
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING AND DIAGNOSING
MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT**

УДК 921.01
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1060-1066

ОЦЕНКА ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ИЗНОС МЕТОДОМ ХОРДЫ

Л. В. ЕФРЕМОВ^{1*}, А. В. ТИКАЛОВ²

¹ *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
**levlefr@mail.ru*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Предложен метод оценки твердости материалов путем испытаний их образцов на износ методом хорды („block-on-ring“). В его основу положены принципы определения твердости на стационарных твердомерах и результаты ранее выполненного анализа корреляционной зависимости твердости по Моосу от износостойкости материалов. Такие зависимости получены путем измерений хорды сегмента износа, обусловленного врезанием диска в плоский образец, для выборочной совокупности материалов в широком диапазоне значений твердости.

Ключевые слова: износ, износостойкость, образец, оценка, сегмент, тестирование, трение, хорда, block-on-ring

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Оценка твердости материалов при испытании на износ методом хорды // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 12. С. 1060—1066. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1060-1066.

EVALUATION OF MATERIAL HARDNESS USING WEAR TESTING BY CHORD METHOD

L. V. Efremov^{1*}, A. V. Tikalov²

¹ *Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia*
**levlefr@mail.ru*

² *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

Abstract. A new method for assessing the hardness of materials by testing their samples for wear by the chord method (“block-on-ring”) is proposed. It is based on the principles of determining hardness with stationary hardness testers and results of a previously performed analysis of the correlation dependence of Mohs hardness on the material resistance to wear. Such dependencies are obtained by measuring the wear segment chord from cutting a disk into a flat sample for a selective set of materials in a wide range of hardness.

Keywords: wear, wear resistance, sample, evaluation, segment, testing, friction, chord, block-on-ring

For citation: Efremov L. V., Tikalov A. V. Evaluation of material hardness using wear testing by chord method. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 12. P. 1060—1066 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-1060-1066.

В последнее время износостойкость материалов активно оценивается с помощью метода хорды „block-on-ring“ [1]. В настоящей работе рассматривается применение этого метода

© Ефремов Л. В., Тикалов А. В., 2023

для трибометра СМЦ-2 [2] с узлом трения, состоящим из кольца или диска диаметром $D = 50$ мм и прямоугольного бруска (блока) шириной $H = 10$ мм. На брусок действует постоянная сила $F = 200$ Н, а кольцо вращается с частотой $n = 100$ об/мин. За время сеанса испытаний $t = 10$ мин кольцо врезается в плоскую поверхность бруска, образуя объемный износ W (мм³) в виде сегмента с хордой L (мм). При этом кольцо совершает $C = n \cdot t = 1000$ циклов вращения и проходит путь $S = \pi DC = 157\,079,6$ мм относительно образца.

На рис. 1, а представлена схема вырезания лунки на поверхности плоского бруска (h — глубина сегмента при угле хорды φ); на рис. 1, б приведены фотографии исследуемых брусков, выполненных из различных материалов. Хорда является основным диагностическим параметром испытаний, от которого зависят все остальные параметры, приведем формулы их расчета (для указанных выше значений D , H , F , n и t) с приемлемой погрешностью менее 3 % для испытаний при граничном трении [3]:

— путь трения

$$S = \pi D n t = \pi D C = 157\,079,6 \text{ мм}; \quad (1)$$

— линейный износ

$$h = L^2 / (6 D) = L^2 / 300 \text{ мм}; \quad (2)$$

— пятно контакта

$$B = L H = 10 L \text{ мм}^2; \quad (3)$$

— удельное давление

$$P = F / B = F / (L H) = \frac{20}{L} \text{ МПа}; \quad (4)$$

— объемный износ

$$W = L^3 H / (6 D) = h L H = h B = 0,033 L^3 \text{ мм}^3; \quad (5)$$

— объемная износостойкость

$$\varepsilon_w = F S / W = F 6 \pi D^2 C / (1000 L^3 H) = 9,42 \cdot 10^5 / L^3 \text{ Нм/мм}^3; \quad (6)$$

