_2} \int_0^{a_1} \sigma_d(x) u_1 \sqrt{1 + \left(\frac{du_1}{dv}\right)^2} dv dx, \quad (5.5.1)$$

где  $\sigma'_0(x)$  - остаточные напряжения в заготовке;  $\sigma_d(x)$  - дополнительные начальные напряжения, вносимые обработкой;  $\sigma_d(x) = \sigma'_0(x) - \sigma_n(x)$ ;  $a$  - удаляемый припуск на обработку;  $a_1$  - глубина слоя, в который вносятся начальные напряжения.

Из приведенной формулы вытекают первые три метода снижения технологических остаточных деформаций маложестких деталей. Существующие технологические процессы, как правило, включают в себя операции для снижения уровня остаточных напряжений в заготовке до минимально возможного, обеспечив требуемые свойства металла. Наиболее распространенным методом снижения остаточных напряжений является термообработка. Значительно реже используется виброобработка, многократный упруго-пластический изгиб или пластическое растяжение. Однако, исходя из условий бездеформационной обработки с учетом влияния остаточных деформаций последующей обработки, полное снятие остаточных напряжений в заготовке в большинстве случаев нецелесообразно. Оно имеет смысл только тогда, когда последующая обработка не вносит в поверхностный слой существенных начальных напряжений, что характерно, например, для электрохимической обработки (ЭХО). В других случаях минимальные технологические остаточные деформации при двусторонней обработке будут обеспечиваться тогда, когда наиболее близко будет соблюдаться условие равенства суммарных изгибающих моментов на противоположных сторонах обрабатываемой детали.

При односторонней обработке для минимальных остаточных деформаций как можно ближе должно соблюдаться условие равенства изгибающих моментов от удаляемых вместе с припуском на обработку остаточных и вносимых обработкой дополнительных напряжений:

$$\int_{v_1}^{v_2} \sigma'_0(x) u \sqrt{1 + \left(\frac{du}{dv}\right)^2} dv dx = \int_{v_1}^{v_2} \sigma_d(x) u_1 \sqrt{1 + \left(\frac{du_1}{dv}\right)^2} dv dx.$$

Для деталей прямоугольного сечения

$$\int_0^a \sigma'_0(x) (\delta + 2x - a) dx = \int_0^a \sigma_d(x) (\delta - 2x - a) dx.$$

Таким образом, путем регулирования остаточных напряжений в заготовке, распределением припуска и выбором методов обработки с учетом остаточных и начальных напряжений на всех операциях обработки, а также корректировкой технологических баз можно добиться минимальных технологических остаточных деформаций маложестких деталей машин. Эти методы следует считать основными, но они не всегда приводят к желаемым результатам; тогда в технологический процесс изготовления маложестких деталей необходимо вводить операции правки. Однако правку в холодном или горячем состоянии следует использовать только в крайних случаях, так как она связана со значительными технологическими трудностями, плохо поддается контролю, может снижать эксплуатационные свойства деталей машин в связи с возможным появлением трещин и изменением свойств пластически деформированного слоя металла. Кроме того, правкой практически невозможно устранить технологические остаточные деформации кручения, которые возникают в случае, когда главные остаточные или начальные напряжения не совпадают с осями детали и кроме нормальных имеются еще касательные напряжения в этих направлениях.

Холодная правка упругопластическим изгибом или растяжением не снижает сопротивления усталости деталей, если она выполняется при строго регламентированных режимах (степени пластической деформации, количестве нагружений). Правка ППД более технологична, легко поддается контролю, исключает появление трещин, создает в поверхностном слое остаточные напряжения

сжатия, которые повышают сопротивление усталости деталей машин, работающих при нормальных и повышенных температурах.

На рис. 5.5.7 приведена принципиальная схема проектирования технологического процесса обработки профильной части турбинных лопаток, которые являются типовым представителем деталей малой жесткости и требуют учета влияния ТОД на точность обработки.

Разработка технологического процесса должна начинаться с анализа остаточного напряженного состояния заготовки и припусков на обработку, которые являются базой для выбора технологической системы и маршрутов обработки на основании обобщенных данных по начальным направлениям и остаточным деформациям, возникающим на различных операциях механической обработки пера турбинной лопатки.

Предпочтительной схемой обработки турбинных лопаток является одновременная двухсторонняя обработка, или такая обработка, когда технологические операции обработки внутреннего и наружного профиля чередуются. Наилучшим вариантом обработки является круговое фрезерование лопаток попеременными строчками с запрограммированным изменением режимов резания при обработке внутреннего и наружного профиля в каждом сечении лопатки. С учетом остаточных напряжений в заготовке режимы резания должны обеспечить такие суммарные изгибающие моменты в каждом сечении при полной обработке профиля лопатки, чтобы технологические остаточные деформации на каждой операции находились в пределах допусков на обработку.

Главной интегральной характеристикой эпюры начальных напряжений является ее площадь. Математической обработкой результатов экспериментов установлены расчетные зависимости, связывающие площадь эпюры начальных напряжений (в МПа·мм) с технологическими факторами.

1. При круговом фрезеровании стали 15X11МФ угловой фрезой диаметром 112 мм из стали Р18:

$$P_H = 1010v^{-0,48} S_z^{0,16} t^{0,047} - 100,$$

где  $v$  - скорость резания, м/мин;  $S_z$  - подача на зуб, мм;  $t$  - глубина резания, мм.

Диапазон изменения технологических параметров:

$$30 \leq v \leq 140 \text{ м/мин}; \quad 0,1 \leq S_z \leq 0,6 \text{ мм};$$

$1 \leq t \leq 6 \text{ мм}; \quad h_3 \leq 0,4 \text{ мм}$  - износ по задней поверхности зуба фрезы.

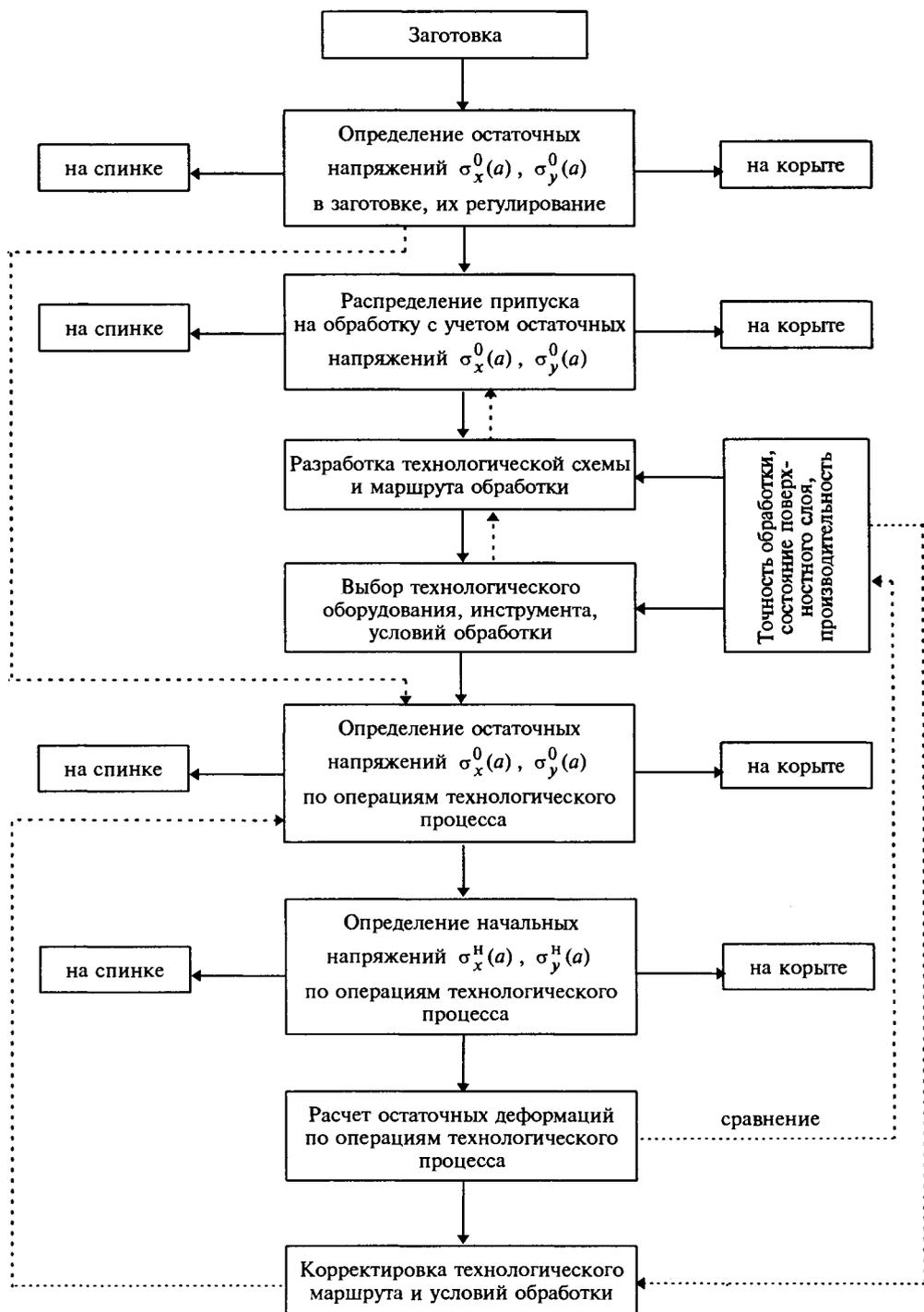


Рис. 5.5.7. Принципиальная схема проектирования технологического процесса обработки турбинных лопаток с учетом влияния остаточных деформаций на точность обработки

