

УДК 631.621.891

Исследование влияния формы абразивной частицы почвы на глубину проникновения в поверхность трения исполнительных органов почвообрабатывающих орудий

А.М. Михальченков,
д-р техн. наук, проф.,
mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

С.А. Феськов,
инженер,
kafmnrmo@bgsha.com

Г.В. Орехова,
канд. с.-х. наук, ст. препод.,
kafemtp@bgsha.com
(ФГБОУ ВО «Брянский ГАУ»);

Шукюров Д.Р.,
канд. техн. наук,
tu@miit.ru
(ФГБОУ ВО «Российский университет
транспорта» (МИИТ))

вающие орудия, исполнительные органы, схемы контактирования.

Абразивные частицы, находящиеся в почве, имеют различную геометрическую форму, которая в процессе их перемещения по рабочей части исполнительного элемента почвообрабатывающего орудия претерпевает изменения. Причем трансформация формы может происходить даже в случае, если твердость поверхности трения меньше твердости абразива. Многообразие форм ставит задачу определения степени их влияния на глубину проникновения (h) изнашивающей фракции в поверхность тела при заданной (действующей) нагрузке (F_0), так как глубина проникновения служит одним из критериев разрушения поверхностного слоя вследствие царапания или воздействия контактных напряжений [1].

Для решения задачи следует оговорить ряд допущений: динамические нагружения и перемещение частицы отсутствуют; рассматривается упруго-пластический контакт; нагрузка на абразив статична. В основу рассмотрения вопроса положены некоторые результаты

исследований, проведенных рядом ученых.

Из работ [2,3] известно, что абразивные фракции почвенной массы представлены в виде шара, конуса и плоской поверхности (или поверхности с большим радиусом), поэтому в решении рассматриваются три схемы их контактирования с поверхностью трения исполнительных органов почвообрабатывающих машин.

Классическая «шариковая проба» [4] (рис. 1а), – контактирующая частица имеет радиус (R) от 100 до 1500 мкм.

Внедрение конуса в поверхность показано на рис. 1б. Степень остроты вершины конуса определяется радиусом R , исчисляющимся величинами, измеряемыми в нанометрах. По исследованиям [5], радиус при вершине конусной поверхности абразивного элемента находится в диапазоне 10-250 нм.

Наряду с частицами мелких фракций почва имеет каменные включения, радиус которых составляет 10-80 мм [2], что дает основание для рассмотрения плоского контакта (рис. 1в).

Аннотация. Показано, что геометрическая форма абразивной частицы может быть представлена индентором с радиусом от нескольких нанометров до нескольких десятков миллиметров. При этом изменение глубины ее внедрения, находящейся в диапазоне от сотен до тысячных долей микрометров вне зависимости от формы, происходит по экспоненциальной кривой, уменьшаясь с увеличением радиуса при вершине контртела.

Ключевые слова: абразивная частица, форма абразива, внедрение абразива, поверхность трения, почвообрабаты-

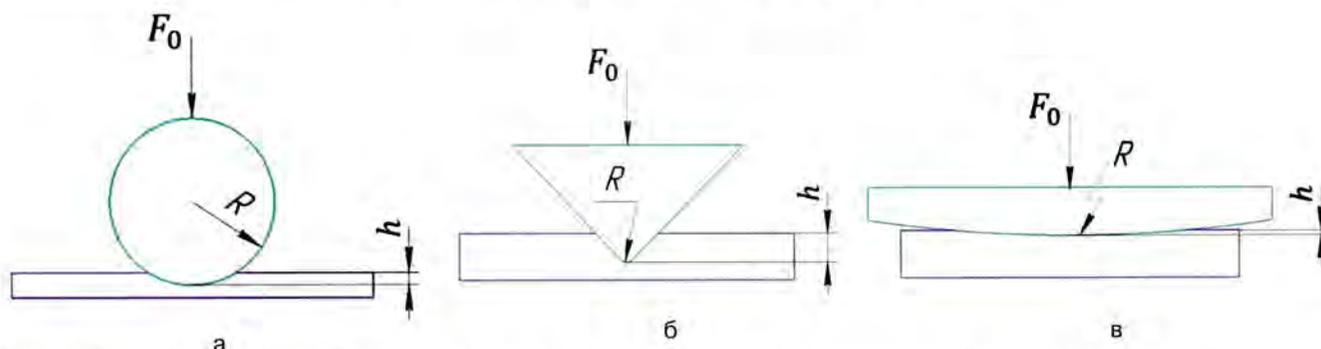


Рис. 1. Схемы внедрения абразивных частиц различной формы в поверхность трения исполнительных органов почвообрабатывающих машин: а – шар; б – конус, в – плоскость

Решение задачи Герца о внедрении в твердое тело шарового индентора [6], выраженное через определение глубины его проникновения, имеет следующую математическую интерпретацию:

$$h = \sqrt[3]{\frac{9(1+\nu^2)^2 \cdot F_0^2}{16 \cdot R \cdot E^2}}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона;
 E – модуль упругости индентированного тела.