— линейная износостойкость

$$\varepsilon_L = S / h = 1000 \varepsilon_w / P = 4,71 \cdot 10^7 / L^2 \text{ мм/мм}. \quad (7)$$

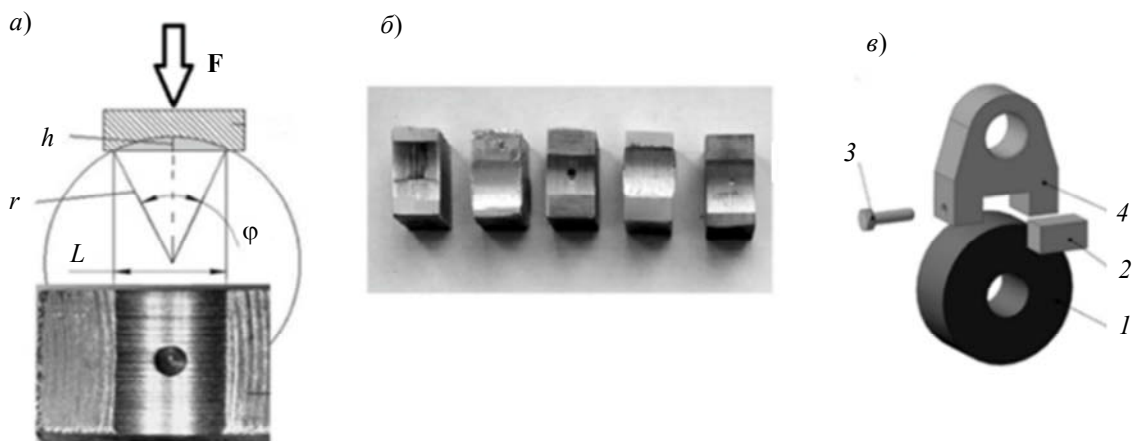


Рис. 1

Поставленная в настоящей работе задача сводится к обоснованию корреляционных зависимостей твердости по шкале Мооса θ от указанных в формулах (1)—(7) параметров, полученных путем испытаний на износ ряда материалов [4].

Испытания материалов на износ методом хорды выполнялась при следующих условиях,

Условие № 1. Спроектировать, изготовить и установить на трибометр СМЦ-2 пару трения по эскизу рис. 1, в, где исследуемый брусок 2 размещается в держателе специальном 4 и

фиксируется винтом стопорным 3. При этом брусок (длиной 20 и шириной 10 мм) опирается на диск 1 (диаметром 50 мм и высотой 25 мм) под нагрузкой $F = 200$ Н. Твердость материала диска должна быть больше, чем у бруска.

Условие № 2. Обеспечить работу этого устройства для двух вариантов скольжения: при граничном и абразивном трении. Граничное трение создается за счет погружения нижней части диска в ванну, наполненную маслом, при гладких контактных поверхностях диска и бруска (рис. 2, а). Сухое абразивное трение обеспечивается наклеиванием на диск мелкозернистой абразивной шкурки с размером зерна 25 мкм (рис. 2, б; 1 — брусок, 2 — диск, 3 — масло, 4 — шкурка).

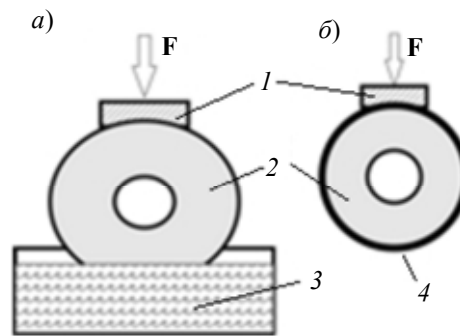


Рис. 2

Условие № 3. Провести испытания на износ ряда образцов материалов при граничном и абразивном трении с соблюдением принципа неизменности стандартного режима испытаний: $D = 50$ мм, $H = 10$ мм, $F = 200$ Н, $n = 100$ об/мин, $t = 10$ мин и $C = 1000$ циклов. Выбрать материалы с показателем твердости НВ от 20 до 1000 МПа.