2. При фрезеровании стали 20X13 *цилиндрической фрезой* диаметром 43 мм из стали P18 со спиральным зубом ( $\omega = 40^\circ$ ) с охлаждением эмульсией

$$P_H = 2030v^{-0,96} S_z^{0,49} t^{0,39} h_3^{1,03}.$$

Диапазон изменения технологических параметров:

$$15 \leq v \leq 70 \text{ м/мин}; \quad 0,09 \leq S_z \leq 0,9 \text{ мм};$$

$$1 \leq t \leq 5 \text{ мм}; \quad h_3 \leq 0,5 \text{ мм}.$$

3. При фрезеровании титановых сплавов *цилиндрической фрезой* диаметром 40 мм со спиральным зубом ( $\omega = 40^\circ$ ) с твердым сплавом ВК8:

для сплава ТС5

$$P_H = 735v^{-0,12} S_z^{0,093} t^{0,17} h_3^{0,91};$$

для сплава ВТ3-1

$$P_H = 210v^{-0,48} S_z^{0,15} t^{0,25} h_3^{0,96};$$

для сплава ВТ5

$$P_H = 143v^{-0,33} S_z^{0,2} t^{0,29} h_3^{1,02}.$$

Диапазон изменения технологических параметров:

$$10 \leq v \leq 100 \text{ м/мин}; \quad 0,03 \leq S_z \leq 0,15 \text{ мм};$$

$$1 \leq t \leq 5 \text{ мм}; \quad h_3 \leq 0,5 \text{ мм}.$$

4. При *строгании* стали 20X13 резцом из стали P18 ( $\gamma = 20^\circ$ ) с охлаждением эмульсией

$$P_H = 373v^{0,27} S^{0,5} t^{0,53} R^{0,52} h_3,$$

где  $S$  - подача на двойной ход, мм;  $R$  - радиус при вершине резца, мм.

Диапазон изменения технологических параметров:

$$7 \leq v \leq 40 \text{ м/мин}; \quad 0,1 \leq S_{2x} \leq 1,2 \text{ мм};$$

$$0,5 \leq t \leq 3,5 \text{ мм}; \quad 1 \leq R \leq 6 \text{ мм}, \quad h_3 \leq 0,8 \text{ мм}.$$

5. При *плоском шлифовании* стали 20X13 периферией круга 24A40СТ1Б без охлаждения

$$P_H = 7,3v_{\text{ст}}^{1,57} S_{\text{п}}^{0,6} t^{0,39},$$

где  $v_{\text{ст}}$  - скорость подачи, м/мин;  $S_{\text{п}}$  - поперечная подача, мм/ход.

Диапазон технологических параметров:

$$0,01 \leq t \leq 0,2 \text{ мм}; \quad 0,05 \leq S_{\text{п}} \leq 0,8 \text{ мм/ход};$$

$$2,5 \leq v_{\text{ст}} \leq 15 \text{ м/мин}; \quad v_{\text{к}} = 35 \text{ м/с} - \text{ скорость резания}.$$

При использовании шлифовальных кругов других характеристик  $P_H$  необходимо умножить на следующие коэффициенты:

$$\text{для круга 24A40СТ1К} \dots \dots \dots K_{\text{кр}} = 1,06$$

$$\text{для круга 24A40СМ2К} \dots \dots \dots K_{\text{кр}} = 0,9$$

$$\text{для круга 24A25СМ1-СМ2К} \dots \dots K_{\text{кр}} = 0,6$$

$$\text{для круга 24A25М3К} \dots \dots \dots K_{\text{кр}} = 0,8$$

6. При *плоском шлифовании титановых сплавов* периферией круга 63С16СМ1-СМ2К без охлаждения:

для сплава ТС5

$$P_H = 78,7v_{\text{ст}}^{1,18} S_{\text{п}}^{0,36} t^{0,91};$$

для сплава ВТ3-1

$$P_H = 55,8v_{\text{ст}}^{0,96} S_{\text{п}}^{0,4} t^{0,77};$$

для сплава ВТ5

$$P_H = 39,8v_{\text{ст}}^{1,25} S_{\text{п}}^{0,42} t^{0,64}.$$

Диапазон изменения технологических параметров:

$$0,01 \leq t \leq 0,1 \text{ мм}; \quad 0,05 \leq S_{\text{п}} \leq 1,0 \text{ мм/ход};$$

$$2,5 \leq v_{\text{ст}} \leq 15 \text{ м/мин}; \quad v_{\text{к}} = 35 \text{ м/с}.$$

7. При *гидродробеструйном упрочнении* (ГДУ,  $T = 2$  мин):

для сплава ВТ5

$$P_H = 18,5d_{\text{ш}}^{0,92} P_{\text{ж}}^{0,9},$$

для стали 15X11МФ

$$P_H = 93,2d_{\text{ш}}^{0,97} P_{\text{ж}}^{0,31},$$

где  $d_{\text{ш}}$  - диаметр шариков, мм;  $P_{\text{ж}}$  - давление жидкости, МПа.

Диапазон изменения технологических параметров:

$$1,6 \leq d_{\text{ш}} \leq 3 \text{ мм}; \quad 0,2 \leq P_{\text{ж}} \leq 0,8 \text{ МПа}.$$

Наиболее эффективно управлять начальными напряжениями и остаточными деформациями при круговом и цилиндрическом фрезеровании путем изменения скорости резания и подачи на зуб фрезы. ТОД при обработке внутреннего профиля крупных турбинных лопаток в 2-3 раза больше, чем при обработке наружного профиля в тех же условиях. Так как с увеличением скорости резания остаточные деформации уменьшаются, то вначале назначаются режимы резания для обработки внутреннего профиля обычными методами, исходя из условий заданной стой-

кости инструмента и параметров шероховатости поверхности. Для обработки наружного профиля эти режимы должны быть скорректированы в сторону уменьшения скорости резания и увеличения подачи до таких значений, чтобы в каждом сечении лопатки соблюдалось условие равенства изгибающих моментов при обработке внутреннего и наружного профиля, а параметр шероховатости обработанной поверхности не превышал заданной величины.

Большое влияние на остаточные деформации при фрезеровании оказывает износ фрезы. Износ по задней поверхности не должен превышать 0,4 мм.

Глубина резания не оказывает большого самостоятельного влияния на остаточные деформации. Она действует через износ фрезы, жесткость детали и вибрации, которые резко увеличивают остаточные деформации. Для устранения вибрации необходимо применять жесткие станки, приспособления и соответствующие режимы резания.

Для уменьшения остаточных деформаций при обработке лезвийным инструментом более целесообразно применять жидкости, обладающие смазочными свойствами.

При шлифовании и полировании большое влияние на начальные напряжения и остаточные деформации оказывает глубина резания и величина снимаемого припуска. Припуск под шлифование не должен превышать 0,3 мм, под полирование - 0,1 мм.

С целью уменьшения остаточных деформаций необходимо проводить абразивную обработку в поперечном направлении, применять круги на бакелитовой связке (при обработке стальных деталей), не работать заsalенным кругом. При шлифовании титановых сплавов эффективно применение высокопористых кругов, особенно кругов, пропитанных специальным составом на основе стеарина. Остаточные деформации снижаются с уменьшением твердости круга, зернистости, скорости шлифования, глубины резания, поперечной подачи и скорости детали. Применение СОТС с хорошими охлаждающими свойствами (2%-ный содовый раствор, жидкий CO<sub>2</sub>) приводит к уменьшению остаточных деформаций по сравнению с СОТС смазочного действия и тем более уменьшает деформации по сравнению с работой без СОТС.

