

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-297-302

УДК 921.01

Моделирование взаимосвязи твердости и износостойкости материалов при их сравнительном тестировании методом «block-on-ring»

Леонид Владимирович Ефремов¹, Андрей Владимирович Тикалов²

¹ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

³ АО «Компрессор», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

¹ levlefr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2372-8403>

^{2,3} tikalov2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8821-916X>

Аннотация

Предмет исследования. Впервые рассмотрена новая модель учета твердости материалов в упрощенном алгоритме оценки их износостойкости методом «block-on-ring» при испытаниях на машине трения. Данная работа имеет актуальное значение для изучения влияющих факторов на износ и является продолжением совершенствования указанного метода на основе рядов Тейлора и результатов тестирования ряда материалов в широком диапазоне твердости. **Метод.** Проблема решена путем корреляционного анализа зависимости твердости материалов по шкале Мооса от экспериментальных параметров износа, включая объемную износостойкость этих материалов. **Основные результаты.** Разработано полное программное обеспечение для реализации упрощенного варианта метода «block-on-ring» при испытаниях материалов на износ с учетом их твердости. Подтверждена высокая корректность и эффективность предложенной модели на примере увеличения твердости композита политетрафторэтилена с наполнением ультрадисперсным алмазом. **Практическая значимость.** Предложенная и обоснованная в настоящей работе модель взаимосвязи износостойкости и твердости материалов готова к применению при их испытаниях методом «block-on-ring» в производственных условиях.

Ключевые слова

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

Ссылка для цитирования: Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Моделирование взаимосвязи твердости и износостойкости материалов при их сравнительном тестировании методом «block-on-ring» // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 297–302. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-297-302

Modeling the relationship between the hardness and wear resistance of materials during their comparative testing by the “block-on-ring” method

Leonid V. Efremov¹, Andrey V. Tikalov²

¹ Institute for Problems in Mechanical Engineering RAS, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

³ JSC “Compressor”, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

¹ levlefr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2372-8403>

^{2,3} tikalov2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8821-916X>

Annotation

The authors propose a novel model accounting for the hardness of materials in a simplified algorithm in order to evaluate their wear resistance by the “block-on-ring” method during tests on a friction machine. This work is relevant for the study of the factors influencing wear and continues to improve this method based on the Taylor series and the testing results for a number of materials in a wide range of hardness. The problem is solved by correlation analysis of the dependence of the hardness of materials on the Mohs scale on the experimental wear parameters, including the volumetric wear resistance of these materials. A complete software that has been developed implements a simplified version of the “block-on-ring” method for wear testing of materials, taking into account their hardness. The high correctness and efficiency of the proposed model is confirmed by the increasing hardness of a polytetrafluoroethylene composite filled with ultrafine

© Ефремов Л.В., Тикалов А.В., 2021

diamond. Practical significance. The model of the relationship between the wear resistance and the hardness of materials proposed and justified in the paper is ready for use in their tests by the "block-on-ring" method in production conditions.

Keywords

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

For citation: Efremov L.V., Tikalov A.V. Modeling the relationship between the hardness and wear resistance of materials during their comparative testing by the "block-on-ring" method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 297–302 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-297-302

Введение

При испытаниях материалов на износ широкое применение получил метод «block-on-ring» по международному стандарту ASTM G77¹. Например, он использовался учеными КНР [1] для оценки влияния на объемную интенсивность изнашивания композита на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) процента наполнения ультрадисперсным алмазом (УФД). При этом вопрос об измерении твердости материала не ставился ввиду отсутствия соответствующей методики.

Рассматриваемый в работе способ является одним из эффективных направлений испытания материалов на износ методом искусственных баз [2–6]. Сущность метода «block-on-ring» была изучена и получила развитие в процессе исследований на машине трения СМЦ 2 [7–10]. Как показано на рис. 1, исследуемая пара трения состоит из кольца (или диска) 1 радиусом r и прямоугольного плоского бруска (блока) 2 шириной H_L . Брусок помещается в гнездо держателя 4 и фиксируется винтом 3.