Условие № 4. Измеряемым параметром испытаний принять размер хорды L , который позволяет рассчитать значения S , h , B , P , W , ε_L и ε_W каждого образца по формулам (1)–(7). При изучении абразивного трения применяются те же формулы, но при $L \approx L_a / 3$ (где L_a — фактической размер хорды).

Результаты определения хорды и остальных параметров испытаний при граничном трении для восьми материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний и расчет параметров по формулам (1)–(7)

Материал	L , мм	h , мм	P , Н/мм ²	ε_L , мм/мм	ε_W , Нм/мм ³	θ	НВ, МПа
Олово О1	12,1	0,466	1,653	321862	532	1,8	23
Алюминий 1	4,1	0,056	4,878	2797864	13648	3,1	93
Алюминий 2	4,33	0,062	4,619	2518072	11631	3,02	87
Медь МЗр	4,1	0,056	4,878	2803325	13675	3,1	92
Сталь 40	2,53	0,021	7,905	7362072	58198	3,95	172
Сталь 08Х	1,5	0,007	13,333	20943951	279253	5,13	338
Сплав ВК	1,11	0,004	18,018	38246806	689132	5,96	495
Керамика	0,63	0,001	31,746	118729881	3769203	7,92	1000

Значения твердости по шкалам Мооса (θ) и Бринелля (НВ) вычислены по обоснованным ниже корреляционным зависимостям от параметров испытаний (расчет выполнен для самого твердого материала с хордой $L = 0,63$ мм):

$$\theta(L) = 6,26 / \sqrt{L}, \quad (8)$$

$\theta(0,63) = 7,912$ — рассчитанное значение на 0,10 % меньше экспериментально полученного (7,92);

$$\theta(P) = 1,4 \sqrt{P}, \quad (9)$$

$\theta(32) = 7,92$ — рассчитанное значение совпадает с экспериментально полученным;

$$\theta(\varepsilon_L) = 0,075\sqrt[4]{\varepsilon_L}, \quad (10)$$

$\theta(1,187 \cdot 10^8) = 7,83$ — рассчитанное значение на 1,14 % меньше экспериментально полученного (7,92);

$$\theta(\varepsilon_W) = 0,632\sqrt[6]{\varepsilon_W}, \quad (11)$$

$\theta(3,77 \cdot 10^6) = 7,88$ — рассчитанное значение на 0,51 % меньше экспериментально полученного (7,92);

$$HB(\varepsilon_L) = 7 \cdot 10^{-3} \varepsilon_L^{0,639}, \quad (12)$$

$HB(1,187 \cdot 10^8) = 1011$ — рассчитанное значение на 1,1 % больше экспериментально полученного (1000);

$$HB(\theta) = 5\theta^{2,56}, \quad (13)$$

$HB(7,92) = 999$ — рассчитанное значение на 0,10 % меньше экспериментально полученного (1000).

Как видно из (8)—(13), все функции твердости материала являются степенными типа $\theta(X) = aX^b$. При этом аргументы X , определенные экспериментальным путем, нам известны и представлены в табл. 1. Это позволяет перейти к обоснованию функции $\theta(X)$ для соответствующих материалов с учетом зависимости уровня твердости по шкале Мооса от вида материала [5]. Они приведены в табл. 2,

Таблица 2

Уровень твердости по Моосу

Материал	θ	Материал	θ	Материал	θ
Алмаз	10	Медь	3	Магний	2,1
Хром	9	Алюминий	2,9	Олово	1,8
Вольфрам	7	Серебро	2,7	Свинец	1,6
Никель	5	Цинк	2,5	Калий	0,6
Платина	4,3	Золото	2,6	Натрий	0,4
Железо	4	Кальций	2,2		

Решим эту задачу методом наименьших квадратов (МНК) на примере обоснования функции (8) в редакторе Mathcad. Решение состоит из ряда операций.

