

**Кузьменко А.Г.,
Вишневский О.А.**

Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина

**МЕТОД ИСПЫТАНИЙ НА АБРАЗИВНЫЙ
ИЗНОС ПО СХЕМЕ БРИНЕЛЛЯ-ХОВАРТА
(*BR - HV*). ЧАСТЬ I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ МЕТОДА**

1. Сущность метода и варианты схем испытаний

Обзор состояния и постановка задач

1.1. Сущность метода *Br - Hv*: испытаний на абразивный износ заключается в том, что между вращающимся диском (цилиндром) и испытываемым образцом подается песок. При этом цилиндр прижимается к образцу, абразив, попадая в зазор, изнашивает испытываемый образец. Износ образца обычно оценивается по изменению веса испытываемого образца. Здесь рассматривается линейный износ образца.

1.2. Систематизация вариантов схем метода *Br - Hv* (рис. 1 - 5, табл. 1)

Схема испытаний по методу *Br - Hv* содержит три основных элемента

- 1) вращающийся диск;
- 2) испытываемый образец;
- 3) абразив, песок сухой или влажной.

Элементы схемы могут отличаться материалом и геометрией (макро и микрогеометрией); песок может быть разной дисперсности и влажности.

Таблица 1

Условия испытаний на разных установках

№	Источник	[1]	[1]	[2]	[2]	[2]
		ИМАШ УСТБ рис. 1	ИМАШ Уст. Бриннель- Ховарт	ГОСТ 23.208-79 рис. 3	ASTMG65-83 рис. 4	ASTMG105-59 рис. 5
1	материал диска	армко	резина неопрен	резина	резина	резина
2	D / n	50/1	220/12	-	-	178
3	n об/мин	25	196	200	200	245
4	v м/мин	4				
5	Q кг	2кг/мм	15	4,5 - 13	4,5 - 13	22,5
6	t мин / s м	20 с / $s = 2$ м	-	-	30 мм, 71 - 400 м	40 - 60 мм
7	абразив	эл-корунд	песок 0,2-0,6	сухой	сухой	влажный
8	абразив	карбид бора	-	-	-	-
9	образец	75 × 25 × 12	75 × 25 × 12	-	-	-
10	расход, кг		1,8 / 30 кг/мин	-	-	-

1.3. Варианты конструктивных схем при реализации метода *Br - Hv* (рис. 1 - рис. 5)

⁰. Приведенные далее схемы и конструкции установок для испытаний на абразивный износ взяты из книг [1 - 4].

1) Схема испытаний, при которой между цилиндрической поверхностью вращающегося диска и плоской поверхностью неподвижного образца перемещаются абразивные частицы, захватываемые диском, была впервые осуществлена в 1921 г. Бринеллем. Подробное изложение метода Бринелля и данные о полученных им результатах были изложены в работе [1]. Там же приведены результаты опытов по изнашиванию различных материалов (при использовании дисков из разных металлических материалов) на машине, воспроизводящей схему Бринелля, но отличающейся от оригинальной машины конструкцией и уменьшенным и размерами диска. Разработанная в Институте машиноведения машина условно обозначена буквой Б (Бринелль).

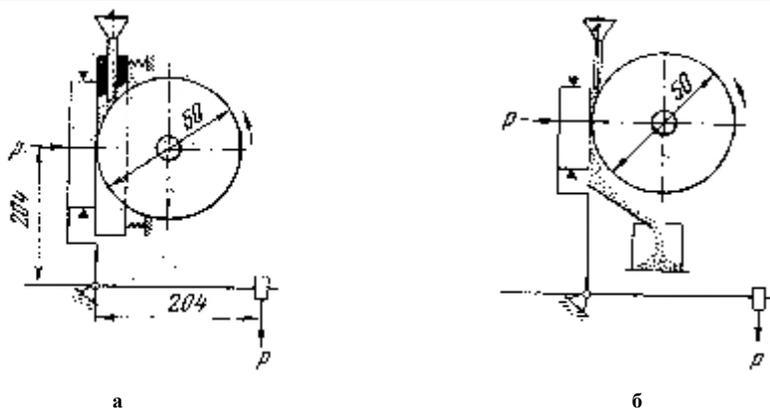


Рис. 1 – Схема испытания на изнашивание по Бринеллю на машине Б Института машиноведения

1. Испытание по Бринеллю.