Такое определение h носит классический характер, однако формула не учитывает наличия пластического деформирования и последствий восстановления отпечатка после снятия нагрузки.

Для определения глубины внедрения конуса в плоскую поверхность предложено следующее математическое выражение [7]:

$$h = \frac{12}{HV + 100} \sqrt{F_0^2}, \quad (2)$$

где HV – твердость по Виккерсу.

Недостатком данного выражения является отсутствие составляющей, которая учитывала бы геометрические параметры конусной области внедряющейся частицы. Формулой не предусматривается наличие скругления при вершине конуса. В данном случае рассматривается только упругий контакт абсолютно твердой внедряемой субстанции.

В случае если форма частицы представлена в виде плоского тела, радиус которого сравнительно велик, глубину его проникновения можно определить следующим образом [8]:

$$h = 0,2R \left(\frac{F_0}{HB \cdot R} \right)^{1,52}, \quad (3)$$

где HB – твердость по Бринеллю.

Это математическое выражение также не учитывает всего комплекса процессов, происходящих при упруго-пластическом деформировании.

Как показал анализ известных выражений для определения глубины проникновения инденторов различных форм в поверхность тела, они имеют ряд недостатков, не позволяю-

щих учитывать некоторые существенные факторы, например, наличие пластического деформирования.

Исследованиями [9] показано, что глубину внедрения шарового индентора с любым радиусом можно выразить формулой, учитывающей наличие пластического деформирования, определяемого через пластическую твердость HD , которая равна отношению разности нагрузок на индентор (ΔP) к соответствующей разности глубины (Δh) его внедрения после восстановления отпечатка:

$$HD = \frac{\Delta P}{\Delta h}. \quad (4)$$

Опираясь на математический аппарат и рассуждения, приведенные в работе [9], глубину проникновения сферы h в упруго-пластическое тело можно определить из следующего выражения:

$$h = \frac{F_0}{2\pi \cdot HD \cdot R}. \quad (5)$$

Однако определение h по данной формуле имеет некоторую неточность, что особенно сказывается при невысоких значениях R . Более того, в данном случае глубина внедрения, как следует из выражения (5), является величиной безразмерной (эта особенность отмечалась в источнике [9]). В связи с этим считаем целесообразным введение в формулу (5) некоего коэффициента k , учитывающего свойства почвы, размер абразивной частицы, совокупность показателей поверхности трения (рабочей поверхности) и скорость перемещения почвообрабатывающего агрегата. Тогда глубина внедрения частицы будет определяться из выражения

$$h = \frac{F_0}{2\pi \cdot HD \cdot R} \cdot k. \quad (6)$$

Величина коэффициента k определяется экспериментально с использованием результатов собственных исследований и исследований других авторов [10, 11].

Определение характера изменения h в зависимости от силы, приложенной к частице, и ее формы будем рассматривать по отношению к основным деталям почвообрабаты-

вающих орудий. Установлены следующие значения силы F_0 , действующей на поверхности рабочих органов: культиваторных лап – 0,2Н; отвалов – 0,35Н; лемехов – 0,70-0,90Н. Пластическая твердость термоупрочненной стали 65Г, которая широко используется для изготовления и восстановления исполнительных органов, составляет $402HD$. В соответствии со схемами контактирования (см. рис. 1) решение поставленной задачи сводится к поиску зависимости $h = f(R)$ для различных условий контакта.

Форма частицы представлена в виде шара, диаметр которого равен $d_s = 100; 250; 500; 1000; 1500$ мкм, что укладывается в диапазон размеров частиц кварца в почвенной массе. Для условий, когда соприкосновение кварцевых частиц почвы с рабочей поверхностью детали носит скользящий характер при указанных размерах (диаметрах) частиц, глубина проникновения находится в пределах $h = 8-12$ мкм. Как следует из зависимостей, представленных на рис. 2, функция $h = f(R)$ носит экспоненциальный характер. В этом случае увеличение диаметра абразивной частицы приводит к уменьшению глубины ее проникновения в контактирующую поверхность, что снижает интенсивность изнашивания последней. Анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что максимальная глубина проникновения h будет при минимальном диаметре абразивной частицы. При $R = 500$ мкм наступает стабилизация процесса внедрения и h остается неизменной независимо от диаметра частицы, т.е. превалирующим становится плоский контакт.