При наличии в заготовке больших остаточных напряжений для уменьшения ТОД обработку заготовок маложестких деталей целесообразно разделить на черновую и чистовую. На черновой операции необходимо удалить часть припуска с большими остаточными напряжениями. Перед чистовой обработкой провести корректировку базовых по-

верхностей, которые изменили свое положение по отношению к другим поверхностям детали в результате ТОД.

**Расчетные методы определения технологических остаточных деформаций маложестких деталей.** В общем виде задача ставится следующим образом: зная эпюру распределения остаточных напряжений в заготовке (в припуске на обработку), величину снимаемого припуска, эпюру начальных напряжений после обработки, а также геометрические характеристики детали и механические свойства материала, необходимо определить ее технологические остаточные деформации. Разработка расчетных зависимостей должна выполняться применительно к конкретным типоразмерам деталей, однако в основу принципиального подхода может быть положена схема расчета остаточных деформаций лопаток турбомашин.

В общем случае лопатка рассматривается как пространственный естественно-закрученный брус или пластина переменного поперечного сечения (рис. 5.5.8), закрепленная консольно в корневом сечении. Под действием начальных или остаточных напряжений лопатка находится в одноосном или двухосном напряженном состоянии. Дифференциальное уравнение проекции упругой линии естественно-закрученного стержня на плоскости  $xu$  и  $uz$  неподвижной системы координат  $X, Y, Z$ , выраженные через моменты в подвижной системе координат  $u, v, z$ , имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{M_u}{EJ_u} \sin \varphi + \frac{M_v}{EJ_v} \cos \varphi ;$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} = -\frac{M_u}{EJ_u} \cos \varphi + \frac{M_v}{EJ_v} \sin \varphi ,$$

где  $M_u, M_v$  - изгибающие моменты;  $J_u, J_v$  - моменты инерции относительно главных центральных осей  $u, v$  текущего сечения;  $\varphi$  - угол между положительным направлением  $x$  и  $u$ ; при равномерной закрутке  $\varphi = \varphi_k(1 - z/L)$ ,  $z$  - координата текущего сечения;  $L$  - длина лопатки;  $\varphi_k$  - угол поворота корневого сечения по отношению к торцовому.

Для расчета технологических остаточных деформаций турбинных лопаток переменного сечения с закруткой может быть использована кусочно-линейная аппроксимация. Лопатка схематизируется ступенчатым естественно-закрученным брусом, каждый из  $n$  участков

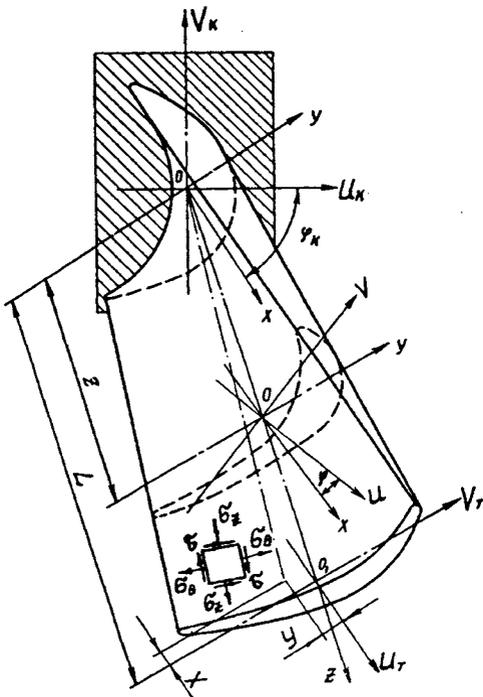


Рис. 5.5.8. Схема турбинной лопатки и расположения координатных осей

которого имеет постоянную жесткость  $EJ_{vi}$ ,  $EJ_{ui}$  и постоянные изгибающие моменты  $M_{vi}$ ,  $M_{ui}$ . Разбивка лопатки по длине на  $n$  участков считается равномерной; каждый участок повернут относительно корневого сечения на угол  $\varphi_i$ . Формула для определения остаточных деформаций изгиба торцового сечения лопатки в направлении осей  $x$ ,  $y$ , расположенных по главным центральным осям корневого сечения, имеет вид:

$$x = \frac{L^2}{2En^2} \left[ \sum_{i=1}^{i=n} (2i-1) \left( \frac{M_{vi}}{J_{vi}} \cos \varphi_i + \frac{M_{ui}}{J_{ui}} \sin \varphi_i \right) \right];$$

$$y = \frac{L^2}{2En^2} \left[ \sum_{i=1}^{i=n} (2i-1) \left( \frac{M_{vi}}{J_{vi}} \sin \varphi_i + \frac{M_{ui}}{J_{ui}} \cos \varphi_i \right) \right].$$

Изгибающие моменты  $M_{vi}$ ,  $M_{ui}$  рассчитываются по зависимости (5.5.1).

Турбинные лопатки предельных размеров имеют сложную удлиненную форму профилей и большие закрутки. Технологические остаточные деформации таких лопаток рас-

считывают на основе теории закрученных стержней удлиненного профиля.

При осесимметричной обработке наружной поверхности заготовки детали типа длинного толстостенного цилиндра (втулки) ее удлинение  $\Delta L$ , изменение диаметра  $\Delta d$  и угол закручивания  $\varphi_H$  под действием начальных напряжений, сосредоточенных на поверхности, определяются следующими выражениями:

$$\Delta d = - \frac{2}{E(1-\mu^2)(1-\gamma_0^2)\gamma} \left[ \left[ \gamma^2 + \gamma_0^2 - \mu(\gamma^2 - \gamma_0^2) - 2\mu^2\gamma^2 \right] \int_0^a [\sigma_\theta(x) - \mu\sigma_z(x)] dx - \mu(1+\mu)(\gamma^2 - \gamma_0^2) \times \int_0^a [\sigma_z(x) - \mu\sigma_\theta(x)] dx \right];$$

$$\Delta L = - \frac{2L}{E(1-\gamma_0^2)R_H} \int_0^a [\sigma_z(x) - \mu\sigma_\theta(x)] dx;$$

$$\varphi_H = - \frac{4R_H^2 L}{G(R_H^4 - R_B^4)} \int_0^a \tau_{\theta z}(x) dx,$$

где  $\gamma = \frac{r}{R_H}$ ;  $\gamma_0 = \frac{R_B}{R_H}$ ;  $R_B$  - внутренний радиус цилиндра;  $R_H$  - наружный радиус цилиндра;  $r$  - расстояние от центра до текущей точки поперечного сечения цилиндра.

Изменение диаметра длинных тонкостенных цилиндров ( $L \geq 1,65\sqrt{dh}$ ) рассчитывается по формуле:

$$\Delta d = - \frac{d}{E(h-a)} \int_0^a [\sigma_\theta(x) - \mu\sigma_z(x)] dx - \frac{M}{k^2 D} e^{-\beta} (\cos \beta - \sin \beta),$$

где  $M \cong - \frac{h}{2} \int_0^a \sigma_z(x) dx$ ,  $\beta = kz$ ,  $k = \frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{Rh}}$ ,

$D = \frac{Eh^2}{12(1-\mu^2)}$ ,  $d = 2R$  - наружный диаметр цилиндра;  $h$  - толщина стенки цилиндра.

Угол закручивания детали:

$$\varphi = - \frac{2L}{Gdh} \int_0^a \tau_{\theta z}(x) dx.$$

Изменение диаметра кольцевой детали

$$\Delta d = -\frac{(R_H + R_B)}{EF} \oint_s^a [\sigma_\theta(x) - \mu\sigma_r(x)] dx ds,$$

где  $\oint_s$  - интеграл по контуру  $s$  (внутреннему

или наружному),  $\sigma_z(x)$ ,  $\sigma_\theta(x)$ ,  $\sigma_r(x)$  - нормальные начальные (или остаточные) напряжения в слое  $a$  (осевые, тангенциальные и радиальные соответственно),  $\tau_{\theta z}(x)$  - касательные начальные (или остаточные) напряжения.

Остаточные деформации детали в виде прямого бруса произвольного сечения определяются выражениями:

$$\Delta L = -\frac{L}{EF} \oint_s^a \int \int [\sigma_z(x) - \mu\sigma_\theta(x)] dx ds;$$

изгиб по осям  $X$  и  $Y$  (стрела прогиба в середине детали)

$$f_x = \frac{L^2}{8EJ_y} \oint_s^a \int x [\sigma_z(x) - \mu\sigma_\theta(x)] dx ds;$$

$$f_y = \frac{L^2}{8EJ_x} \oint_s^a \int y [\sigma_z(x) - \mu\sigma_\theta(x)] dx ds.$$

Угол закручивания (при однородном по контуру напряженном состоянии)

$$\varphi = -\frac{L}{GJ_r} \oint_s^a \int \int \sigma_{\theta z}(x) dx d\omega.$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букатный С.А. Изменение размеров и формы деталей после обработки поверхностей / Рыбинск: РГАТА, 1993. 147 с. (дел. в ВНИИТИ 19.07.93 № 2023-В93.

