

УДК 631.3.004.67:621.35.035.4

# СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА

**Г.В. ГУРЬЯНОВ,  
Ю.Е. КИСЕЛЬ,**

доктора технических наук,  
профессора,

**А.С. ГОРЬКОВ,**

аспирант

ФГБОУ ВО «Брянский

государственный аграрный  
университет»

T. 8-4834-12-42-27

E-mail: YPK2@mail.ru

*Показана целесообразность применения композиционных гальванических покрытий на основе железоникелевого сплава для повышения износостойкости деталей сельскохозяйственной техники. Изучено влияние режимов электролиза на износостойкость покрытий. Оптимизированы состав и структура композиционных электрохимических покрытий, обеспечивающие наибольшую абразивную износостойкость.*

**Ключевые слова:** электрохимические покрытия; износостойкость; микротвердость; сельскохозяйственная техника.

**О**дин из перспективных методов повышения износостойкости деталей сельскохозяйственной техники – нанесение композиционных гальванических покрытий (КГП) на основе железа, которые являются наиболее дешевыми, не требуют дефицитных материалов и сложного оборудования [1–3]. Чтобы получить КГП с высокими эксплуатационными свойствами, необходимо сформировать прочносцепленную и износостойкую матрицу и ввести в нее требуемое количество твердых дисперсных частиц. В качестве дисперсной фазы КГП наиболее перспективны микропорошки электрокорунда

белого. Для формирования матрицы предпочтительны сплавы на основе железа, которые позволяют улучшить физико-механические свойства КГП [4–6]. Имеющиеся данные не позволяют определить взаимосвязь механических свойств сплавов на основе железа и условий их получения, что ограничивает возможность оценки физико-механических и эксплуатационных свойств и затрудняет их выбор в качестве матрицы КГП. Однозначно не установлено, какие размеры и объемное содержание частиц дисперсной фазы (ДФ) в покрытии обеспечивает наибольшую износостойкость КГП. Для разработки технологического процесса нанесения КГП на детали необходимо изучить влияние ДФ на работоспособность КГП и выбрать оптимальные условия получения наиболее износостойкой основы. Поэтому цель работы – найти способ повышения долговечности быстро изнашиваемых деталей сельскохозяйственной техники композиционными гальваническими покрытиями на основе железоникелевого сплава.

В исследованиях использовали образцы из сталей 35, 65Г. Прочность сцепления определяли методом кольцевого среза [6], микротвердость покрытий – с помощью микротвердомера ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76. Исследования покрытий на абразивное изнашивание при трении о нежесткозакрепленные абразивные частицы проводили в соответствии с ГОСТ 23.208-79 на специально разработанной лабораторной установке. Электрохимические покрытия толщиной  $0,5 \pm 0,1$  мм наносили на пластины из стали Ст3

(длина 30 мм, ширина 30 мм, толщина 1 мм). Усилие  $P$  прижимания образца к резиновому ролику от 20 до 88 Н, частота вращения ролика – от 60 до 325 мин<sup>-1</sup>, что соответствует изменению относительной скорости ( $V_{от}$ ) скольжения от 0,3 до 0,9 м/с. Время испытаний определяли необходимостью получения ощутимого износа ( $J$ , мг), который находили весовым методом с погрешностью 0,05 мг. В качестве абразивного материала использовали речной песок с размером зерен не более 1 мм. Эталоны сравнения служили образцы стали 65Г закаленной, наиболее часто используемой для изготовления режущих частей почвообрабатывающего оборудования, «чистого» железоникелевого и железокобальтового покрытий. Влияние легирующих добавок и параметров электролиза на свойства и абразивную износостойкость покрытий изучали, применяя центральное ротатбельное униформ-планирование второго порядка при  $k=3$  [7]. В качестве базового электролита железнения был выбран раствор хлористого железа ( $FeCl_2 \cdot 4H_2O$  – 500 г/л) – один из самых производительных и широко применяемых на практике. Определение влияния легирующих и буферных добавок на прочность сцепления покрытий проводили введением в базовый электролит солей никеля и натрия виннокисло-го. Концентрация компонентов:  $NiSO_4 \cdot 7H_2O$  – от 0 до 200 кг/м<sup>3</sup>;  $Na_2H_4C_6O_6 \cdot 2H_2O$  – от 0 до 5,2 кг/м<sup>3</sup>. Анионный состав поддерживали постоянным, применяя соли с анионами  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^-$ . Интервалы варьирования режимов электролиза: температура электролита ( $T$ ) – от 30 до 80 °С, плотность тока ( $D$ ) – от 13,4 до 46,8 А/дм<sup>2</sup>, pH ра-