Таким образом, увеличение радиуса кварцевых фракций в процессе их истирания при взаимодействии с рабочей поверхностью способствует снижению интенсивности ее изнашивания и характерно для стрелчатых лап культиваторов.

Рассмотрим взаимодействие рабочей поверхности почвообрабатывающих машин с частицей, представленной в виде конуса с радиусом R при вершине, равным 10; 50; 100; 200; 250 нм. Коэффициент k в этом случае – 0,05 нм. В рассматриваемом

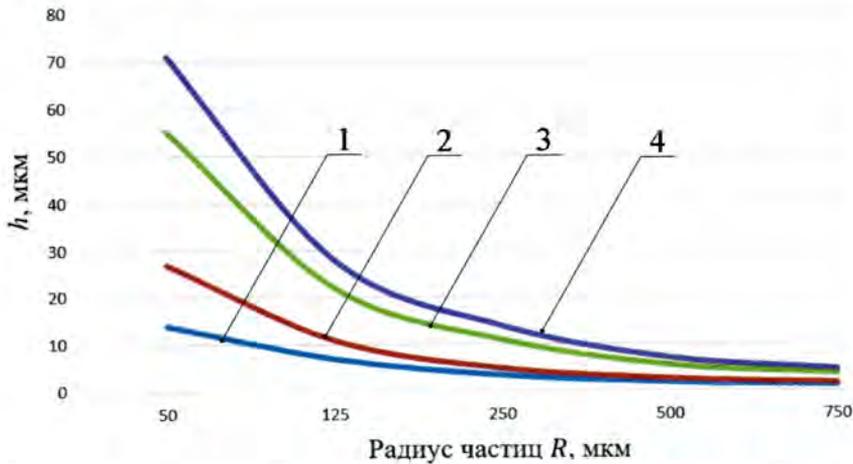


Рис. 2. Зависимость между радиусом сферической частицы (R) и глубиной ее проникновения в поверхность трения (h) при соответствующих значениях силы F_0 :
 1 – 0,25 Н; 2 – 0,35Н; 3 – 0,70Н; 4 – 0,90 Н

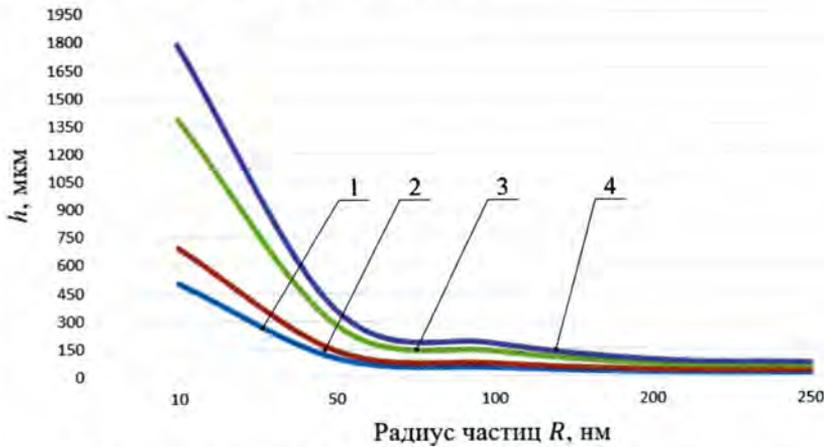


Рис. 3. Влияние радиуса (R) вершины конуса частицы на глубину его внедрения в поверхность трения при соответствующих значениях силы F_0 :
 1 – 0,25 Н; 2 – 0,35Н; 3 – 0,70Н; 4 – 0,90 Н

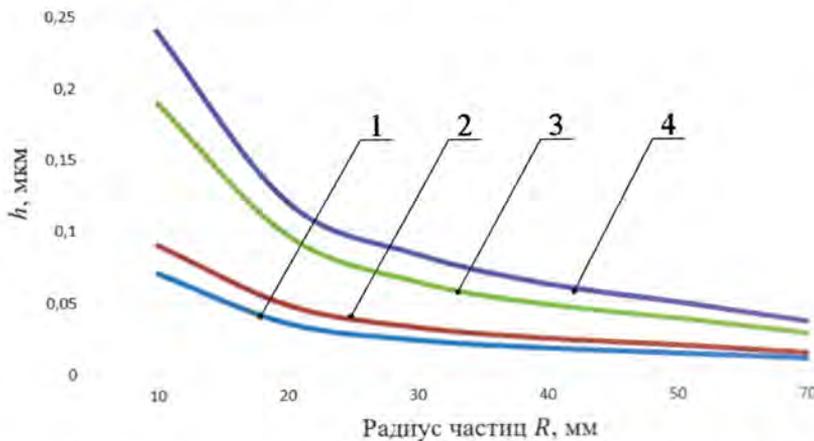


Рис. 4. Влияние радиуса (R) плоской частицы на глубину ее внедрения в поверхность трения при соответствующих значениях силы F_0 :
 1 – 0,25 Н; 2 – 0,35Н; 3 – 0,70Н; 4 – 0,90 Н