На брусок действует постоянная нагрузка F , а кольцо вращается с частотой n (рис. 2, а) [7–10]. В процессе испытаний кольцо врезается в плоскую поверхность бруска, образуя износ в виде сегмента с хордой длиной L за время сеанса испытаний t . Как видно на рис. 2, b длина хорды L просто и точно определяется любым мерительным инструментом. При этом она является аргументом всех функций, входящих в алгоритм расчета упрощенного варианта метода «block-on-ring».

При проведении испытаний установлено, что длина хорды L зависит от твердости материала. У мягких материалов размер L заметно больше (например, у олова $L = 12$ мм), чем у твердых (например, у закаленной стали $L = 1,5$ мм). На основании этого была поставлена задача установить зависимость характеристик износа (включая, износостойкость) от твердости материала, результаты решения которой рассмотрены в настоящей работе.

Упрощенный алгоритм метода «block-on-ring»

Целью исследования трибологических параметров по стандарту ASTM G77 является оценка объемной износостойкости:

$$\varepsilon_W = \frac{A_f}{W} = \frac{FS}{H_L L^3 / 12r} = \frac{FS}{H_L L h} = 1000 P \varepsilon_L, \quad (1)$$

где A_f — работа трения, Н·м; W — объем продуктов износа, мм³; F — нагрузка, Н; $S = 2 \pi r n t / 10^6$ — путь трения, км; $L H_L$ — площадь пятна контакта, мм²; r — радиус, мм; t — время сеанса испытаний, мин; P — удельное давление, МПа; ε_L — линейная износостойкость, км/мм; h — линейный износ, мм, который рассчитывается по формуле

$$h = \frac{W}{L H_L} = \frac{H_L L^3}{12r(L H_L)} = \frac{L^2}{12r}. \quad (2)$$

В отечественной практике чаще применяется ε_L , которая рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_L = \frac{S}{10^6 h} = \frac{2 \pi r c v}{10^6 h} = \frac{24 \pi}{10^6} c v \left(\frac{r}{L} \right)^2, \quad (3)$$

где $c v = n t$ — число циклов;

интенсивность изнашивания определяется по формуле

$$I_W = 1/\varepsilon_W. \quad (4)$$

Важной характеристикой процесса изнашивания является удельное давление

$$P = \frac{F}{L H_L}. \quad (5)$$

Путем разложения в ряд Тейлора исходных геометрических формул удалось образовать упрощенный вариант алгоритма в виде простых рабочих функций параметров износа от длины хорды L [10]. Они позволяют оценивать основные параметры износа с погрешностью не более 2 % по формулам (1)–(5) для

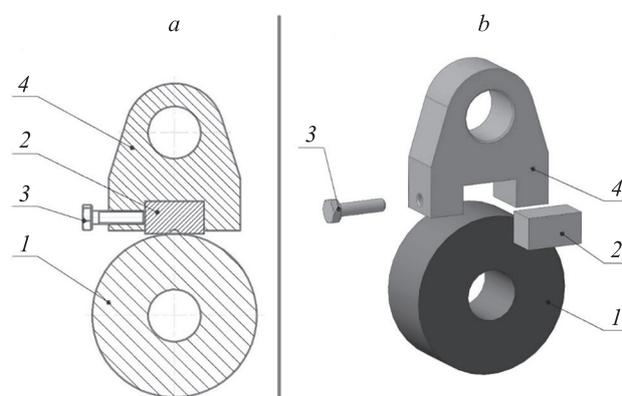


Рис. 1. Элементы устройства пары трения типа «block-on-ring» применительно к машине трения СМЦ-2 в форматах 2D (а) и 3D (b)

Fig. 1. Elements of the block-on-ring friction pair device for the tripod SMTs-2 machine in 2D (a) and 3D (b) formats

¹ ASTM G77 Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.astm.org/Standards/G77.htm> (дата обращения: 03.03.2021).