2. Васильевых Л.А. Интенсификация обработки нежестких деталей. Иркутск: Иркутский ун-т, 1990. 280 с.

3. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. М.: Машиностроение, 1975. 222 с.

4. Корсаков В.С. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1977. 416 с.

5. Куклев Л.С., Тазетдинов М.М. Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности. М.: Машиностроение, 1978. 104 с.

6. Овсенко А.Н. Технологические остаточные деформации маложестких деталей и методы их снижения // Вестник машиностроения. № 12. 1991. С. 58-61.

7. Тараненко В.А. Обработка нежестких деталей при приложении растягивающего усилия // Станки и инструмент. № 8. 1978. С. 33-34.

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

## А

**Абразивная обработка** – Типовой технологический маршрут 252  
– пластмасс 141  
**Абразивные микропорошки** 247  
**Абразивный инструмент** – Выбор характеристики 583 – Классификация 575 – Методы измерения твердости 582 – Параметры шероховатости и точность резбообразования 211 – Связки 581, 584 – Структура 123, 582, 584 – Твердость 581, 584 – Типоразмеры 576  
**Абразивный материал** 578 – Зернистость 123, 584  
– для лезвийной обработки 122  
– для полирования 245, 246  
**Автоматизированная система группирования деталей** 638 – создания прогрессивных технологий – Функциональная схема 450  
**Автоматизированное проектирование** – Математическая модель 103 – Методы и принципы 96  
**Азотирование ионное** 384  
**Активного контроля средства** 533  
**Алмаз** 580  
**Алмазное выглаживание** 388 – Оптимальные режимы 390 – Прочность сцепления покрытия с основой 436 – поверхностей вращения – Точность 56,57  
**Алмазные пасты** 248  
**Алмазный инструмент** 587, 588  
**Алюминиевые сплавы** – Глубина сверления 788 – Обрабатываемость 174, 203 – Полирование 252, 253 – Лазерная резка 302 – Пасты для полирования 251 – Точность отливок 775 – Электрохимическая обработка 286  
**Анодно-абразивная обработка** 355  
**Анодно-алмазная обработка** 355  
**Анодно-механическая обработка** 354  
**АСУ ГПС** 714  
**Аустенитные стали** – Обрабатываемость 174

## Б

**База** – Определение 29  
**Базирование** – Принципы 33, 34 – Расчет отклонений 31–33 – Схема 30  
**Базирование заготовок** 30  
– при шлифовании 232  
**Базовая деталь** – Обоснование выбора 775 – Понятие 13  
**Базы технологические** 22  
**Белбор** 590, 591  
**Бериллий** – Обрабатываемость 136 – Режимы резания 137 – Параметры режущих инструментов 137  
**Беспыльное дробеструйное упрочнение** 395  
**Блокодержатели** 654  
**Боковой зазор цилиндрических зубчатых передач** 815  
**Борирование** 384  
**Бронзы** – Обрабатываемость 202  
**Бруски для суперфиниширования** 241  
**Быстрорежущие стали** – Обрабатываемость 202

## В

**Валы** – Выбор оборудования и оснастки 757 – Изготовление 761, 763, 764 – Классификация по точности, размерам, конфигурации 750 – Материал для изготовления 751 – Методы обработки 752 – Структура автоматизированного участка 760 – Технические требования 750 – Эскиз 762  
**Виброабразивная обработка** 262  
**Вибровыглаживание** – Схемы и виды рельефа поверхности 435  
**Виброударная обработка** 400

**Вибронакатывание** 390

– валов 754

**Внутришлифовальные станки** 500

**Волнистость поверхности поперечная** – Параметры 43

– для плоских поверхностей 74

– для цилиндрических поверхностей 74

**Вольфрам** – Лазерная резка 302 – Обрабатываемость 134

**Восстановление деталей электроэрозионное** 266

**Вспомогательные механизмы** 514

**Выглаживание** 388

– валов 754

– изменение параметров поверхностного слоя покрытий 435

**Высокопрочные стали** – Обрабатываемость 121 – Сверление 194

**Высокотемпературная термомеханическая обработка** 430

## Г

**Газопламенное напыление** – Установка 419

**Газотермическое напыление покрытий** 418 – Композиционные порошки 422 – Самодлющиеся порошковые сплавы 422

**Гексанит-Р** 591

**Генераторы импульсов для электроэрозионной обработки** 272

**Геометрические параметры резцов** 539

**Гибкие автоматические линии** 724

**Гибкие производственные модули** 667 – Технологическое оборудование в ГПМ 675 – Типовые компоновки и характеристики деталей 674

**Гибкие производственные системы** 700, 709 – Автоматизированное проектирование 738 – Взаимосвязь структурных компонентов 716 – Классификация по функциональному назначению 712 – Основные характеристики 717 – Программное обеспечение 732, 737 – Производительность труда 721 – Сетевое окружение 729 – Структура 713 – Структурные связи оборудования 715 – Схема ГПС "Галка-500" 728 – Технологическая система 714 – Типовые схемы компоновок 723 – Уровни автоматизации 713

– для обработки тел вращения 728

Гидравлические клинья 654

– ключи 653

– станочные приспособления 517

**Гидробудеарная обработка** 393

**Глубина резания при точении** 28

**Горизонтально-расточные станки** 490

**Гравитационное упрочнение дробью** 395

**Гребенки** 210

**Грейферные подающие устройства** 680

**Группирование деталей** – Состав признаков 634–637

**Групповая технологическая операция обработки на токарном автомате** 613

– оснастка переналаживаемая 649

**Групповое производство** 690 – Алгоритм технологической

подготовки 615 – Методы группирования деталей 631 –

Технико-экономические показатели 708 – Цехи и участки

698

– деталей из пластмасс 691

## Д

**Детали малой жесткости** – Определение остаточных деформаций 829 – Повышение точности обработки путем

снижения остаточных деформаций 823 – Повышение

точности обработки путем управления деформациями 818 –

Рекомендации по обработке 817 – Технологические

деформации 815 – Типы 816

**Деталь. Система классификации**

– по конструктивно-технологическому сходству 625  
 – по методам и способам обработки 626  
**Детонационное напыление** 420  
**Деформации технологические** – Виды 816  
 – остаточные 823 – Расчет для маложестких деталей 829  
**Деформационное упрочнение поверхностных слоев** – Влияние обработки 76 – Влияние технологических факторов 76, 77  
**Деформационно-режущая обработка** 348  
**Деформационно-термическое упрочнение** 430  
**Доводка** 224, 253 – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83  
 – стальных деталей – Параметры шероховатости 70, 71, 74  
 – чугунных деталей – Параметры шероховатости 73  
**Долбежные станки** 497  
**Долбление** – Квалитеты допуска 82 – Параметры шероховатости 82 – Режимы резания 128  
**Долбление плоских поверхностей** – Точность 58  
**Долбяки** – затачивание 574  
**Дорнование** 382  
**Дробеструйное упрочнение** 395  
**Дробеструйное упрочнение** 395  
**Дробеударная обработка** 393 – Материал детали 398 – Повышение предела выносливости 399

## Е

**Единичное производство** – определение 15

## Ж

**Жаропрочные сплавы** – Ультразвуковая обработка 333  
**Жесткость инструмента** – Условия обеспечения 24  
 – станков 470  
**Жизненный цикл технологий** – Этапы 446

## З

**Заготовки** – Базирование 30 – Жесткость 23 – Классификация 18 – Производство корпусных заготовок 773 – Разрезание 265 – Станки для механической обработки заготовок валов 757 – Схема формирования комплексной заготовки 19  
 – зубчатых колес 805  
**Загрузочно-ориентирующие устройства** бункерные автоматические 682  
**Загрузочно-разгрузочные устройства** автоматические бункерные 682  
 – в типовых компоновках ГПМ 678  
**Зажимной механизм** 510  
**Закалка** 367  
 – индукционная 372  
**Затялованные зубья** 554  
**Зенкер** – Биение режущих кромок 605 – Период стойкости 125, 197 – Скорость резания 197  
**Зенкерование** 193 – Качество поверхности 196 – Квалитеты допуска 82, 83 – Параметры шероховатости 82, 83 – Режимы резания 127  
**Зенкерование отверстий** корпусных деталей 788  
 – поверхностей вращения – Параметры шероховатости 64 – Точность 56  
 – ультразвуковое алмазное 341  
**Зубодолбежные полуавтоматы** 495  
**Зубонарезание фрезами** – Параметры шероховатости 66  
**Зубообрабатывающие полуавтоматы** для прямозубых конических колес 495  
 – для цилиндрических колес 494  
**Зубофрезерование** – Режимы резания 128  
**Зубчатые колеса** – Боковой зазор 815 – Квалитет допуска 84 – Кинематическая точность 814 – Контакт зубьев 815 – Контроль 814 – Методы обработки 807 – Параметры шероховатости 84 – Плавность работы 815 – Способы получения заготовок 804 – Технологические маршруты