варианте радиус при вершине является характеристикой угла раствора, т.е. чем больше такой угол, тем больше R . Следует обратить внимание, что величина радиуса для этого варианта оценивается в нанометрах. Влияние R на h , так же, как и в случае индентирования сферической частицы в поверхность твердого тела, выражается экспонентой (рис. 3).

В то же время величины внедрения (h) сферического и конусного абразива при равных внешних и внутренних условиях несравнимы (см. рис. 2 и 3). Глубина проникновения частицы с конусной формой превышает этот показатель для сферических частиц в 16-25 раз.

Зависимость $h = f(R)$ показывает, что увеличение угла раствора конуса приводит к стабилизации величины проникновения частицы в тело при резком снижении значений h в первоначальный период изменения радиуса примерно до 50 нм. Отмеченное дает основание полагать, что даже незначительное истирание подобных частиц приводит к тому, что интенсивность их изнашивающего воздействия резко снижается.

Рассмотрим взаимодействие относительно крупных частиц, находящихся в почве (гравийные и щебнистые включения), с рабочей поверхностью почвообрабатывающих машин. Схема взаимодействия частицы и истираемого тела (см. рис. 1в) представляет собой плоский контакт. При расчетах принималась следующая величина радиуса истирающих тел: 10, 20, 30, 40, 50 и 75 мм. Коэффициент k в этом случае равен $k = 7$ мм. Как и в двух предыдущих случаях, имеет место экспоненциальная зависимость между глубиной индентирования и радиусом внедряемого тела: увеличение R приводит к снижению значений h .

Глубина проникновения такого рода частиц минимальна по сравнению с ранее рассмотренными схемами и находится в пределах 0,01-0,007 мкм, т.е. контактирование и износ определяются величиной шероховатости поверхности. Существенного влияния на изнашивание рабочей поверхности применительно

к исполнительным элементам рабочих органов почвообрабатывающих орудий такой контакт не оказывает.

Выводы

1. Изменение глубины внедрения абразивной частицы в поверхность трения рабочих органов почвообрабатывающих орудий в зависимости от величины воздействующей на нее силы происходит по экспоненциальной кривой и не зависит от формы самой частицы, уменьшаясь при этом с увеличением радиуса при ее вершине.

2. Наибольшая глубина проникновения в поверхность трения рабочих органов почвообрабатывающих орудий наблюдается у абразивных частиц конусообразной формы.

Список

использованных источников

1. Сафонов Б.П., Бегова А.В. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений: учеб. пособие. Новомосковск: Новомосковский институт РХТУ им. Менделеева, 2004. С. 65.
2. Михальченков А.М., Локтев А.А., Феськов С.А., Ермакова Т.А. К вопросу о форме частиц кварцевой фракции по-

чвы и ее влиянии на изнашивание деталей рабочих органов почвообрабатывающих орудий // Тр. ГОСНИТИ. 2017. Т. 129. С. 142-147.

3. Михальченков А.М., Тюрева А.А. Особенности методов исследований механических свойств серого чугуна (макро-, микротвердость и другие испытания): монография. Брянск.: Брянская ГСХА, 2010. 128 с.

4. Булычев С.И., Кравченко А.Н. Новые параметры подобия при переходе от диаграмм вдавливания к диаграммам растяжения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. № 2. С. 49-54.

5. Булычев С.И. Методики кинетического нано-, микро- и макроиндентирования: практическое пособие. М.: Московский гос. индустриальный ун-т, 2009. 80 с.

6. Точная постановка задачи Герца и ее решение в общем виде [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ntmdt-si.ru/spm-basics/view/exact-hertz-problem-solution> (дата обращения: 05.08.2017).

7. Жесткость упругопластического контакта деталей машин: монография / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, Е.Н. Казанкина, В.А. Казанкин. М.: Машиностроение, 2015. 217 с.

8. Матлин М.М., Лебский С.Л., Мозгунова А.И. Закономерности упругопластического контакта в задачах поверхностного пластического упрочнения: монография. М.: ООО «Машиностроение-1», 2007. 217 с.

9. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. С. 216-218.

10. Михальченков А.М., Дроздов А.В. Особенности определения твердости серого чугуна // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1994. № 5. С. 32.

11. Gloriant T. Microhardness and abrasive wear resistance of metallic glasses and nano-structured composite materials // J. Non-Cryst. Solids. 2003. № 1. С. 96-103.

Investigation of the abrasive soil particle shape influence on the depth of penetration into the friction surface of the tillage tool actuators

A.M. Mikhalchenkov, S.A. Feskov, G.V. Orekhova, D.R. Shukyurov

Summary. It is shown that the geometric shape of an abrasive particle can be represented by an indenter with a radius of several nanometers to several tens of millimeters. At the same time, the depth of its penetration, which is within the range of hundreds to thousandths of micrometers regardless of shape, varies based on an exponential curve decreasing while the radius increases at the counterbody apex.

Key words: abrasive particle, abrasive shape, abrasive penetration, friction surface, tillage tools, actuators, contacting patterns.

Реферат

Цель – исследование влияния формы абразивных частиц на глубину их проникновения в поверхность трения исполнительного органа почвообрабатывающего орудия при заданной внешней нагрузке. В ходе исследований приняты следующие допущения: динамические нагружения и перемещение частицы отсутствуют, рассматривается упруго-пластический контакт; нагрузка на абразив статична.

Рассматривались три схемы контактирования абразивных частиц с поверхностью трения исполнительных органов почвообрабатывающих машин: шара, конуса и плоской поверхности при упругопластическом контакте. В ходе исследований приняты следующие значения силы, действующей на поверхность рабочих органов: культиваторных лап – 0,2Н, отвалов – 0,35Н, лемехов – 0,70-0,90Н. Пластическая твердость термоупрочненной стали 65Г, используемая для изготовления и восстановления исполнительных органов, принята 402. Диаметр частиц в виде шара равен 100 мкм; 250; 500; 1000; 1500 мкм. Частицы в виде конуса имели радиус при вершине 10; 50; 100; 200; 250 нм. При плоском контакте принимали следующие величины радиуса истирающих тел: 10 мм, 20, 30, 40, 50 и 75 мм. Установлено, что при теоретическом определении глубины внедрения абразивных частиц необходимо использовать коэффициент, учитывающий влияние свойств почвы, размер абразивной частицы, твердость поверхности трения, скорость перемещения агрегата. Численные значения этого коэффициента определены в ходе экспериментальных исследований. Установлено, что глубина внедрения абразивной частицы в поверхность трения рабочих органов почвообрабатывающих орудий в зависимости от воздействующей на нее силы изменяется по экспоненциальной кривой, уменьшаясь с увеличением радиуса при вершине частицы, а интенсивность проникновения частиц зависит от их формы: наиболее активно в поверхность трения исполнительных органов почвообрабатывающих машин проникают частицы с конусной поверхностью.

Abstract

The investigation aim is to study the effect of the shape of abrasive particles on the depth of their penetration into the friction surface of the executive element of a tillage tool at a given external load. The following assumptions have been made in the course of the investigation: dynamic loading and displacement of the particle are not available; elastic-plastic contact is considered; the load on the abrasive is static.

Three patterns of contacting abrasive particles with the friction surface of the executive elements of the tillage machines have been considered: a ball, a cone, and a flat surface under elastoplastic contact. The following values of the force acting on the surface of the working organs have been assumed in the course of the investigation: 0.2N for shovels; 0.35N for moldboards; 0.70-0.90 N for shares. The plastic hardness of 65G grade (0.65% carbon, 1% manganese) thermo-hardened steel used for manufacturing and restoring executive elements is assumed being equal to 402 HD. The diameter of the spherical particles is equal to $d = 100$ microns; 250; 500; 1,000; 1,500 microns. Conical particles have a radius at the apex of 10; 50; 100; 200; 250 nm. When calculating, the following value of the radius of abrading bodies has been taken at a flat contact: 10 mm, 20, 30, 40, 50 and 75 mm. It is established that, when theoretically determining the depth of penetration of abrasive particles, it is necessary to use a coefficient that takes into account the influence of soil properties, size of the abrasive particle, hardness of the friction surface, and speed of movement of the aggregate. The numerical values of this coefficient have been determined in the course of experimental studies. It is established that the depth of penetration of an abrasive particle into the friction surface of the working organs of the tillage tools varies exponentially as a function of the force acting on it while decreasing with increasing radius at the apex of the particle; the intensity of the penetration of particles depends on their shape: the particles having a conical surface penetrate most active in the friction surface of the executive elements of the tillage machines.