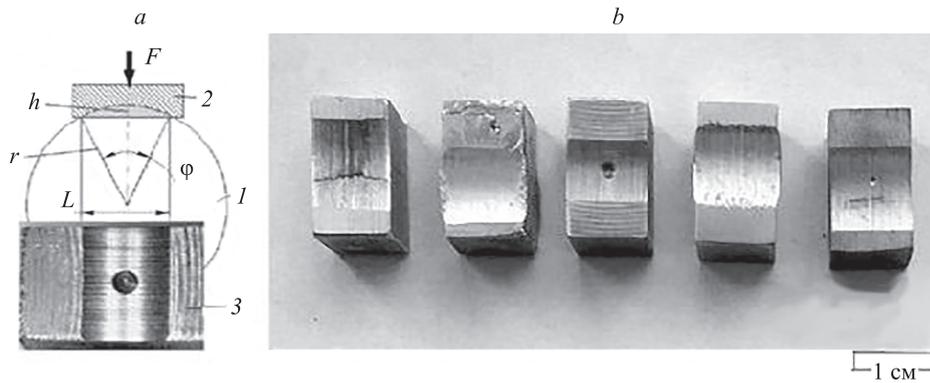


Рис. 2. Образование хорды: схема врезания лунки в поверхность плоского бруска, где L — длина хорды, образованная на поверхности плоского бруска; r — радиус диска; h — износ при угле хорды φ ; l — диск; 2 — брусок; 3 — образец с лункой (а); снимок исследуемых брусков из различных материалов (б)

Fig. 2. Chord formation: the scheme of cutting the hole into the surface of a flat bar; L — the length of the chord formed on the surface of a flat bar; r — the radius of the disk; h — wear at the angle of the chord φ ; l — the disk; 2 — the bar; 3 — the sample with the hole (a); a picture of the studied bars made of various materials (b)

расчета износа, давления, линейной износостойкости, объемной износостойкости и объемной интенсивности изнашивания с учетом L .

Если при испытаниях на износ применяется весовой метод, то в качестве измеряемого параметра принимают накопленную массу продуктов износа G за время t .

Перед началом дальнейшего расчета величин (1)–(5) можно определить длину хорды L по формуле

$$L = \sqrt[3]{\frac{12rG}{\gamma H_L}}, \quad (6)$$

где γ — плотность материала, мг/мм³; G — накопленная масса продуктов износа, мг.

Для подтверждения эффективности упрощенного варианта «block-on-ring» проведены сравнительные испытания на износ 14 образцов разных материалов в широком диапазоне их твердости [7–10]. Испытания их на износ выполнялись на машине трения СМЦ-2 при следующих условиях: $r = 25$ мм, $H_L = 10$ мм, $F = 200$ Н, $n = 100$ об/мин, $t = 10$ мин и $cv = 1000$ циклов, которые далее рассматриваются как образцовые. Такое решение связано с обоснованием всех функций от твердости именно при этих условиях.

Первые четыре образца (сталь, чугун, медь и алюминий) испытывались при абразивном износе от наклеенной на диск абразивной шкурки Р600. Остальные 9 образцов разных материалов изнашивались при граничном трении о гладкую поверхность диска со смазкой. Было доказано, что для одного и того же материала длина хорды при абразивном трении примерно в три раза больше, чем при граничном трении. Это следует учитывать для перехода к расчету по правилам испытаний при граничном трении.

Моделирование зависимости параметров износа и твердости материала

Следующий этап решения поставленной задачи заключается в получении данных об уровне твердости

разных материалов по шкале Мооса θ^1 . Кроме того, была найдена номограмма шкал твердости², которая позволила найти корреляционную связь между шкалами твердости Мооса θ и Бринелля НВ.

Из результатов тестирования 14 образцов выбрано 6 материалов, испытанных при граничном трении со смазкой, имеющих твердость, близкую к рекомендуемым¹.

Как показывает опыт исследований в работе [7], наиболее вероятно, что эти функции имеют степенной вид $y(x) = ax^b$. Тогда постоянные a и b можно определить методом наименьших квадратов (МНК) с применением логарифмирования, например, $X = \lg(\theta)$ и $Y = \lg(\text{НВ})$. В редакторе Mathcad при использовании МНК сложные вычисления постоянных c_0 и c_1 выполнены с помощью простого оператора $c = \text{line}(X, Y) = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \end{bmatrix}$ и тогда $a = 10^{c_0}$ и $b = c_1$.

Для выполнения корреляционного анализа зависимости твердости по шкале Мооса и параметрами износа получена табл. 1.

