

УДК 621.924.9

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

**А. В. Горик**

Доктор технических наук, профессор\*

Контактный тел.: 050-305-68-76, (0532) 2-29-81

E-mail: goruk007@rambler.ru

**С. Б. Ковальчук**

Ассистент\*

Контактный тел.: 066-516-87-69, (0532) 2-29-81

E-mail: staskb@rambler.ru

\*Кафедра общетехнических дисциплин

Полтавская государственная аграрная академия  
ул. Сквороды, 1/3, г. Полтава, Украина, 36003**Г. А. Шулянский**

Ведущий инженер

Научно-технический центр «Ви́ра»

ул. Октябрьская, 43, г. Полтава, Украина, 36003

Контактный тел.: 050-305-08-24

*Подана аналітично-експериментальна методика визначення коефіцієнта, який характеризує пружно-пластичні властивості деформівного металевого півпростору при динамічному зануренні в нього сферичного індентора. Значення коефіцієнта поставлено в залежність від швидкості атаки і твердості сталі*

*Ключові слова: процес, дробеструменеве очищення, індентор, деформівний півпростір, пружно-пластичний коефіцієнт*

*Представлена аналітично-експериментальна методика определения коэффициента, который характеризует упруго-пластические свойства деформируемого металлического полупространства при динамическом погружении в него сферического индентора. Значение коэффициента поставлено в зависимость от скорости атаки и твердости стали*

*Ключевые слова: процесс, дробеструйная очистка, индентор, деформируемое полупространство, упруго-пластический коэффициент*

## 1. Введение

История развития техники свидетельствует о том, что в ряде случаев основной причиной снижения долговечности деталей механизмов и машин является изнашивание вследствие контакта металлических поверхностей с летящими твердыми частицами в ходе того или иного технологического процесса. Данная проблема, в частности эрозионное изнашивание, является характерной для большинства техники, в особенности, сельскохозяйственной.

## 2. Постановка проблемы

Проблема долговечности инженерных объектов постоянно находится в центре внимания исследователей. Это очень актуально в различных отраслях машиностроения.

Изнашивание, особенно эрозионное потоком быстро летящих твердых частиц, является самым распространенным процессом постепенного разрушения поверхности металлических изделий, что приводит к значительным материальным убыткам. В результате эрозионного изнашивания сокращается эффективное время работы сельскохозяйственных и других машин,

расходуются огромные средства на ремонт и восстановление изношенных деталей.

Интенсивность эрозионного изнашивания напрямую зависит от твердости материала изнашиваемой поверхности и скорости движения твердых частиц, атакующих поверхность.

В этой связи, возникает необходимость теоретической увязки между собой заданной скорости атаки и упругопластических свойств материала полупространства с глубиной проникновения в него твердой частицы (индентора).

## 3. Анализ исследований

Исследованию процесса изнашивания, то есть, механизму разрушения поверхностного слоя металлических изделий машин и механизмов под динамическим контактным воздействием разного рода абразивов посвящены многочисленные научные работы, в частности, [1-5]. Исследователи рассматривали широкий спектр вопросов: качество подготовки поверхностей, постепенное изнашивание и разрушение, вопросы долговечности и эффективности и так далее, основываясь на различных физических моделях теории соударения твердых тел.

Как правило, модели предусматривали раздельное рассмотрение упругих и пластических контактных деформаций. В [6] сделана попытка описать эти деформации одним обобщающим коэффициентом, методика определения которого требует усовершенствования.

#### 4. Цель работы

На основе упругопластической модели ударного взаимодействия твердой частицы с плоской металлической поверхностью [6] построить методику определения коэффициента, который характеризует упругопластические свойства деформируемого полупространства при динамическом внедрении в него сферического индентора, что позволило бы прогнозировать интенсивность эрозионного изнашивания изделий.

#### 5. Результаты исследований

Рассмотрим процесс ударного взаимодействия твердого летящего тела (частицы) с плоской поверхностью полупространства, материал которого обладает упругопластическими свойствами. Данное взаимодействие рассматриваем как соударение отдельного шаровидного тела (индентора) с поверхностью неподвижного деформируемого полупространства.

В [6] получены основные соотношения модели взаимодействия абсолютно жесткой сферической частицы с таким полупространством. Во все эти соотношения входит коэффициент  $k$ , зависящий от упругопластических свойств материала полупространства и, который может быть определен по опытным данным при нормальном вдавливании твердого сферического индентора. Покажем методику возможного аналитического определения данной постоянной на основании результатов измерения пластической твердости.