Операция 1. Составить матрицу исходных данных ρ , состоящую из зависимых и независимых векторов. К зависимым относится вектор ρ^0 (функция) уровня твердости по Моосу θ . Независимые векторы ρ^2 — ρ^5 являются аргументами функции L , ε_L , P и ε_W , для каждого из которых обосновывается соответствующая функция [6].

ρ^0	ρ^1	ρ^2	ρ^3	ρ^4	ρ^4
θ	HB, МПа	L , мм	ε_L , мм/мм	P , Н/мм ²	ε_W , Н·м/мм ³
1,8	20	12,6	321862	1,653	532
3,0	100	4,1	2797864	4,878	13648
4,0	200	2,53	7362072	7,905	58198
5,0	300	1,5	20943951	13,333	279253
6,0	500	1,11	38246806	18,018	689132
8,0	1000	0,63	118729881	31,746	3769203

Операция 2. Поскольку все функции являются степенными, то сначала надо перевести в линейную функцию их логарифмы (логарифмическая анаморфоза), а затем найти параметры степенной функции a и b . Операция показана для векторов ρ^2 (хорда L) и ρ^0 (твердость по Моосу θ).

Логарифмическая анаморфоза степенной функции:

$$X = \log(\rho^2) \quad Y = \log(\rho^0).$$

Операция 3. Задача оценки параметров линейной функции $Y(X)$ решается МНК с помощью оператора $\text{line}(X, Y)$ в редакторе Mathcad с последующей оценкой $a = 10^{0,8} = 6,26$ и $b = -0,5$.

Оценка постоянных уравнения регрессии:

$$\text{line}(X, Y) = \begin{pmatrix} 0,8 \\ -0,5 \end{pmatrix}; \quad a = 10^{0,8} = 6,26; \quad b = -0,5.$$

Операция 4. Запись вида функции $\theta(L)$, полученной с высоким коэффициентом корреляции corr .

Регистрация функции $\theta(L)$:

$$\theta(L) = \frac{6,26}{\sqrt{L}}; \quad \text{corr}(\theta(\rho^2), \rho^0) = -1.$$

Операция 5. Преобразование функции $\theta(\varepsilon_W)$ для объемной износостойкости ε_W . Здесь показана взаимосвязь всех функций $\theta(X)$ для каждого исследуемого материала на примере доказательства получения функции $\theta(L)$ для хорды L .

Второй вариант обоснования функции $\theta(L)$:

$$\theta(\varepsilon_W) = 0,632 \sqrt[6]{\frac{6\pi F D^2 C}{H L^3 10^3}} = \frac{6,26}{\sqrt[6]{L^3}} \rightarrow \frac{6,26}{\sqrt{L}} = \theta(L).$$

В заключение следует отметить, что функция (13) для твердости по Бринеллю $\text{HB}(\theta)$ получена тем же МНК, но для векторов $\rho^1 - \rho^0$.

На основании приведенного выше обоснования нового метода представляется целесообразным представить основные рекомендации по его использованию. Прежде всего следует выполнить условия № 1 и 2 по конструкции и видам пар граничного и абразивного трения. Это относится как к испытаниям одного конкретного материала, так и к серии испытаний образцов по мере совершенствования технологии его создания.

Важнейшим правилом оценки твердости исследуемого материала с приемлемой достоверностью является соблюдение условия № 3 о неизменности стандартного режима испытаний. При этом допускается устанавливать частоту и время испытаний исходя из принципа $C = nt = 1000$ циклов, например $n = 100$ об/мин и $t = 10$ мин или $n = 200$ об/мин и $t = 5$ мин.

Для расчета трибологических параметров, зависящих от длины хорды L , рекомендуется составить простую программу в редакторе EXCEL по формулам (1)—(7). Так же следует поступить для расчета функций твердости $\theta(L)$, $\theta(P)$, $\theta(\varepsilon_L)$, $\theta(\varepsilon_W)$, $\text{HB}(\varepsilon_L)$ и $\text{HB}(\theta)$ по формулам (8)—(13).