Эта методика использована при обосновании корреляционных функций НВ(θ), $\theta(L)$, $\theta(\varepsilon_L)$, $\theta(P)$ и $\theta(\varepsilon_W)$, которые рассчитываются следующим образом:

$$\text{НВ}(\theta) = 5,05\theta^{2,57}, \quad (7)$$

$$\theta(L) \approx 2,4 \left(\frac{24\pi r^2 cv}{10^6 L^2} \right)^{1/4} = \left(\frac{r\sqrt{cv}}{20L} \right)^{1/2},$$

$$\theta(\varepsilon_L) \approx 2,4(\varepsilon_L)^{1/4},$$

$$\theta(P) \approx \sqrt{2P},$$

$$\theta(\varepsilon_W) \approx 2(\varepsilon_W)^{1/6}.$$

¹ Свойства металлов. Твердость [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://900igr.net/prezentacija/khimija/rol-metallov-v-istorii-chelovechestva-182251/svojjstva-metallov-18.html> (дата обращения: 03.03.2021).

² ЛЭТИ. Кафедра физической химии. Отчет по лабораторной работе №2 по дисциплине «Материаловедение» Тема: Твердость материалов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/790029/> (дата обращения: 03.03.2021).

Таблица 1. Исходные данные твердости
Table 1. Baseline data for hardness function evaluation

Материал	Твердость		Показатель			
	θ	НВ, МПа	L , мм	ε_L , км/мм	P , МПа	$\varepsilon_W/1000$, Н·м/мм ³
Олово О1	1,8	20	12,6	0,327	1,67	0,55
Медь МЗр	3,0	100	4,1	2,5	4,93	12,3
Сталь 40	4,0	200	2,53	6,68	7,53	50,3
Сталь 08Х18Н10Т	5,0	300	1,5	21,4	13	278,2
Сплав ВК6	6,0	500	1,11	37,7	17,88	674,1
Керамика Si ₂ O ₃	8,0	1000	0,63	121	32,05	3878

Применение упрощенной модели «block-on-ring» с учетом твердости материала

В заключение целесообразно рассмотреть рабочие алгоритмы оценки износостойкости в производственных условиях с учетом уровня твердости материалов.

Прежде всего рекомендуется оснастить машину трения СМЦ-2 устройством типа «block-on-ring» с подходящими размерами диска и бруска. Например, в работе [1] используется диск с радиусом 20 мм и шириной 10 мм, а брусок длиной 30 мм и шириной 7 мм. Это позволяет допустимую хорду увеличить до 26–28 мм по сравнению с 15–16 мм при длине 18 мм бруска 2, изображенного на рис. 1.

Величины нагрузки F , частоты вращения n , времени измерения t и числа циклов cv устанавливаются в зависимости от выбора вариантов испытаний, которые характеризуются постоянной величиной β по формуле

$$\beta = \frac{rH_L\sqrt{cv}}{F}. \quad (8)$$

Входным измеряемым параметром может быть либо длина хорды L , либо масса продуктов износа G , если она определяется путем взвешивания образца до и после сеанса испытаний. В алгоритм расчета выходных параметров могут входить формулы (1)–(6) и (или) функции от твердости, рассчитываемые по следующим формулам:

$$\theta = \left(\frac{r\sqrt{cv}}{20L} \right)^{1/2} = \left(\frac{\beta}{604I_W} \right)^{1/6}, \quad (9)$$

$$L(\theta) = \frac{r\sqrt{cv}}{20\theta^2} = \frac{\beta F}{20H_L\theta^2}, \quad (10)$$

$$h(\theta) = \frac{L(\theta)^2}{12r} = \frac{r^2cv}{400\theta^4 12r} = \frac{rcv}{4800\theta^4}, \quad (11)$$

$$P(\theta) = \frac{F}{L(\theta)H_L} = \frac{20\theta^2}{\beta}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_L(\theta) = \frac{2\pi rcv 4800\theta^4}{10^6 rcv} = 0,0302\theta^4, \quad (13)$$

$$\varepsilon_W(\theta) = 1000P(\theta)\varepsilon_L(\theta) = \frac{604\theta^6}{\beta}. \quad (14)$$

Предлагается три варианта оценки параметров износа с учетом твердости исследуемых материалов по шкалам Мооса и Бринелля.

Первый вариант (табл. 2) выполняется по формулам (1)–(6) и (8) при образцовых исходных параметрах испытаний, для которых получены формулы оценки твердости материала по шкале Мооса θ . Если испытания проводятся при других исходных данных (второй и третий варианты представлены в табл. 3 и 4), то расчетное значение θ не будет совпадать с образцовой твердостью. В этом случае предлагается называть ее уровнем твердости. Возможность приведения этой величины к образцовой твердости показана во втором варианте оценки параметров износа.