Известно [7], что объем оставленного следа, который образуется после столкновения по нормали сферического индентора с поверхностью упругопластического полупространства пропорциональный начальной кинетической энергии движения индентора и обратно пропорциональный динамической твердости материала полупространства

$$V = T_0 / H_d \quad (1)$$

Если пренебречь незначительным отклонением формы оставленного индентором следа от сферы, то его объем можно определить, как объем шарового сегмента

$$V \approx \pi D h^2 / 2, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр индентора,

$h$  – глубина следа.

Рассмотрев совместно (2) и (1), получим

$$h = \sqrt{2T_0 / (\pi D H_d)}. \quad (3)$$

Зависимости между глубиной  $h$  оставленного следа и его диаметром  $d$  приближенно записывается следующим образом  $h = 0,5(D - \sqrt{D^2 - d^2})$ , откуда

$$d^2 = 4(D - h)h. \quad (4)$$

Динамическая твердость материала полупространства [1, 7] практически не зависит от диаметра индентора и определяется на основе экспериментальных данных за соотношением

$$H_d = \frac{4F_{max}}{\pi d^2}, \quad (5)$$

где  $F_{max}$  – максимальная сила столкновения.

Подставив (4) в (5), получим

$$F_{max} = H_d \pi (D - h)h. \quad (6)$$

Сила внедрения индентора массой  $m$  при угле атаки  $\alpha = 90^\circ$  [6]  $F_{max} = v_0 \sqrt{k m}$ . Данное соотношение с учетом, что начальная скорость атаки  $v_0 = (2T_0/m)^{1/2}$ , можем переписать следующим образом

$$F_{max} = (2T_0 k)^{1/2}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6) с учетом (3), получим соотношение для определения упругопластического коэффициента

$$k = \frac{\pi H_d}{D} \left( D - \sqrt{\frac{2T_0}{\pi D H_d}} \right)^2. \quad (8)$$

В выражении (8) во многих случаях можно пренебречь значением квадрата глубины следа  $h = \sqrt{2T_0 / (\pi D H_d)}$ , что дает более простое выражение при незначительной потере точности:

$$k = \pi H_d \left( D - 2\sqrt{2T_0 / (\pi D H_d)} \right). \quad (9)$$

В некоторых случаях в (8) можно пренебречь и значением глубины следа  $h$  по сравнению с диаметром частицы  $D$  для получения простой приближенной формулы  $k \approx \pi D H_d$ . Но это не во всех случаях правильно с точки зрения точности. В случае эрозионного изнашивания мелкими твердыми частицами, летящими со значительной скоростью необходимо при определении коэффициента  $k$  учитывать наиболее точное и полное выражение (8).

Коэффициент  $k$  можно определить также и через другие числа твердости.

К примеру, динамическая пластическая твердость по Дрозду [2] определяется следующим соотношением

$$H D_d = \frac{F_{max}}{\pi D h}. \quad (10)$$

Установим зависимость между динамической твердостью  $H_d$  и  $H D_d$ . Записав силу удара из выражений

(5) и (10), а затем, приравняв полученные соотношения, будем иметь

$$\pi d^2 H_d / 4 = \pi D h H_{D_d} \tag{11}$$

Откуда

$$\frac{H_d}{H_{D_d}} = \frac{4h}{d^2} D \tag{12}$$

Поскольку величина  $h$  мала по сравнению с  $d$ , соотношение (4) можно упростить

$$d^2 \approx 4Dh \tag{13}$$

Тогда отношение (12), оказывается близкое к единице

$$\frac{H_d}{H_{D_d}} \approx \frac{4h}{4Dh} D \approx 1 \tag{14}$$

Таким образом,

$$H_d \approx H_{D_d} \tag{15}$$

Динамическая твердость  $H_{D_d}$  связана с пластической  $H_{D_{пл}}$  следующей зависимостью

$$H_{D_d} = \eta_d H_{D_{пл}} \tag{16}$$

где  $\eta_d$  – динамический коэффициент.

В соответствии с (15) и (16), коэффициент  $k$  может быть определен через пластическую твердость по (8) так:

$$k \approx \frac{\pi \eta_d H_{D_{пл}}}{D} \left( D - \sqrt{2T_0 / (\pi D \eta_d H_{D_{пл}})} \right)^2 \tag{17}$$

По аналогии с (9) приводим менее точные формулы для определения коэффициента упругопластических свойств материала полупространства, которыми можно пользоваться при соответствующих соотношениях  $h$  и  $D$ :

$$k \approx \pi \eta_d H_{D_{пл}} \left( D - 2\sqrt{2T_0 / (\pi D \eta_d H_{D_{пл}})} \right)$$

$$\text{или } k \approx \eta_d \pi D H_{D_{пл}}$$

Зависимость между числом твердости по Бринеллю и пластической твердостью  $H_{D_{пл}}$  при  $HВ \leq 4000$  МПа [2], может быть описана следующим соотношением

$$HВ = 1.96 H_{D_{пл}}^{0.89}, H_{D_{пл}} = 0.469 HВ^{1.12} \tag{18}$$

где  $H_{D_{пл}}$  и  $HВ$  измеряются в МПа.