Схема испытания на машине Б показана на рис. 1. На горизонтальном валу, вращающемся в конусных регулируемых подшипниках, закреплен металлический диск (из армо-железа или другого материала). Вал производится во вращение от электродвигателя постоянного тока с помощью ременной передачи; окружная скорость диска 4 м/мин. Образец зажимается в специальном четырехкулачковом патроне. Последний укреплен на планшайбе, позволяющей при помощи винтов устанавливать образец в вертикальной и горизонтальной плоскостях так, чтобы его плоская поверхность, касательная поверхности диска, проходила через ось, вокруг которой образец поворачивается при вытирании лунки.

Абразив в виде порошка определенной зернистости, предварительно просушенный в сушильном шкафу и затем просеянный, насыпается в бункер, откуда он поступает в воронку, имеющую калиброванное отверстие. Через отверстие воронки абразив в одном варианте просыпается в своеобразный приемник, ограниченный образом, цилиндрической поверхностью диска и двумя закрылками с боков; из этого приемника абразива попадает на трущиеся поверхности. В другом варианте приемник отсутствует, и часть абразива свободно просыпается с боков, минуя поверхности трения между диском и образцом. В обоих случаях абразива по наклонному желобу поступает в свободную коробку.

Детальное исследование факторов, влияющих на результаты испытаний по схеме Бринелля, изложено в работе [1]. При этом методе испытания износостойкость одного и того же материала зависит от свойства истирающего диска, а для разных испытуемых материалов и дисков от соотношения их твердостей.

2. Испытание по схеме Бринелля - Ховарта.

В 1949 году Ховарт (США) разработал метод испытания на изнашивание, сходный с методом Бринелля и отличающийся применением резинового диска вместо металлического. Исследование этого метода, проведенное в Институте машиноведения показало, что способ подачи абразива к поверхности трения по Ховарту является неудовлетворительным, поэтому была разработана новая схема, в которой сочетались резиновый диск по Ховарту и подачи абразива по Бринеллю. Новая схема, показанная на рис. 2 названа *Br - Hv* (Бринелль - Ховарт). К вращающемуся резиновому диску 1 под нагрузкой прижимается своей плоской стороной образец 3. Из бункера 2 через воронку и трубочку с калиброванным отверстием просыпается дозированное количество абразивных частиц (кварцевый песок), которые захватываются диском, и протискиваются им по поверхности образца.

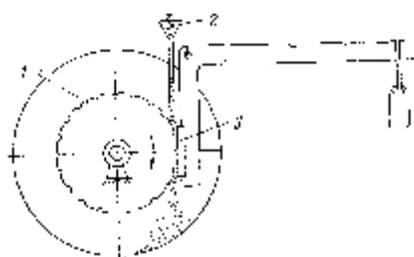


Рис. 2 – Схема испытания на изнашивание по Бринеллю-Ховарту, развитая Институтым машиноведения

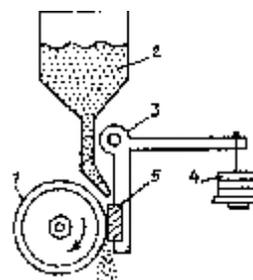


Рис.3 – Схема испытаний на износ по резине с сухим абразивом:
1 – резиновое колесо; 2 – абразив; 3 – рычаг;
4 – груз; 5 – образец

Износ определяется по потере веса образца при определенном количестве прошедшего абразива. В таких же условиях испытывается эталонный материал; относительная износостойкость определяется как отношение износом эталонного и испытуемого материалов.