В табл. 2 расчеты всех показателей износа по первому варианту выполнены на основании измерения хорды L после наработки $t = 10$ мин для образцов восьми материалов.

Первый вариант может служить основой стандарта испытаний пар трения типа рис. 2 по методу «block-on-ring» с учетом твердости при образцовых условиях $F = 200$ Н и $cv = 1000$ циклов.

Второй и третий варианты оценки параметров износа разработаны на основании исходных данных и результатов исследований ученых КНР [1] различных свойств композита ПТФЭ с наполнением УФД, где была определена методом «block-on-ring» объемная интенсивность изнашивания как чистого ПТФЭ, так и его композита с разной концентрацией наполнителя УФД в процентах. Измерение износа отполированных поверхностей диска и бруска выполнялось при сухом скольжении в условиях образования на диске трансферной пленки от полимера, которая выполняет роль смазки.

В качестве исходных данных в работе [1] заданы:

— режимы испытаний $F = 200$ Н, $n = 200$ об/мин и $t = 120$ мин;

— результаты расчета интенсивности изнашивания I_W : $626 \cdot 10^{-6} \pm 124 \cdot 10^{-6}$ для чистого ПТФЭ и $26 \cdot 10^{-6} \pm 5 \cdot 10^{-6}$ для композита с УФД 5 %.

Двухчасовые сеансы испытаний применены для исследования не только износа, но и динамики изменения коэффициента трения, температуры, структуры материала в зависимости от процента УФД и др. К сожалению, в [1] не приведены результаты измерений исходной длины хорды L или массы продуктов износа G , а также методика вычислений параметров: h , P , ε_L и ε_W .

Эта задача решена с помощью рассмотренных выше алгоритмов, а результаты отражены в табл. 3 и 4.

Из табл. 3 следует, что во втором варианте за исходный параметр формально должна применяться длина

Таблица 2. Первый вариант методики оценки износостойкости

Table 2. The first version of the procedure for evaluation of wear resistance

Материал	Заданные параметры			Расчетные параметры								
	F , Н	n , об/мин	t , мин	L , мм	h , мм	P , МПа	ε_L , км/мм	$\varepsilon_W \cdot 10^4$, Н·м/мм ³	$I_W \cdot 10^{-5}$, мм ³ /(Н·м)	β , мм ² /Н	θ	НВ, МПа
Олово О1	200	100	10	12,1	0,488	1,65	0,32	532	188	39,53	1,80	23
Алюминий АМГ5				4,104	0,056	4,87	2,8	1,36	7,33	39,53	3,10	93
Алюминий АМГ5				4,326	0,062	4,62	2,5	1,16	8,59	39,53	3,02	87
Медь МЗр				4,10	0,056	4,87	2,7	1,36	7,33	39,53	3,10	92
Сталь 40				2,53	0,021	7,9	7,35	5,8	1,72	39,53	3,95	172
Сталь 08Х18Н10Т				1,50	0,007	13	21	2,78	0,36	39,53	5,13	338
Сплав ВК				1,11	0,004	18	38	6,81	0,15	39,53	5,96	495
Керамика Si2O3				0,63	0,001	32	118	3,76	0,003	39,53	7,92	1000

Таблица 3. Второй вариант методики оценки износостойкости

Table 3. Second version of the procedure for evaluation of wear resistance

Материал*	Заданные параметры			Расчетные параметры								
	F , Н	n , об/мин	t , мин	$L(\theta)$, мм	$h(\theta)$, мм	$P(\theta)$, МПа	$\varepsilon_L(\theta)$, км/мм	$\varepsilon_W(\theta) \cdot 10^3$, Н·м/мм ³	$I_W \cdot 10^{-6}$, мм ³ /(Н·м)	β , мм ² /Н	θ	НВ, МПа
1	200	200	120	23,4	2,28	1,22	1,32	1,60	626	108	2,57	57
2				8,14	0,28	3,51	10,94	38,5	26	108	4,36	223
3	200	100	10	8,4	0,24	2,38	0,67	1,60	626	39,5	2,17	37
4				2,9	0,028	6,88	5,6	38,5	26	39,5	3,69	144

Примечание. * Материал: 1, 2 — значения из [1] для чистого ПТФЭ и наполнителя; 3, 4 — образцовые.