Тогда, в соответствии с (17) упругопластический коэффициент может быть определен так:

$$k \approx \frac{\pi \eta_d HВ^{1.12}}{2.13D} \left( D - \sqrt{\frac{4.26T_0}{\pi D \eta_d HВ^{1.12}}} \right)^2 \tag{19}$$

Зависимость между  $H_{D_{пл}}$  и твердостью по Роквеллу имеет вид

$$H_{D_{пл}} = \frac{88300}{130 - HRB} \tag{20}$$

Соответственно

$$k \approx \frac{88300 \pi \eta_d}{(130 - HRB) D} \left( D - \sqrt{\frac{2(130 - HRB) T_0}{88300 \pi D \eta_d}} \right)^2 \tag{21}$$

Эти формулы при возможности также можно упростить по показанному выше алгоритму.

Коэффициент динамичности  $\eta_d$ , что фигурирует в соотношениях (17), (19) и (21) зависит от скорости удара и свойств материала полупространства. По данным, приведенным в [2], для конструкционных сталей в диапазоне скоростей  $v = 1...10$  м/с он изменяется в пределах  $\eta_d = 1...2$ . С другой стороны, в соответствии с данными Ю.Я. Волошенко-Климовичского (1965р.) увеличение скорости свыше 5...8 м/с не приводит к существенному изменению твердости и предела текучести материала тела, которое испытывает упругопластическую деформацию при ударной нагрузке. Таким образом, при скоростях удара больше 10 м/с можно ожидать незначительного роста коэффициента динамичности в пределах  $\eta_d = 2.0...2.4$ .

Изложенная информация позволяет реализовать зависимости для определения отдельных технических показателей взаимодействия индентора с поверхностью металлического упругопластического полупространства. Числовые результаты расчетов, хорошо согласовываются с экспериментальными измерениями, что позволяет рекомендовать методику определения упругопластического коэффициента для построения теоретических моделей ударного взаимодействия тел. Это позволит установить параметры следа, который оставляет дробинка на металлической поверхности.

### 5. Пример реализации

Приведем некоторые результаты численного определения упругопластического коэффициента для конкретных условий.

Например, для экспериментального случая [2] столкновения индентора массой  $m = 1,02$  кг, который имел сферическую ударную часть диаметром  $D = 0.005$  м, с плоской поверхностью из стали 20 на скорости  $v_0 = 2$  м/с были получены следующие опытные величины:

$$F_{\text{так}} = 10500 \text{ Н}, h = 0.33 \cdot 10^{-3} \text{ м}, d = 2.66 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

В соответствии с (7) значение упругопластического коэффициента через исходные опытные величины может быть определено так:

$$k = \frac{1}{m} \left( \frac{F_{\text{max}}}{v_0} \right)^2 = \frac{1}{1.02} \left( \frac{10500}{2} \right)^2 = 2.7 \cdot 10^7 \text{ Н/м}.$$

Сравним полученное экспериментальным путем значение коэффициента с теоретическим значением, определенным по соотношению (17). Пластическая твердость для стали 20 [2]  $HВ = 1440$  МПа динамический коэффициент  $\eta_d = 1.40$ .

Начальная кинетическая энергия индентора  $T_0 = 0.5 m v_0^2 = 0.5 \cdot 1.02 \cdot 2^2 = 2.04$  Дж.

Тогда теоретическое значение упругопластического коэффициента будет таким:

$$k = \frac{\pi \cdot 1.4 \cdot 1440 \cdot 10^6}{0.005} \left( 0.005 - \sqrt{\frac{2 \cdot 2.04}{\pi \cdot 0.005 \cdot 1.4 \cdot 1440 \cdot 10^6}} \right)^2 = 2.73 \cdot 10^7 \text{ Н/м.}$$

Разница между теоретическим значением и экспериментальным практически отсутствует, что подтверждает правильность экспериментально-аналитического определения упругопластического коэффициента  $k$ .