Это позволит оперативно оценивать твердость по шкалам Мооса и Бринелля после измерения хорды на электронном микроскопе. Как показано в п. Операция 5, для известной хорды при расчете по всем функциям (8)—(11) будет получен один и тот же результат. Поэтому допустимо сразу после испытаний ограничиться расчетом $\theta(L)$ по простейшей формуле

(8), а затем оценить $HV(\theta)$ по формуле (13). Например, для $L = 4,1$ получаем: $\theta(4,1) = 6,26 / \sqrt{4,1} = 3,09$ и $HV(3,09) = 5 \cdot 3,09^{2,56} = 89,80$, что примерно соответствует твердости алюминия.

Рассмотренные выше методы и алгоритмы могут быть использованы при разработке электронных средств для автоматического визуального измерения хорды L с последующим расчетом и демонстрацией результатов оценки твердости по шкалам Мооса $\theta(L)$ и Бринелля $HV(\theta)$ на табло прибора [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-ring Wear Test, norm G77–05 (Reapproved 2010), ASTM International, United States. DOI: 10.1520/G0077-05R10.
2. Сафонов Б. П., Лысюк А. Я., Лукиенко Л. В. Лабораторные работы по курсу „Основы трения и изнашивания элементов трибомеханических систем оборудования“. Новомосковск: РХТУ им. Д. И. Менделеева, Новомосковский институт, 2000. 26 с.
3. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Алгоритмы диагностики пар трения скольжения. СПб: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. 220 с.
4. Musalimov V. M., Nuzhdin K. A. Modelling of External Dynamics of Frictional Interaction Using the Elastic System Stability Theory // Journal of Friction and Wear. 2019. Vol. 40, N 1. P. 51—57.
5. Твердость металлов определение: Методы определения твердости металла [Электронный ресурс]: <<https://beton-feodosiya.ru/raznoe/tverdost-metallov-opredelenie-metody-opredeleniya-tverdosti-metalla.html>>.
6. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Моделирование взаимосвязи твердости и ИС материалов при их сравнительном тестировании методом „block-on-ring“ // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 297—302. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-297-302.
7. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.

Сведения об авторах

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория трения и износа; гл. научный сотрудник; E-mail: levlefr@mail.ru
- Андрей Владимирович Тикалов** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Поступила в редакцию 29.08.2023; одобрена после рецензирования 08.09.2023; принята к публикации 27.10.2023.

REFERENCES

1. Standard Test Method for Ranking resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-ring Wear Test, norm G77–05 (Reapproved 2010), ASTM International, United States.
2. Safonov B.P., Lysyuk A.Ya., Lukienko L.V. *Laboratornyye raboty po kursu "Osnovy treniya i iznashivaniya elementov tribomekhanicheskikh sistem oborudovaniya"* (Laboratory Work on the Course "Fundamentals of Friction and Wear of Elements of Tribomechanical Equipment Systems"), Novomoskovsk, 2000, 26 p. (in Russ.)
3. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Algoritmy diagnostiki par treniya skol'zheniya* (Algorithms for Diagnosing Sliding Friction Pairs), St. Petersburg, 2023, 220 p. (in Russ.)
4. Musalimov V.M., Nuzhdin K.A. *Journal of Friction and Wear*, 2019, no. 1(40), pp. 51–57.
5. <https://beton-feodosiya.ru/raznoe/tverdost-metallov-opredelenie-metody-opredeleniya-tverdosti-metalla.html>. (in Russ.)
6. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, no. 2(21), pp. 297–302, DOI:10.17586/2226-1494-2021-21-2-297-302. (in Russ.)
7. Efremov L.V. *Problemy upravleniya nadezhnostno-oriyentirovannoy tekhnicheskoy ekspluatatsiyey mashin* (Problems of Managing Reliability-Oriented Technical Operation of Machines), St. Petersburg, 2015, 206 p. (in Russ.)

Data on authors

- Leonid V. Efremov** — Dr. Sci., Professor; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Friction and Wear; Chief Researcher;
E-mail: levlefr@mail.ru
- Andrey V. Tikhlov** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design Basics;
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Received 29.08.2023; approved after reviewing 08.09.2023; accepted for publication 27.10.2023.