Приведенные схемы конструкций метода испытаний на абразивный износ по схеме Бринелля-Ховарта были стандартизованы во многих странах.

3. Испытания на абразивный износ с помощью резинового колеса и сухого песка (ASTM G-65-83), ГОСТ 23.208 [2], (рис. 4).

В соответствии с этим стандартом проводят испытания, аналогичные регламентированным ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы». Отличие в том, что вместо резинового ролика применяют колесо, покрытое хлорбутиловой резиной (рис. 3). Частота вращения колеса 200 ± 10 об/мин. Нагрузка 45-130 Н, путь трения 71,8-4309 м, продолжительность испытаний 30 ± 5 мин, (рис. 3).

4. Метод испытаний на износ по схеме влажный песок - резиновое колесо (ASTM G-65-89) [2], (рис. 5).

Метод испытаний отличается от испытания на абразивный износ с помощью резинового колеса (ASTM G-65-83, рис. 3) тем, что образец изнашивают, погружая узел трения наполовину в смесь абразива с жидкостью (рис. 4). Диаметр обрешиненного колеса 178 мм. Скорость вращения колеса 245 ± 5 об/мин, нагрузка $224,4 \pm 3,6$ Н, продолжительность испытаний от 40 до 60 мин при 153°C .

5. Машины и установки для испытаний материалов при изнашивании о нежесткозакрепленные абразивные частицы [4].

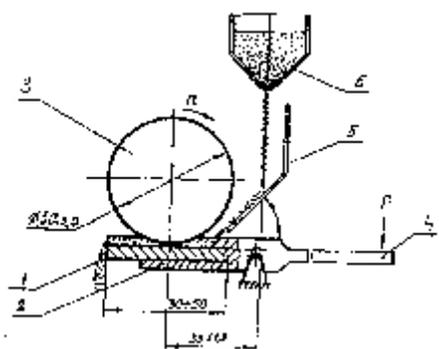


Рис. 4 – Схема испытаний при трении о незакрепленную абразивную (ГОСТ 23.208-79)

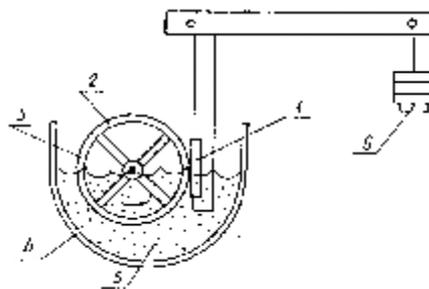


Рис. 5 – Схема испытаний на износ по резине с влажным абразивом:
1 – образец; 2 – колесо; 3 – резиновый обод;
4 – сосуд; 5 – смесь абразива с жидкостью; 6 – груз

1.3.1. Выводы по п.1.

Из краткого анализа истории развития метода испытаний по схеме Бринелля - Ховарта ($Br - Hv$) следует:

1. метод ($Br - Hv$) почти за 100 лет применения и развития получил широкое распространение и введен в стандарты ведущих стран в области трибологии.
2. Метод ($Br - Hv$) используется в основном как экспресс - метод для сравнительной оценки абразивной износостойкости металлических материалов.
3. По нашему мнению основным достоинством метода является его простота в реализации.
4. В то же время, очевидно, что сравнение абразивной износостойкости по методу ($Br - Hv$) является грубо приближенный характер результатов испытаний этим методом.

1.3.2. *Постановка задачи.* На основе выполненного анализа ставится задача по методу ($Br - Hv$) разработать теорию модели изнашивания металлов незакрепленным абразивом, с целью получения моделей изнашивания и определения их параметров для строгого количественного сравнения абразивной износостойкости металлов с учетом разных факторов.