Таблица 4. Третий вариант методики оценки износостойкости

Table 4. Third version of the procedure for evaluation of wear resistance

Материал	Заданные параметры			Расчетные параметры								
	F , Н	n , об/мин	t , мин	G , мг	L , мм	h , мм	P , МПа	ε_L , км/мм	$\varepsilon_W \cdot 10^3$, Н·м/мм ³	$I_W \cdot 10^{-6}$, мм ³ /(Н·м)	θ	НВ, МПа
1	200	200	120	756	23,4	2,28	1,22	1,32	1,61	626	2,57	57
2				31,4	8,14	0,28	3,51	10,94	38,4	26	108	4,36
3	200	100	10	32,5	8,4	0,24	3,5	0,67	1,60	626	2,17	37
4				1,31	2,9	0,028	10,1	5,6	38,5	26	39,5	3,69

хорды L , но она неизвестна. Получен данный параметр следующим образом:

- 1) определены постоянная β по формуле (8) и уровень твердости θ (9) с учетом известной интенсивности изнашивания I_W ;
- 2) рассчитана длина хорды $L(\theta)$ (10);
- 3) остальные параметры $h(\theta)$, $P(\theta)$, $\varepsilon_L(\theta)$, $\varepsilon_W(\theta)$ и I_W определены по формулам (11)–(14) и (4).

По причине существенного отличия входных параметров n и t от образцовых значений (табл. 2) уровень твердости θ может оказаться несколько больше образцовой величины. Это видно из пересчета твердости по шкале Мооса θ в строках материалов 3 и 4 по формуле (9) при образцовых показателях F и sv , и при заданной объемной интенсивности изнашивания I_W . Твердость по шкале Бринелля НВ определена по формуле (7). Полученная при этом условная твердость ПТФЭ по шкале Бринелля

до и после введения наполнителя (37 и 144 МПа) хорошо согласуется со справочными данными¹.

Отсюда следует вывод о том, что чистый композит ПТФЭ имеет относительно низкую твердость, которая возрастает почти в 4 раза при добавлении наполнителя УФД. Выполненный анализ в полной мере относится к третьему варианту оценки параметров износа тех же материалов (табл. 4), где входным параметром является масса продуктов износа G , определяемая путем взвешивания образцов:

$$G = \frac{\gamma L^3 H_L}{12r}. \quad (15)$$

¹ Свойства и применение фторопластов. Table 8.2. Физико-механические свойства фторопластов [Электронный ресурс]. Режим доступа: 6751_html_6419e856.png (1070×739) (topuch.ru) (дата обращения: 03.03.2021).

Отметим, что для имитации веса G в табл. 4 применена формула (15), соответствующая выражению (6). Значение плотности исследуемых материалов γ принято по данным¹.

Заключение

Обоснованная ранее в работах [7–10] упрощенная версия оценки износостойкости материалов методом «block-on-ring» и результаты тестирования ряда материалов позволили впервые расширить возможности

¹ Свойства и применение фторопластов. Table 8.2. Физикомеханические свойства фторопластов [Электронный ресурс]. Режим доступа:

6751_html_6419e856.png (1070×739) (topuch.ru) (дата обращения: 03.03.2021).