створа – от 0,2 до 1,2. Железокобальтовые осадки получали из электролита состава (кг/м<sup>3</sup>): FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O – 500; CoSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O – 100; Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O – 80 [8]. Исследования условий подготовки сталей и определение возможности использования рекомендаций литературы по анодной обработке проводили в электролите: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 300–350 кг/м<sup>3</sup>, FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O – 20–22 кг/м<sup>3</sup> [5].

Образцы КГП получали из железоникелевого электролита-суспензии (ЭС) с содержанием ДФ электрокорунда белого (марка М2 – М40) при механическом контролируемом перемешивании и режимах электролиза, отвечающих наивысшей износостойкости «чистых» покрытий. Содержание порошков – от 25 до 150 кг/м<sup>3</sup>.

Исследования показали, что прочность сцепления железоникелевого сплава, который был выбран в качестве основы для КГП, зависит от содержания легирующих добавок в электролите. Уравнение регрессии, адекватно описывающее связь прочности сцепления ( $\sigma_{сц}$ , МПа) с составом электролитов, содержащих добавки Ni<sup>2+</sup> (X<sub>1</sub>), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (X<sub>2</sub>), Na<sub>2</sub>H<sub>4</sub>C<sub>4</sub>O<sub>6</sub> (X<sub>3</sub>),

$$\sigma_{Fe-Ni} = 462,3 + 24,0X_1 - 2,7X_2^2 - 17,9X_3 + 22,9X_1^2 - 4,8X_2 - 18,1X_3 + 6,8X_1X_2$$

Анализ уравнения показал, что прочность сцепления железоникелевых покрытий зависит от содержания легирующих добавок в электролитах и изменяется от 300 до 500 МПа. С увеличением ионов никеля в электролите сцепление осадков с основой повышается. Содержание ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> до некоторых пределов также благоприятно сказывается на прочности сцепления покрытия с основой. Повышенное содержание натрия виннокислого снижает прочность сцепления.

Изменение концентрации легирующих добавок, наряду с изменением прочности сцепления, приводит к изменению физико-механических свойств. Микротвердость

железоникелевых покрытий при введении серноокислого никеля снижается от 5,5 до 4,5 ГПа. Натрий виннокислый незначительно влияет на микротвердость. Микроструктура также претерпевала изменения. При этом микротрещины не доходили до основания, что способствовало повышению прочности сцепления и износостойкости покрытий.

На основании анализа уравнений зависимости сцепления покрытий от состава электролита оптимальные концентрации добавок солей составили (кг/м<sup>3</sup>): NiSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O – 90, Na<sub>2</sub>H<sub>4</sub>C<sub>4</sub>O<sub>6</sub>·2H<sub>2</sub>O – 1,5. Наибольшая прочность сцепления железоникелевых осадков составляла 450–500 МПа, что достаточно для обеспечения работоспособности покрытий в условиях абразивного изнашивания. Так как износостойкость зависит от режимов нанесения покрытий, проведены исследования зависимости износа железоникелевой основы от плотности тока, температуры и pH раствора.