2. Построение многофакторной обобщенной модели абразивного изнашивания

1⁰. В соответствии с методом теории подобия и размерностей (ТПР) на первом этапе составляется перечень всех определяемых и определяющих величин с их размерностями:

1) определяемой величиной будем считать интенсивность износа:

du_w / ds , где u_w , мм износ образца; s , мм путь трения частиц песка по образцу;

2) в качестве определяющих величин или основных факторов, влияющих на абразивный износ:

σ , кг/мм^2 – давление песка на образец;

HB , кг/мм² – твердость материала образца;

v , мм/с – скорость скольжения абразивных частиц по образцу;

δ , мм – размер абразивных частиц;

V_0 , мм²/с – кинематическая вязкость сыпучей среды (песка);

$\varepsilon = \frac{V_{\text{воды}}}{V_{\text{песка}}}$, мм³/мм³ [1] – отношение объема воды к объему песка в смеси; или

$$\frac{V_{\text{песка}}}{(V_{\text{воды}} + V_{\text{песка}})}, \text{ мм}^3/\text{мм}^3 [1];$$

T_c °С – температура абразивной смеси;

$T_{пл}$ °С – температура плавления металла образца;

R , мм – радиус цилиндра образца.

2⁰. На втором этапе по методу ТПР из определяющих и определяемых величин составляется безразмерные комплексы:

1) определяемый безразмерный комплекс – это интенсивность износа:

$$\Pi_w = \frac{du_w}{ds} = \text{мм/мм} [1]; \quad (2.1)$$

2) или износ на единицу пути трения:

$$\frac{u_w}{s} = \text{мм/мм} [1]; \quad (2.2)$$

3) из определяемых величин можно составить следующие безразмерные комплексы:

4) безразмерное давление:

$$\Pi_\sigma = \frac{\sigma}{HB} (\text{кг/мм}^2)/(\text{кг/мм}^2) [1]; \quad (2.3)$$

5) безразмерная скорость

$$\Pi_v = \frac{v\delta}{v_0} = ((\text{мм/с}) \cdot \text{мм})/(\text{мм}^2/\text{с}) [1]; \quad (2.4)$$

этот комплекс соответствует числу или критерию Рейнольдса;

6) объединенный комплекс:

$$\Pi_{\sigma v} = \frac{\sigma}{HB} \cdot \frac{v\delta}{v_0} [1]; \quad (2.5)$$

7) гомологическая температура в контакте:

$$\Pi_T = \frac{T_c}{T_{пл}} \text{ °C/°C} [1]. \quad (2.6)$$

3⁰. На третьем этапе метода ТПР

1) из эксперимента устанавливается зависимость между безразмерными комплексами, играющими роль критериев подобия;

2) в качестве основной формы зависимости между безразмерными критериями выбираем функцию вида:

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \left(\frac{\sigma}{HB} \right)^m \left(\frac{v\delta}{v_0} \right)^n \varepsilon^k; \quad (2.7)$$

3) задавшись базовыми значениями определяющих величин, HB_δ , δ_δ , v_0 проводим испытания и принимаем зависимость (2.7) в форме:

$$\frac{du_w}{ds} = k'_w \sigma^m v^n \varepsilon^k; \quad (2.8)$$

4) в качестве первого варианта модели можно принять $\varepsilon = 1$ (сухой песок), $v = v_\delta$, $n = 1$, тогда

$$\frac{du_w}{ds} = k'_w \sigma^m. \quad (2.9)$$

3. Контактное взаимодействие цилиндра, покрытого резиной и плоскости с учетом абразивного износа

3.1. Общая постановка задачи

1⁰. Расчетная схема

1) рассматривается контактное взаимодействие жесткого вращающегося цилиндра радиуса R , покрытого изнашивающимся слоем резины и жесткой изнашиваемой плоской поверхностью.

Между цилиндром и плоскостью располагается тонкий слой абразива (песок), так, что на распределение давлений абразив не оказывает существенного влияния.

2) в процессе изнашивания плоскости функция пути трения. При этом давление $\sigma(s)$ меняется размер $2\bar{a}$ образующейся площадки контакта. Так, что $a(s)$ также непрерывно изменяется.

3) ставится задача по результатам испытаний определить параметры k_w , m модели изнашивания (2.9).