Литература

- Lai S.-Q., Yue L., Li T.-S., Hu Z.-M. The friction and wear properties of polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond // *Wear*. 2006. V. 260. N 4-5. P. 462–468. doi: 10.1016/j.wear.2005.03.010
- Методы испытания на изнашивание: труды совещания, состоявшегося 7–10 декабря 1960 / отв. ред. М.М. Хрущов. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 238 с.
- Wang B., Lv Q., Hou G. Tribological behavior of Nano- Al_2O_3 and PEEK reinforced PTFE composites // *AIP Conference Proceedings*. 2017. V. 1794. N 1. P. 020030. doi: 10.1063/1.4971912
- Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
- Musalimov V.M., Nuzhdin K.A. Modeling of external dynamics of frictional interaction using the elastic system stability theory // *Journal of Friction and Wear*. 2019. V. 40. N 1. P. 51–57. doi: 10.3103/S1068366619010136
- Гинзбург Б.М., Точильников Д.Г. Влияние фуллеренсодержащих добавок к фторопластам на их несущую способность при трении // *Журнал технической физики*. 2001. Т. 71. № 2. С. 120–124.
- Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Алгоритмы оценки линейной и объемной (весовой) интенсивности изнашивания материалов на машине трения // *Известия вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63. № 4. С. 293–301. doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-293-301
- Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Моделирование процесса изнашивания плоских образцов материалов на машине трения // *Известия вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63. № 2. С. 163–169. doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-163-169
- Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Оценка износостойкости материалов на машине трения при снижении удельного давления на плоский образец // *Известия вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63. № 1. С. 78–83. doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-78-83
- Ефремов Л.В. Проблемы управления надежностью-ориентированной технической эксплуатацией машин: учебное пособие. СПб.: Art-Xpress, 2015. 206 с.

Авторы

Ефремов Леонид Владимирович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2372-8403>, levlefr@mail.ru

Тикалов Андрей Владимирович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация; начальник сектора, АО «Компрессор», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8821-916X>, tikalov2010@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.02.2021
Одобрена после рецензирования 27.02.2021
Принята к печати 13.03.2021

этого метода за счет включения в его алгоритм расчет твердости образцов. Эта проблема решена путем корреляционного анализа зависимости твердости образцов материалов от экспериментальных значений параметров износа при граничном трении.

Эффективность предложенной методики оценки экспериментальных параметров износа с учетом уровня твердости подтверждена опубликованными данными об испытаниях композита политетрафторэтилена с наполнением ультрадисперсным алмазом [1]. Удалось количественно оценить увеличение твердости композита в зависимости от концентрации наполнителя по сравнению с чистым полимером.

Целесообразно продолжить экспериментальные исследования этой проблемы в широком диапазоне твердости материалов и режимов испытаний пар трения.

References

- Lai S.-Q., Yue L., Li T.-S., Hu Z.-M. The friction and wear properties of polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond. *Wear*, 2006, vol. 260, no. 4-5, pp. 462–468. doi: 10.1016/j.wear.2005.03.010
- Methods of Wear Resistance Tests: Proceedings of the meeting held on December 7–10, 1960*. Ed. by M.M. Khrushchov. Moscow, RAS Publ., 1962, 238 p. (in Russian)
- Wang B., Lv Q., Hou G. Tribological behavior of Nano- Al_2O_3 and PEEK reinforced PTFE composites. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1794, no. 1, pp. 020030. doi: 10.1063/1.4971912
- Musalimov V.M., Valetov V.A. *Dynamics of Frictional Interaction*. St. Petersburg, ITMO, 2006, 191 p. (in Russian)
- Musalimov V.M., Nuzhdin K.A. Modeling of external dynamics of frictional interaction using the elastic system stability theory. *Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 51–57. doi: 10.3103/S1068366619010136
- Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G. Effect of fullerene-containing additives on the bearing capacity of fluoroplastics under friction. *Technical Physics*, 2001, vol. 46, no. 2, pp. 249–253. doi: 10.1134/1.1349286
- Efremov L.V., Tikalov A.V. Algorithms for evaluating linear and volumetric (weight) wear rates of materials using a friction machine. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 4, pp. 293–301. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-293-301
- Efremov L.V., Tikalov A.V. Simulation of the wear process of flat material samples on a friction machine. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 163–169. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-163-169
- Efremov L.V., Tikalov A.V. Evaluation of wear resistance of materials on a friction machine at decreasing the specific pressure on a flat sample. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 78–83. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-78-83
- Efremov L.V. *Problems of Reliability-Oriented Technical Operation of Machines*. Tutorial. St. Petersburg, Art-Xpress Publ., 2015, 206 p. (in Russian)

Authors

Leonid V. Efremov — D.Sc., Professor, Chief Researcher, Institute for Problems in Mechanical Engineering RAS, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2372-8403>, levlefr@mail.ru

Andrey V. Tikalov — Postgraduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; Head of Section, JSC “Compressor”, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8821-916X>, tikalov2010@mail.ru

Received 11.02.2021
Approved after reviewing 27.02.2021
Accepted 13.03.2021

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