807 – Типовые маршруты обработки 809–811  
**Зубья зубчатых колес** – Модификация 219 – Обработка механическая 221

## И

**Изготовление типовых деталей** 761 – Маршрут изготовления вала 762–764 – Маршрут изготовления ходового винта 767–769 – Маршрут изготовления шпинделя 765–767  
**Износ инструмента** лезвийного инструмента 560  
 – при фрезеровании 177  
**Износ элементов** технологической системы – Методы снижения 59  
**Износостойкость** технологической системы – Методы повышения 59  
**Импульсная магнитная обработка** 429  
**Индуктивные и емкостные преобразователи** приборов активного контроля 536  
**Индукционное напыление** 420  
**Инструмент** вспомогательный для станков с ЧПУ 596, 600–602  
 – для автоматизированного производства 595  
 – для обработки деталей сложной формы 796  
 – для обработки зубьев с использованием обката 548  
 – для фрезерования 545  
 – для электроэрозионной обработки 275  
 – контрольно-измерительный 532  
**Инструментальная оснастка** станков с ЧПУ токарной группы 609  
 – сталь – Сверление 193, 194  
**Инструментальные блоки** – Конструирование по модульному принципу 608 – Податливость 606  
**Инструментальный материал** для лезвийной обработки 122  
**Ионная имплантация** 414  
**Ионно-вакуумное нанесение покрытий** 424  
**Исмит** 590, 591  
**Исполнительные движения** станка 454

## К

**Калибрование** поверхностей вращения – Точность 57  
**Карбид бора** 580  
 – кремния 578, 580  
**Качество продукции** – Определение 40  
**Качество поверхностного слоя** – Критерий точности 113  
**Квалитеты допусков размеров** 82–84  
**Керамика** – Лазерная обработка 306 – Ультразвуковая обработка  
**Кибрит** 590, 591  
**Кинематическая точность** цилиндрических зубчатых передач и колес 814  
**Код детали** конструкторско-технологический – Структура 79, 626  
**Кожа** – Лазерная резка 302  
**Колеса глобальных передач** – Варианты зубообработки 812  
**Комбинированное вибромеханическое резание** 350  
**Комбинированное упрочнение** нанесением покрытий 434  
**Комбинированные методы обработки** – Классификация 345  
**Комплексная деталь** 632, 633  
 – заготовка – Схема формирования 19  
**Комплектуемое изделие** – Понятие 13  
**Композиты** 590, 591  
**Композиционные порошки** для газотермического напыления 422  
**Кондукторные втулки** 513  
**Конструирование** – Логика процесса на примере фланца подшипника 742  
**Конструкционная сталь** – Сверление 194 – Электрохимическая обработка 286  
**Контакт зубьев** цилиндрических зубчатых передач 815  
**Контроль зубчатых колес** – Нормы точности 814

Координатно-расточные станки 489  
 Копировально-прошивочные станки электроэрозионные, ультразвуковые и электрохимические 503  
 Корпусные детали – Классификация по группам 770 –  
 Материалы 772 – Обработка плоских поверхностей 776  
 Коррозионно-стойкая сталь – Лазерная резка 301 – Накатывание резьбы 216 – Обрабатываемость 121, 174 – Пасты для полирования 251 – Сверление 194 – Электрохимическая обработка 286  
 – для газотермического напыления покрытий 423  
 Коэффициент металлоемкости – Формулы для расчета 751  
 Крепежные наборы 652  
 Круглошлифовальные станки 499  
 Кубический нитрид бора 579  
 Кулачки – Шлифование 238

## Л

Лазерная обработка – Выполнение отверстий 303  
 – резка 300 – Параметры и режимы 301  
 Лазерное маркирование 318  
 – оборудование 319  
 – скрайбирование 315  
 – термораскалывание 309  
 Лазерные электроды – Материалы 417  
 Латунь – Лазерная резка 302 – Накатывание резьбы 216 – Обрабатываемость 203 – Полирование 252, 253  
 Легированные стали – Обрабатываемость 120, 131, 174 – Сверление 194  
 Лезвийный инструмент – Выбор геометрических параметров 550 – Затачивание 566, 569 – Износ 560 – Классификация 538 (см. инструмент по названиям) – Конструирование 549 – Схемы крепления режущих пластин 551, 552 – Углы продольные и поперечные 568  
 – сложный 552  
 – специальный для высокоскоростного резания 593  
 Летучие суппорты 655  
 – магазинные подающие устройства 679  
 Литье корпусных заготовок – Точность размеров 774  
 – в кокиль 774, 775  
 – в оболочковые формы 773, 775  
 – в песчаные формы 773  
 – по выплавляемым моделям 774, 775  
 – под давлением 775

## М

Магазинные подающие устройства 679 – Устройства МУПР-1 и МУПР-2 683  
 Магнелиевые сплавы – Точность отливок 775  
 Магнитно-абразивная обработка 361  
 – валов 753  
 Магнитные станочные приспособления 522  
 Маршрут обработки  
 – цилиндрических поверхностей внутренних 87  
 – цилиндрических поверхностей наружных 85  
 – плоских поверхностей 89  
 Массовое производство – Определение 15  
 Медь и ее сплавы – Лазерная резка 302 – Пасты для полирования 251 – Электрохимическая обработка 286  
 Металлорежущие станки – Классификация по виду обработки 456 – Классификация по технологическому признаку 462 – Классификация по точности 464 – Колебательные процессы и их причины 471 – Компоновки 459, 460 – Надежность 474 – Станки с ЧПУ для обработки фасонных поверхностей 796 – Схемы измерений точности 468 – Тепловые деформации узлов станка 472  
 Метчики 212 – Геометрические параметры 544 – Параметры шероховатости и точность резбообразования 211 – Период стойкости 126

Метчик-раскатчик – параметры шероховатости и точность резбообразования 211  
 Механические приводы 517  
 – руки 681  
 Механогидравлические домкраты, зажимы, распорки 652  
 Многоцелевые станки с ЧПУ 492  
 – с вертикальной компоновкой шпинделя 490  
 – с горизонтальной компоновкой шпинделя 491  
 Модифицирование поверхности нейтральными потоками 415  
 – плазменное 414  
 Модули поверхности – Деталь, представляющая совокупностью модулей 624 – Классификация 620 – Примеры конструктивного оформления 622  
 Модульный технологический процесс изготовления детали – Этапы 621  
 Молибденовый сплав – Лазерная резка 302 – Обрабатываемость 135

## Н

Надежность станков 475  
 Накатывание 387  
 – валов 754  
 – плоских поверхностей – Параметры шероховатости 66  
 – резьбы 803 – Параметры шероховатости 84 – Квалитеты допуска 84  
 – шлицев на валах 756  
 Нанесение покрытий 366  
 Нарезание резьбы – Точность, параметры шероховатости 801, 803  
 Настройка станка на заданный размер – Методы 60 – Оценка точности 53  
 Низкоуглеродистые стали – Лазерная резка 301  
 Никель – Лазерная резка 302 – Пасты для полирования 251 – Режимы резания покрытий на основе никеля 592  
 Ниобий – Обрабатываемость 135  
 Нитроцементация 381  
 – ионная 382

## О

Обдирка – Геометрические параметры резцов 133  
 Обкатывание – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83  
 – поверхностей вращения – Точность 56  
 Оборудование для обработки деталей сложной формы 796  
 Обрабатываемость – Определение 119 – Способы улучшения 124  
 Обработка – Выбор методов 756 – Выбор оборудования и оснастки 757 – Оценка точности 53  
 – давлением – Состав признаков для группирования деталей 636  
 – деталей малой жесткости 816  
 – дробью 393 – Принципиальные схемы устройств 394  
 – зубчатых колес 807  
 – конических зубчатых колес цементованных 811  
 – наружных плоских поверхностей корпусных деталей 776 – Точность 779  
 – наружных поверхностей вращения 753  
 – объемных фасонных поверхностей 795  
 – отверстий в валах и шпинделях 756  
 – отверстий корпусных деталей 783  
 – резанием – Состав признаков для группирования деталей 635  
 – резьб 799  
 – резьб на валах 756  
 – резьбовых отверстий в корпусных деталях 791  
 – с дополнительным технологическим покрытием 158  
 – фасонных и сферических поверхностей 793  
 – фасонных линейчатых поверхностей 794  
 – центробежно-ударным инструментом – Схема 755  
 – цилиндрических зубчатых колес типа вал и диск 809, 810