Исследования показали, что абразивная износостойкость железоникелевой основы зависит от параметров электролиза. При регрессионном анализе факторных экспериментов получено соотношение, адекватно описывающее зависимость износа от параметров электролиза (температура, °С – X<sub>4</sub>; плотность тока, А/дм<sup>2</sup> – X<sub>5</sub>; pH-раствора – X<sub>6</sub>):

$$J_{Fe-Ni} = 8,8 + 0,95X_4 - 0,6X_5 + 0,69X_6^2 + 0,5X_4X_5 + 0,94X_4X_6 + 0,66X_5X_6$$

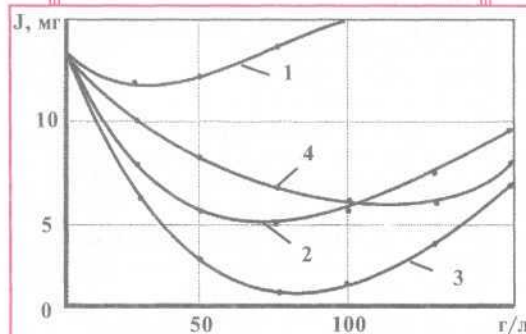


Рис. 1. Влияние содержания частиц в электролите на скорость изнашивания осадков железоэлектрокорунда в контакте с незакрепленным абразивом: 1 – М2; 2 – М10; 3 – М14; 4 – М20

Снижение температуры приводило к повышению износостойкости покрытий, оптимальное значение pH раствора находится в центре плана эксперимента. Износостойкость сплавов при повышении плотности тока увеличивалась и проходила через максимум при 35–40 А/дм<sup>2</sup>. Таким образом, оптимальный режим получения прочносцепленных износостойких железоникелевых осадков без включений соответствует pH раствора – 0,7–1,0; Д – 35–40 А/дм<sup>2</sup>; Т – 40–45 °С. Соблюдение рекомендуемых условий осаждения сплавов позволяет получать сплавы износостойкостью в 1,5–2 раза большей по сравнению со сталью серийного лемеха.

При изучении влияния содержания и размеров ДФ на износ КГП установлено, что твердые частицы электрокорунда белого позволяют повысить износостойкость КГП при абразивном изнашивании в 4–5 раз по сравнению с «чистыми» железоникелевыми покрытиями и в 8–10 раз по сравнению со сталью 65Г закаленной. Наивысшей износостойкостью обладают КГП с объемом ДФ до 26–28 % (об.), осажденные из ЭС, содержащего 80–90 кг/м<sup>3</sup> микропорошка оксида алюминия марки М14 (рис. 1).

При работе дорожно-строительной и сельскохозяйственной техники в контакте с грунтами и песком изнашивание чаще всего происходит в результате многократного пластического деформирования-передеформирования поверхностных микрообъемов поверхности материала перекатываемыми абразивными зёрнами. Известно, что при изменении скорости скольжения и усилия прижатия трущихся поверхностей происходит изменение характера взаимодействия поверхности трения с абразивом от перекатывания частиц к скольжению и микрорезанию, происходит изменение рельефа рабочих поверхностей [9–11].

Анализ результатов испытаний показал, что с ростом нагрузки и скорости относи-



тельного скольжения пары трения скорость изнашивания ( $I$ , мг/мин) эталонов и образцов, покрытых КГП, возрастала (рис. 2). Причем износ образцов с железоникелевым покрытием и эталона стали 65Г закаленной возрастал больше, чем КГП. Скорость изнашивания композиции увеличивалась линейно нагрузке, оставаясь в 4 раза меньше, чем покрытие без ДФ, и в 8 раз меньше, чем эталона стали 65Г закаленной.

Наибольшее влияние на износостойкость КГП оказывала относительная скорость скольжения, с увеличением которой от 0,3 до 0,9 м/с она изменялась в 1,5 раза, и при  $V_{от} = 0,9$  м/с была в 12 раз больше эталона из стали 65Г закаленной. Высокую износостойкость КГП при ужесточении условий работы можно объяснить тем, что при смешанных процессах изнашивания твердая фаза оказывает большое сопротивление деформациям и изнашиванию, а также тем, что с включением частицы прочность связки растет, хотя уровень ее внутренних напряжений остается относительно высоким. При увеличении нагрузки и скорости скольжения увеличивается составляющая микрорезания и оттеснения частицами абразива поверхности покрытия. Частицы наполнителя выступают в качестве площадок контакта и барьеров при прямом разрушении поверхности, распределяя напряжения и переводя процесс разрушения в сторону полидеформационного (см. рис. 2). Это обстоятельство приводит к значительному увеличению относительной износостойкости КГП в сравнении с покрытиями без ДФ.