3.2. Математическая постановка задачи:

1) *допущение*: будем полагать, что в любой момент времени и пути трения распределение давления по площадке контакта $\sigma(s)$ равномерным;

2) тогда *условие равновесия* в контакте может быть записано в виде:

$$Q = \sigma(s) = 2a(s)\sigma, \quad (3.1)$$

или
$$\sigma(s) = \frac{Q}{2a(s)\sigma}; \quad (3.2)$$

3) из геометрических соотношений *условие сплошности* в контакте может быть записано в виде

$$u_w(s) = u(s), \quad (3.3)$$

или
$$u_w = \frac{a^2(s)}{2R}; \quad (3.4)$$

4) наконец *закономерность изнашивания* в каждой точке контакта принимаем в дифференциальной форме типа (2.9):

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m, \quad (3.5)$$

или в интегральной форме при давлении независимом от пути трения:

$$u_w = k_w \sigma^m s, \quad (3.6)$$

где k_w , m – параметры модели, подлежащие определению;

5) полагаем, что из эксперимента определена зависимость размера a площадки контакта от пути трения:

$$a = a(s), \quad (3.7)$$

в частности при $a(s=0) = a_0 = 0$ зависимость $a(s)$ представлена в виде степенной функции:

$$a(s) = cs^\beta. \quad (3.8)$$

Таким образом, общая постановка контактной задачи о взаимодействии с износом цилиндра и плоской поверхности описывается системой уравнений

- равновесия (3.2)
- сплошности в контакте (3.4)
- изнашивания в точке (3.5)
- экспериментальной зависимости (3.8)

Задача состоит в определении параметров k_w , m из этой системы.

3.3. Решение обратной контактной задачи при условии $a_0 = 0$:

1) интегрируя (2.14) по пути трения при давлении $\sigma(s)$, зависящем от пути трения, получаем:

$$u_w = k_w \int_0^s (\sigma(s))^m ds; \quad (3.9)$$

2) подставляя (3.2) и (3.4) в (3.9), получаем:

$$\frac{a^2(s)}{2R} = k_w \int \frac{(Q/2\epsilon)}{a^m(s)} ds; \quad (3.10)$$

3) с учетом зависимости (3.8) из (3.10) имеем:

$$\frac{c^2 s^{2\beta}}{2R} = k_w \int \frac{(Q/2\epsilon)^m}{c^m s^{\beta m}} ds; \quad (3.11)$$

4) после интегрирования получаем одно нелинейное уравнение с двумя неизвестными k_w, m :

$$\frac{c^{2+m} s^{2\beta}}{2Rk_w (Q/(2\epsilon))^m} = \frac{s^{1-\beta m}}{1-\beta m}; \quad (3.12)$$

5) из условия выполнимости этого уравнения при любых значениях пути трения s следует решение в виде:

$$2\beta = 1 - \beta m, \quad (3.13)$$

отсюда

$$m = \frac{1 - 2\beta}{\beta}, \quad (3.14)$$

6) второй параметр модели k_w определяем с учетом (3.14) из (3.12):

$$k_w = \frac{c^{m+2}\beta}{R(Q/(2\epsilon))^m}. \quad (3.15)$$

3.4. Решение прямой контактной задачи при условии $a_0 \neq 0$

1⁰. Постановка задачи

1) Прямая контактная задача состоит в определении размера $a(s)$ площадки контакта при заданных параметрах k_w, m модели изнашивания и пути трения s для изнашиваемых точек плоскости;

2) математическая постановка прямой задачи состоит из модели изнашивания в форме (3.5)

$$3) \quad \frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m; \quad (3.5)$$

4) условия сплошности типа (3.4):

$$u_w = \frac{a^2(s)}{2R}; \quad (3.4)$$

5) условия равновесия типа (3.2):

$$\sigma(s) = \frac{Q}{2a(s)\epsilon}. \quad (3.2)$$

2⁰. Решение прямой задачи состоит из следующих этапов:

1) дифференцируя условия сплошности (3.4) по пути трения s , имеем:

$$\frac{du_w}{ds} = a(a) \frac{da(s)}{Rds}; \quad (3.16)$$

2) приравнявая (3.5) и (3.16), имеем:

$$k_w \sigma^m = a(a) \frac{da(s)}{Rds}, \quad (3.17)$$

отсюда:

$$\sigma^m = \frac{a(s)}{Rk_w} \frac{da(s)}{ds}, \quad (3.18)$$

3) далее, приравнявая (3.18) и (3.2), получаем:

$$\left(\frac{Q}{2a\epsilon} \right)^m = \frac{a}{Rk_w} \frac{da}{ds}, \quad (3.19)$$

или

$$(Q/(2a\epsilon))^m = Rk_w \frac{a^{m+1} da}{ds}; \quad (3.20)$$

4) это обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными;

5) интегрируя (3.20), получаем:

$$\frac{a^{m+2}}{m+2} = (Q/(2a\epsilon))^m Rk_w s + c, \quad (3.21)$$

6) при $a(s=0) = 0$ имеем $c = 0$, имеем решение:

$$a^{m+2} = (m+2)(Q/2\epsilon)^m Rk_w s; \quad (3.22)$$

7) при $a(s=0) = a_0 \neq 0$

$$c = \frac{a_0^{m+2}}{m+2}; \quad (3.23)$$

8) решение (3.21) принимает вид:

$$a^{m+2} - a_0^{m+2} = (m+2)(Q/2\epsilon)^m Rk_w s. \quad (3.24)$$

3.5. Решение обратной задачи для случая $a_0 \neq 0$

1) для определения двух параметров k_w , m модели при использовании одного уравнения (3.24) два уравнения можно получить, записав его для двух точек:

$$(a_1, s_1), (a_2, s_2);$$

2) система двух уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} a_1^{m+2} - a_0^{m+2} &= (m+2)(Q/(2\epsilon))^m k_w s_1; \\ a_2^{m+2} - a_0^{m+2} &= (m+2)(Q/(2\epsilon))^m k_w s_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

3) из решения этой системы получаем одно нелинейное алгебраическое уравнение относительно параметра m

$$\frac{(a_1/a_0)^{m+2} - 1}{(a_2/a_0)^{m+2} - 1} = \frac{s_1}{s_2}; \quad (3.26)$$

4) решая это уравнение численно итерационным методом находим параметр m ;

5) второй параметр находим, например, из первого уравнения (3.25):

$$k_w = \frac{a_1^{m+2} - a_0^{m+2}}{(m+2)(Q/2\epsilon)^m s_1}. \quad (3.27)$$

Выводы по части I

1. Выполнен анализ состояния метода испытаний на абразивный износ по схеме Бринелля-Ховарта ($Br - Hv$).

2. Из анализа следует, что традиционно по методу $Br - Hv$ получают данные для приближенного сравнения абразивной износостойкости металлов о незакрепленный абразив; модели изнашивания при этом не строятся.

3. Предложена безразмерная многофакторная обобщенная модель абразивного изнашивания незакрепленным абразивом.

4. На основе решений прямой и обратной контактных задач для взаимодействия цилиндра и плоскости с износом получены расчетные зависимости для определения параметров модели изнашивания металла незакрепленным абразивом.

5. Определена принципиальная процедура испытаний и определение параметров моделей изнашивания.

6. Пример практического применения методики испытаний и определения параметров модели приведен в части II работы.

Литература

1. Хрушев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
2. Куксенова Л.И., Лантева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ. – М.: Интермет, 2001. – 152 с.
3. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов / Справочник. М.: Машиностроение, 2008. – 384 с.
4. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость материалов. К.: Техника, 1989. – 128 с.
5. ТЕ Многоцелевой анализатор абразивного истирания «песок на колесе». – Internet. Soc-trede.com/equipment.