– червяков, червячных колес 812  
 – шлицев на валах 755  
 – шпоночных канавок на валах 756  
 – электрохимическая с неподвижными электродами 276 – Припуски 283  
 – электрохимическая с подвижными электродами 277 – Припуски 283  
**Обработка валов** – Выбор оборудования и оснастки 757 – методы 752 – Структура комплекса оборудования автоматизированных участков 760  
**Обработка корпусных деталей** 769 – Схемы обработки наружных плоских поверхностей 781, 782 – Точность обработки наружных плоских поверхностей 779  
**Обтачивание** – Квалитеты допуска 82 – Параметры шероховатости 82  
 – наружных поверхностей – Параметры шероховатости 63  
 – плоских поверхностей 58  
 – поверхностей вращения – Точность 56  
**Однорезцовые блоки** 654  
**Опорные пластины** 511  
 – штыри с головкой 511  
**Ориентирующие устройства** 681  
**Отжиг** 367  
**Отливки** – Припуск 28  
**Отпуск** 367  
**Отрезка** – Квалитеты допуска 82 – Параметры шероховатости 82  
**Отрезные резцы** 166  
**Очистители СОЖ** – Варьирование свойств 159 – Классификация 162 – Схема применения 159–161

## П

**Пальцы установочные** 512  
**Пасты ГОИ** 248  
**Переход** – Определение 15  
**Плавные работы цилиндрических зубчатых передач** 815  
**Плазменное напыление** 421  
**Пластмассы** – Виды обработки резанием 138 – Групповое производство деталей 691–695 – Классификация обрабатываемости 139 – Параметры режущих инструментов 140 – Пасты для полирования 251 – Рекомендации по выбору режущего материала 141  
**Плашка круглая** 212 – Геометрические параметры 544 – Параметры шероховатости и точность резьбообразования 211 – Период стойкости 126  
**Плашка резьбонакатная** 215  
**Плоская поверхность** – Точность обработки 58  
**Плоскошлифовальные станки с крестовым (прямоугольным) столом** 502  
 – с круглым столом 501  
**Пневматические приборы активного контроля** 533  
 – станочные приспособления 515  
 – тиски 653  
**Пневмодинамическое упрочнение** 395  
**Пневмогидравлические приводы** 518  
**Поверхность вращения внутренняя** – Точность обработки 56  
 – наружная – Точность обработки 56  
**Поверхностное пластическое деформирование** 366  
 – статическое 385, 387  
 – ударное 385  
**Поводковый центр самонастраивающийся** – Конструкция 758  
**Погрешности обработки** – Математическая модель 48 – Расчет 54 – Схема причинно-следственных связей 47 – Схема формирования 54  
**Погрешность размеров** – законы распределения 49, 50  
**Подача на зуб фрезы** – Расчет 181

**Подрезные резцы** 166  
**Позиция** – Определение 15  
**Поковки** – Припуск 28  
**Полирование** 224, 245 – Квалитеты допуска 83 – Материалы абразивные 246 – Параметры шероховатости 83 – Состав паст 249  
 – валов 753  
 – поверхностей вращения – Параметры шероховатости 63  
 – стальных деталей – Параметры шероховатости 71, 74  
**Поликристаллические сверхтвердые материалы на основе модификаций нитрида бора (ПСТМ)** 590 – Режимы резания инструмента из ПСТМ 592  
**Поперечно-строгальные станки** 497  
**Порошки металлургические** – Электрохимическая обработка 286  
**Предельные размеры** – Методы определения 27  
**Правка заготовок валов** 752  
 – центров 756  
**Прием** – Определение 15  
**Приемно-передающее устройство ППУ-3** 683  
**Призмы** 511  
**Припуск** – Определяющие факторы 26 – Расчет по методике В.М. Кована 29  
 – промежуточный 25  
**Притирка** – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83  
 – валов 754  
 – отверстий корпусных деталей 787  
 – плоских поверхностей 66 – Точность 58  
 – поверхностей вращения – Параметры шероховатости 64, 65 – Точность 56, 57  
**Проектирование технологических процессов** – Группирование объектов производства 631 – Принципы проектирования 743  
 – аналитическим методом 617  
 – аналоговым методом 618  
 – методом адресации 640  
 – методом синтеза без аналогов 642  
 – методом синтеза с ТП-аналогами 641  
 – методом синтеза с элементами-аналогами 641  
**Производительность** – Критерий максимальной 113  
**Производственный процесс** – Определение 13  
**Промышленные работы в системах ГПС** 663  
 – в типовых компоновках ГПМ 676  
**Протягивание** – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83 – Скорость резания 203 – СОЖ 203, 204 – Схемы 198  
**Протягивание отверстий** – Припуски 204 – Точность и качество поверхности 200  
**Протягивание наружных и внутренних поверхностей** 278  
 – плоских поверхностей – Параметры шероховатости 65 – Режимы резания 128 – Точность 58, 204  
 – поверхностей вращения – Параметры шероховатости 64 – Точность 57  
 – резьбы 803  
 – стальных деталей – Параметры шероховатости 71, 74  
 – шлицев на валах 755  
 – электрохимической обработкой 293  
**Протяжки** 543 – Период стойкости 126 – Основные элементы 199–201  
**Протяжные полуавтоматы для внутреннего и наружного протягивания** 498  
**Проход** – Определение 15  
**Проходные резцы** 165  
**Прошивание** 265 – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83  
**Прошивание углублений** 277  
 – электродом-инструментом 290  
 – электрохимической обработкой 293  
**Прошивки** 544 – Основные элементы 199–201, 544  
**Пружинные приводы** 525  
**ПТНБ (композит 09)** 591

## Р

**Рабочий ход** – см. Проход  
**Развертка** – Период стойкости 125, 197 – Скорость резания 197 – Геометрические параметры 542  
**Развертывание** – Качество поверхности 196 – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83 – Режимы резания 128  
**Развертывание** 193  
 – отверстий корпусных деталей 790  
 – поверхностей вращения – Параметры шероховатости 64 – Точность 56  
 – стальных деталей – Параметры шероховатости 71  
 – ультразвуковое алмазное 341  
**Размерная схема** 93  
**Размерная цепь технологическая** 94  
**Раскатывание** отверстий корпусных деталей 787  
 – поверхностей вращения – Точность 57  
 – резьбы 803  
**Рассверливание** – Квалитеты допуска 82 – Параметры шероховатости 82 – Режимы резания 127  
**Растачивание** – Квалитеты допуска 82 – Параметры шероховатости 82  
 – отверстий корпусных деталей 784  
 – поверхностей вращения – Параметры шероховатости 64 – Точность 57  
 – стальных деталей – Параметры шероховатости 69, 70, 74  
 – чугунных деталей – Параметры шероховатости 72, 73, 74  
**Расточные головки** 654  
 – режцы 165  
**Расчет технологических условий обработки** – Алгоритм 117  
**Револьверные устройства** для захвата и перемещения заготовок 680  
**Редуктор конвейера** 769  
**Режимы резания** – Аналитические методы выбора режимов 108 – Графоаналитический метод выбора режимов 109 – Машинный метод выбора режимов 110 – Многоуровневая оптимизация 115 – Схема и последовательность расчета 110 – Табличный метод выбора режимов 108 – Учет технико-экономических показателей 114  
**Резание высокоскоростное** – Инструмент 593  
 – с опережающим пластическим деформированием 348 – Схемы 349  
**Резец** – Параметры шероховатости и точность резьбообразования 211 – Период стойкости 125  
**Резина** – Лазерная резка 302  
**Резка заготовок** из проката 752  
**Режцы** – Затачивание 571  
 – призматические 540  
 – универсальные 539  
 – фасонные 539  
**Резьба** – Возможности методов обеспечения точности 801 – Способы изготовления 799 – Точность резьбы 801  
 – внутренняя 216, 803  
 – наружная 803  
**Резьбовые режцы** 210  
 – фрезы 214 – Скорость резьбофрезерования 214  
**Резьбонарезная головка** 214, 215 – Параметры шероховатости и точность резьбообразования 211  
**Резьбообразование** – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83 – Производительность различных способов 210 – Режимы резания 128  
**Релея закон** 51, 53