Глубина внедрения индентора  $h$  в металлическую поверхность, определенная с использованием в упругопластической модели [6] коэффициента  $k$ , составляет  $0,38 \cdot 10^{-3}$  м, что несколько больше экспериментального значения  $0,33 \cdot 10^{-3}$  м. Как видим, погрешность теоретического значения  $h$  по сравнению с экспериментальным достигает 13%, что есть очень хорошим результатом для экспериментальных исследований подобного типа.

Теперь рассмотрим для примера дробеструйную очистку поверхности изделия из низкоуглеродистой стали 10 дробью диаметром 1 мм.

Исходные данные:

- нормальная составляющая скорости  $v_{0y} = 104$  м/с;
  - масса дробинки  $m = 4 \cdot 10^{-6}$  кг/шт;
  - твердость стали по Бринеллю  $HB = 1320$  МПа;
  - коэффициент динамичности  $\eta_d = 2,2$ .
- Начальная кинетическая энергия дробинки

$$T_0 = 0.5mv_{0y}^2 = 0.5 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 104^2 = 21.63 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Тогда динамический упругопластический коэффициент равен

$$k \approx \frac{\pi \eta_d HB^{1.12}}{2.13 \cdot 10^{-6} D} \left( D - \sqrt{\frac{4.26 T_0}{10^6 \pi D \eta_d HB^{1.12}}} \right)^2 = \frac{\pi \cdot 2.2 \cdot 1320^{1.12}}{2.13 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \times \\ \times \left( 1 \cdot 10^{-3} - \sqrt{\frac{4.26 \cdot 21.63 \cdot 10^{-3}}{10^6 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2.2 \cdot 1320^{1.12}}} \right)^2 = 8,86 \cdot 10^6 \text{ Н/м.}$$

Значение коэффициента  $k$  в этом случае также приводит до расчетных размеров следа согласованных с экспериментальными их значениями.

## 6. Выводы

Применение упругопластического коэффициента в модели ударного контакта, расширяет и углубляет познания относительно понимания физической природы формирования следа на металлической поверхности с точки зрения эрозионного воздействия. Введение в практику проектирования машин и механизмов динамической упругопластической характеристики материалов, определяемой на основе экспериментальных данных, позволяет в самом начале соответствующих расчетов, позволять с минимальными затратами прогнозировать долговечность деталей, которые подвергаются эрозионному изнашиванию при контакте с летящими твердыми частицами.

## Литература

1. Саверин, М.М. Дробеструйный наклеп [Текст] / М.М. Саверин. – М.: Машгиз, 1955. – 312с.
2. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации [Текст] / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с.
3. Пановко, Я.Х. Введение в теорию механического удара [Текст] / Я.Х. Пановко – М.: Наука, 1977. – 224с.
4. Богомолов, Н.И. Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием единичного зерна [Текст] / Н.И. Богомолов // Труды ВНИИАШ, №7, С.74-88. - Л.: Машиностроение, 1968. - 123с.
5. Кильчевский, Н.А. Теория соударения твердых тел [Текст] / Н.А. Кильчевский – К.: Наукова думка, 1969. – 246с.
6. Горик, О.В. Взаємодія індентора з металевою поверхнею при дробеструменевій обробці [Текст] / О.В. Горик, А.А. Ландар, С.Б. Ковальчук, Г.А. Шуляньський // Технологічний аудит та резерви виробництва – Х.: Технологічний Центр, 2011. – №1(1) – С.25-29.
7. Шапошников, Н.А. Механические испытания металлов [Текст] / Н.А. Шапошников – М.-Л.: Машгиз, 1954. – 443с.

## Abstract

*Erosive wear due to contact of metal surfaces with flying solid particles is a typical problem of machinery. The intensity of wear depends on the hardness of the material of wearing surface and the kinetic energy of moving solid particles. A measure of wear is associated with the parameters of the track left by a particle on the surface of parts. Thus the problem of linking of these components of the process of shock interaction of counter-bodies arises.*

*On the basis of the elastoplastic model of shock interaction of a solid particle with a flat metal surface we have created a method of determining the coefficient, which characterized the elastoplastic properties of deformable half-space at dynamic imbedding of a spherical indenter in it. This allowed predicting the intensity of erosive wear. The coefficient was determined on the basis of existing or special laboratory results of studies of shock embedding of the indenter into prototypes, and on the basis of laboratory analytical calculations. This allowed us to summarize the available experimental data on the current input parameters of the considered process. The elastoplastic coefficient depends on the initial velocity and the diameter (mass) of attacking body and on the hardness of the material of the attacked half-space.*

**Keywords:** process, shot-blast cleaning, indenter, deformable half-space, elastoplastic coefficient