Результаты лабораторных исследований подтверждены испытаниями деталей упрочненных КГП в полевых условиях [8]. Эксплуатационные испытания лемехов с компо-

4. Гамбург, Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М.: Янус-К, 1997. – 384 с.

5. Вячеславов, П.М. Электролитическое осаждение сплавов / П.М. Вячеславов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 96 с.

6. Шайдулин, А.М. Повышение прочности сцепления электролитического железа с легированной сталью при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.М. Шайдулин. – Кишинев. – 1990. – 19 с.

7. Колемаев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика / В.А. Колемаев, О.В. Староверов, В.Б. Турундаевский. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.

8. Кисель, Ю.Е. Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей

сельскохозяйственной техники композиционными электрохимическими покрытиями на основе сплавов железа: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.Е. Кисель. – М.: 2001. – 18 с.

9. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

10. Безик, В.А. Экспериментальные исследования комбинированного устройства защиты / В.А. Безик, Л.М. Маркарянц, И.Э. Александрия // Проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: Межд. науч.-техн. конф. – Брянск. – 2013.

11. Шкрабак, В.С. Классификация средств защиты и отключающих устройств в электроустановках / В.С. Шкрабак, Л.М. Маркарянц, Л.Н. Бочаров // Пути снижения травматизма в агропромышленном производстве России: сборник научных трудов / МСХП РФ, С-Пб ГАУ. – Санкт-Петербург, 1998. – С. 121–125.

*Its shown expediency application of composite coverings for increase durability of details of agricultural machinery. The influence of electrolyze modes on a wear resistance of coverings is studied. The structure of electrochemical coverings, providing the greatest abrasive firmless is optimized.*

**Keywords:** composite electrochemical coatings; resistance increase; microhardness; dispersed phase.

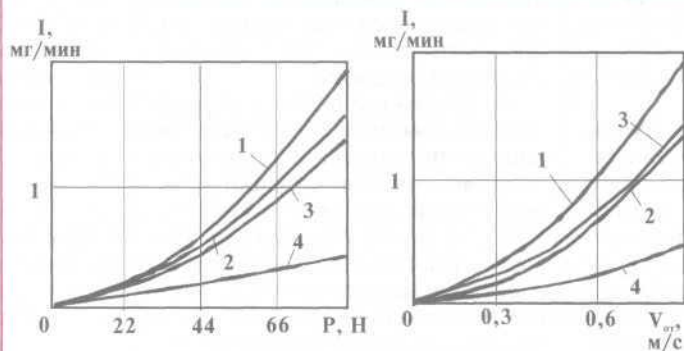


Рис. 2. Влияние нагрузки (а) и скорости относительного скольжения пары трения (б) на скорость изнашивания ( $I$ , мг/мин) эталонов и образца с КГП: 1 – сталь 65Г закаленная; 2 – железоникель; 3 – железо-кобальт; 4 – железо-никель-электрокорунд М10

зиционными покрытиями показали, что их износостойкость в 1,5–2 раза выше износостойкости серийных лемехов. По результатам испытаний разработан технологический процесс упрочнения деталей машин, проверка которого на практике показала хороший результат. Эффективность КГП повышается при ужесточении условий эксплуатации машин.

КГП на основе сплавов железа показали высокую эффективность при восстановлении и повышении износостойкости зубьев экскаваторов, золотников гидрораспределителей, дисков фрикционов К-700, поршневых пальцев и корпусов толкателей дизелей 10Д100 и Д50.

#### Литература

1. Сайфулин, Р.С. Неорганические композиционные материалы / Р.С. Сайфулин. – М.: Химия, 1983. – 304 с.
2. Гурьянов, Г.В. Электроосаждение износостойких композиций / Г.В. Гурьянов. – Кишинев: Штиинца, 1986. – 240 с.
3. Бородин, И.Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями / И.Н. Бородин. – М.: Машиностроение, 1982. – 141 с.