## С

**Самонастраивающийся поводковый центр** 758  
**Самослюющиеся порошковые сплавы** для газотермического напыления 422  
**САПР лазерного инструмента** 555  
**Сборочная единица** – Определение 12  
**Сборочный комплект** – Понятие 13

**Сварка** – Состав признаков для группирования деталей 637  
**Сверление** – Качество поверхности 188 – Квалитеты допуска 82, 188 – Параметры шероховатости 82 – Режимы резания 127, 188, 194 – Скорость резания 188  
**Сверление вибрационное** 352  
 – отверстий корпусных деталей 785, 787, 788  
 – пластмасс 141  
 – поверхностей вращения – Параметры шероховатости 64 – Точность 56  
 – стекломатериалов 152–154  
 – ультразвуковое алмазное 336, 341  
**Сверло** – Биение режущих кромок 605 – Затачивание 572 – Период стойкости 125, 197 – Скорость резания 197  
**Сверло винтовое** 190  
 – для глубокого сверления 541  
 – лопаточное 189, 190  
 – однокромочное 189, 190  
 – перовое 541  
 – ружейное 542  
 – спиральное 541  
 – шнековое 541  
 – эжекторное 542  
**Связки** для закрепления зерен в абразиве 581, 584  
**Серебро** – Пасты для полирования 251  
**Серийное производство** – Определение 15  
**Симпсона закон** 49, 50  
**Система выбора оснастки** 658  
 – приспособлений 657  
**Системы технологического оснащения** – Типовые и групповые приспособления 643  
**Складские комплексы** 684  
**Сложный лезвийный инструмент** 552  
**СОЖ** – Варьирование свойств 159 – Способы подачи 163 – Схема применения 159–161  
 – водные – Ассортимент 159  
**СОТС** 123 – Классификация 159  
**Специальный инструмент** для высокоскоростного резания 593  
**Сплавы на основе меди** – Обрабатываемость 174  
**Срезаемый слой** при фрезеровании 174  
**Сталь** – Глубина сверления 788 – Обеспечение конструкционной прочности при термической обработке 369 – Обрабатываемость 202 – Поверхностная закалка при газопламенном нагреве 372 – Поверхностная закалка при индукционном нагреве 372 – Полирование 252, 253 – Режимы лезвийного резания 127, 128 – Режимы резания инструментами из ПСТМ 592 – Режимы резания при тонком растачивании 786 – Скорость резания при нарезании резьбы в отверстиях корпусных деталей 792 – Ультразвуковая обработка 333  
 – для зубчатых колес 804  
 – для индукционной закалки 376  
 – для изготовления валов 751  
 – для цементации 379  
**Станки** – см. Металлорежущие станки  
**Станки суперфинишные** 242  
 – электроэрозионные 271  
**Станочные приспособления** – Типы 510 (см. приспособления по их названиям)  
 – для станков с ЧПУ и ГПС 528  
 – многократного применения стандартизованные 525  
**Старение** 367  
**Стекломатериалы** – Высокоскоростная обработка 158 – Лазерная резка 302 – Технология механической обработки 145 – Ультразвуковая обработка 333  
**Стойкость инструмента** 124 – Период экономичности (формула расчета) 113  
**Строгание** – Квалитеты допуска 82 – Параметры шероховатости 82 – При обработке корпусных деталей 776 – Режимы резания 128  
**Строгание плоских поверхностей** – Параметры шероховатости 65 – Точность 58  
 – при обработке корпусных деталей 776

– стальных деталей – Параметры шероховатости 74  
 – чугунных деталей – Параметры шероховатости 74  
 – шлицев на валах 755  
**Струйно-абразивная обработка** 257  
**Суперфинишование** – Квалитеты допуска 83 – Оборудование 242 – Параметры шероховатости 83 – Повышенное эксплуатационных свойств деталей 245 – Схема процесса 239 – Технология 243  
**Суперфиниширование валов** 753  
 – наружных поверхностей – Параметры шероховатости 63  
 – Режимы абразивного резания 130  
 – поверхностей вращения – Точность 56  
 – с дополнительным наложением ультразвуковых колебаний 245  
 – торцовых поверхностей 244  
**Схемы резания** 554

**Т**

**Тантал** – Обрабатываемость 135  
**Твердые сплавы** – Области применения 168 – Режимы резания инструментами из ПСТМ 592 – Ультразвуковая обработка 333  
**Твердосплавные пластины** – Геометрические параметры инструмента 135  
**Текстиль** – Лазерная резка 302  
**Теплостойкость технологической системы** – Методы повышения 59  
**Технологическая операция** – Определение 13  
 – оснастка переналаживаемая 645  
 – преемственность 20  
**–Технологическая система** – Методы повышения жесткости 55 – Эквивалентная схема 48  
**Технологические базы** 775  
 – поверхности – Классификация 626  
**Технологический процесс** – Определение 13, 17, 18 – Оценка стабильности 53 – Структурный синтез проектирования 99 – унифицированный 611  
**Технологичность деталей** 23  
 – конструкции 20–22  
**Титановые сплавы** – Лазерная резка 302 – Обрабатываемость 132 – Электрохимическая обработка 286  
**Токарно-винторезные станки** 479  
**Токарно-револьверные автоматы** 476  
 – станки 480  
**Токарные многошпиндельные горизонтальные прутковые автоматы** и полуавтоматы 477  
 – одношпиндельные автоматы продольного точения 476  
 – прутковые ГПМ 667  
**Токарные станки с ЧПУ** 481  
 – вертикальные одно- и двухшпиндельные 488  
 – двухшпиндельные (с соосной компоновкой шпинделей) 489  
 – прецизионные станки с ЧПУ фирмы "Schaublin" (Швейцария) 482  
 – прецизионные станки с ЧПУ фирмы "Boley" (Германия) 483  
 – с револьверными головками (с наклонной компоновкой суппорта) 484–487  
 – фронтальные 488  
**Точение** – Режимы резания 127  
 – бериллия 136  
 – валов 753  
 – вибрационное 352  
 – корпусных деталей 778  
 – наружных и внутренних поверхностей 277  
 – плоских поверхностей – Параметры шероховатости 65 – Точность 58  
 – полимерно-композиционных материалов с предразрушением слоя 158  
 – полустогового валов 753  
 – резьбы 803  
 – стальных деталей – Параметры шероховатости 70

– стекломатериалов 148–150  
 – тонкое (алмазное) валов 753  
 – чистовое валов 753  
 – чугунных деталей – Параметры шероховатости 72, 74  
**Точность детали** 40 – Влияние на долговечность 41 – Методы обеспечения точности 628 – Понятие 40 – Пути снижения технологических остаточных деформаций 823  
**Точность геометрическая относительная** 42  
**Точность обработки** – Пути повышения 55  
**Точность станка** – Износ элементов 473 – Типовые проверки 468 – Схемы измерений 468  
**Транспортно-перегрузочные комплексы роботизированные** 687  
**Транспортно-складские системы** 684  
**Транспортные промышленные роботы** 688  
 – системы автоматические 686  
**Тугоплавкие материалы** – Обработка 132  
**Турбоабразивная обработка** 259

**У**

**Углеродистая сталь** – Обрабатываемость 120, 174, 202 – Пасты для полирования 251 – Сверление 1948  
**Ударно-барabanная обработка** 402  
**Узел** – см. Сборочная единица  
**Ультразвуковая обработка** 327 – Расчет шероховатости 344  
 – Кинематические схемы 332 – Области применения 329 – Технологические параметры 330 – Технологические характеристики 333 – Точность 333  
 – твердых сплавов 84  
 – твердых хрупких материалов 328  
**Ультразвуковые станки** 335  
**Унифицированные приспособления** 646 – Коды признаков 647  
**Унифицированный технологический процесс** – Особенности проектирования 611  
**Устройства цифровой индикации и управления станками** 505  
**Упрочнение** – Определение 365  
 – вращающимися шестками 405  
 – дробетное 395  
 – дробеструйное 395  
 – импульсной магнитной обработкой 429  
 – комбинированное 430  
 – концентрированными потоками энергии 408  
 – лазерное 409  
 – микродуговым окислением 427  
 – микрошарками 396  
 – термической объемной обработкой 367  
 – ультразвуковое 407  
 – центробежно-шариковое (ударное) 405  
 – электромеханическое 359  
 – электронно-лучевое 413  
 – электроэрозионное 266, 269, 415  
**Установ** – Определение 15  
**Устройства** рейферные подающие 680  
 – грузозащечно-ориентирующие бункерные автоматические 682  
 – замены инструмента в ГПМ 683  
 – магазинные подающие 679, 683  
 – ориентирующие 681  
 – приемно-передающие 683  
 – револьверные 680  
 – шиберные подающие 679  
**Устройства ЧПУ** – Основные характеристики 671 – Показатели надежности 509 – Структура построения, основные типы 506

**Ф**

**Фасонные поверхности** – Обработка 216, 792 – Типы 793  
**Формовкладчики к групповым блокам** 696  
**Формообразующие движения** 454 – Классификация на металлорежущих станках 455

**Фрезерные головки** 655  
– широкоуниверсальные (инструментальные) станки 496

**Фрезерование** – Квалитеты допуска 82 – Параметры шероховатости 82 – Режимы резания 127 – Скорость резания 186

**Фрезерование валов** 755, 759  
– высокоскоростное – Инструмент 594  
– корпусных деталей 777  
– наружных плоских поверхностей – Точность 783  
– пластмасс 141  
– плоских поверхностей – параметры шероховатости 65  
– резьбы 67, 803  
– стальных деталей – Параметры шероховатости 69, 74  
– стекломатериалов 156, 157  
– торцовое – Схема 171  
– ультразвуковое алмазное 336, 339, 341  
– цилиндрическое – Схема 172 – Точность 58  
– чугунных деталей – Параметры шероховатости 72, 74  
– шлицев 66, 755 – Станки 759

**Фрезы** – Основные виды 170 – Параметры шероховатости и точность резбообразования 211 – Период стойкости 126 – Рекомендации по повышению стойкости 178 – Стойкость 186

**Фрезы высокоскоростные** 592  
– грибковые 547  
– двухсторонние твердосплавные со вставными ножами – Диаметр 184  
– дисковые 548 – Геометрические параметры 180 – Область применения 179  
– конические 546  
– концевые 547 – Геометрические параметры 180 – Область применения 179  
– модульные 546  
– осевые 546  
– резьбовые 546  
– торцово-осевые 547  
– трехсторонние быстрорежущие и твердосплавные со вставными ножами 184  
– угловые 547  
– фасонные 546  
– фрезы-пилы 548  
– цилиндрические 546  
– шпоночные 547

**Фрезы торцовые** 547 – Геометрические параметры 180 – Диаметр 181 – Затачивание 570 – Область применения 179

## X

**Химико-термическая обработка** – Способы 378

**Ходовые винты** – Изготовление 767, 768 – Эскиз 768

**Холодная штамповка** – Состав признаков для группирования деталей 636

**Хонингование** – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83  
– анодно-механическое 356  
– поверхностей вращения – Параметры шероховатости 64 – Точность 57  
– отверстий корпусных деталей 786  
– стальных деталей – Параметры шероховатости 71, 74 – Режимы абразивного резания 130  
– ультразвуковое алмазное – Шероховатость 341  
– электрохимической обработкой 293

**Хром** – Пасты для полирования 251

**Хромистые, хромоалюминиевые, хромомолибденовые, хромоникелевые стали** – Обрабатываемость 202

## Ц

**Цветные металлы** – Режимы резания при тонком растачивании 786

**Цементация** 377  
– высокотемпературная вакуумная 381  
– нонная 381

**Центробежно-ударная обработка валов** 754

**Центровка валов** 752

**Цилиндрическая поверхность** – Точность обработки 56

**Цинковые сплавы** – Пасты для полирования 251

## Ч

**Чеканка (метод ППД)** 402

**Червяки** – Варианты зубообработки 812

**Чугун** – Глубина сверления 788 – Обрабатываемость 120, 202 – Полирование 252, 253 – Режимы лезвийного резания 127, 128 – Режимы резания инструментами из ПСТМ 592 – Режимы резания при тонком растачивании 786 – Сверление 194 – Скорость резания при нарезании резьбы в отверстиях корпусных деталей 792 – Точность размеров отливок 774 – Электрохимическая обработка 286

## Ш

**Шабрение плоских поверхностей** – параметры шероховатости 65  
– стальных деталей – Параметры шероховатости 69

**Шаговый транспортер ШТПР-1** 683

**Шарикоподшипниковые стали** – Обрабатываемость 202

**Шероховатость поверхности** – Значения 62, 63 – Параметры (ГОСТ 2789–73) 42

**Шибберные подающие устройства** 679

**Шкурка абразивная шлифовальная** 577

**Шлифовальные круги** – Классы неуравновешенности 582 – Классы точности 582 – Правка рабочей поверхности 236 – Рабочая скорость 583 – Режимы затачивания лезвийного инструмента 567

**Шлифовальные материалы** 581

**Шлифование** 224 – Квалитеты допуска 83 – Параметры шероховатости 83 – Режимы абразивного резания 129

**Шлифование бесцентровое круглое наружное** – Схемы образования заготовок 231 – Технология 229  
– валов 753  
– в жидкой среде 269  
– внутренних поверхностей 227  
– корпусных деталей 778  
– наружных поверхностей – Шероховатость 63 – Режимы 226 – Схемы 225 – Технологический процесс 224  
– отверстий корпусных деталей 786  
– плоских поверхностей – Параметры шероховатости 65 – Технология 228 – Точность 58  
– поверхностей вращения – Параметры шероховатости – 64 – Точность 56, 57  
– профильные – Технология 233  
– резьбы 803  
– стальных деталей – Параметры шероховатости 70, 71, 74  
– стекломатериалов 142, 143  
– ультразвуковое алмазное 341  
– чугунных деталей – Параметры шероховатости 72–74  
– шлицев на валах 755 – Параметры шероховатости 66  
– электрохимической обработкой 293  
– электроэрозионное – Этапы проектирования 269

**Шлицепротягивание** 755

**Шлицестрогание** 755

**Шпнидели** – Изготовление 761, 766 – Эскиз 765

**Штамповки** – Припуск 28

## Э

**Экструзионно-абразивная обработка** 259

**Электрод-инструмент** 288  
– для прошивания 290  
– для электрохимического точения 293

**Электроконтактная обработка в воздушной среде** 267

**Электроконтактное припекание покрытий** 437

- разрезание в жидкости 268
- резание 353
- Электроконтактные преобразователи приборов активного контроля 535
- Электроконтактный метод в воздушной среде 269
- Электрокорунд 578, 580, 584
- Электролиты для электроэрозионной обработки 279
  - для маркирования 280
- Электромагнитные станочные приспособления 520
- Электромеханическая обработка валов 755
- Электромеханические приводы 520
- Электромеханическое сглаживание – Качество допуска 84 –
  - Параметры шероховатости 84
- Электронасосные приводы 519
- Электронно-лучевая обработка 324
- Электростатические станочные приспособления 524
- Электрохимическая обработка – Квалификация 276 –
  - Оборудование 293 –
  - Параметры качества поверхности 285 –
  - Припуски и погрешности обработки 283 –
  - Проектирование технологического процесса 284 –
  - Технологические параметры процесса 278
- Электро-химико-ультразвуковая обработка 356
- Электроэрозионная обработка – Для плавки шлифовальных кругов 568 –
  - Инструмент 274 –
  - Качество поверхности 270 –
  - Оборудование и инструмент 271 –
  - Точность 267 –
  - Этапы проектирования 269
- Электроэрозионное шлифование 265
- Элементы деталей – Классификация 625
  - стружкоразделительные 555
  - технологии – Классификация 628 –
  - Способность к переналадкам 631
- Эльбор – Свойства 580 –
  - Разделение по группам и зернистости 581 –
  - Характеристики инструмента 585
- Эльбор-Р, -РМ 590, 591

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Дальский Антон Михайлович, Суслов Анатолий Григорьевич,  
Назаров Юрий Федорович и др.

МАШИНОСТРОЕНИЕ. ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Том III-3

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Лицензия ЛР № 080003 от 12.09.96 г.

Редакторы: **И.И. Лесниченко, Г.Н. Сидорова**

Оформление художника **Т.Н. Погореловой**

Художественный редактор **Т.Н. Галицына**

Корректор **Е.М. Нуждина**

Инженеры по компьютерному макетированию

**О.В. Мочалина, Т.В. Каверина, Г.Ю. Корабельникова, Н.А. Юршина**

---

Сдано в набор 21.04.2000. Подписано в печать 29.08.2000. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times ET Печать офсетная.

Усл.печ.л. 61,43. Усл.кр.-отт. 61,72. Уч.-изд.л 80,23.

Тираж 1000 экз. Заказ **64,4 300-00**

---

Издательство "Машиностроение"  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

---

Оригинал-макет подготовлен в издательско-полиграфическом центре Тамбовского государственного технического университета  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, к. 14

---

Отпечатано в АООТ "Политех-4", 129110, Москва, ул. Б. Переяславская, 46