

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ ПРИ СНИЖЕНИИ УДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЙ ОБРАЗЕЦ

Л. В. ЕФРЕМОВ¹, А. В. ТИКАЛОВ²

¹Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Представлен метод оценивания износостойкости материалов на машине трения, основанный на принципе врезания диска в плоский образец с расчетом износа и удельного давления по длине образованной хорды на поверхности бруска за время испытаний. Составлен алгоритм расчета износостойкости материалов, который позволяет оценивать линейный, массовый и объемный износ по длине хорды. Приведены результаты испытаний образцов материалов на износостойкость, проведенных с постоянной нагрузкой, но при переменном давлении. Такие условия испытаний позволяют производить тестирование материалов любой твердости и оценить относительную износостойкость за короткий период времени, приняв за эталон образец одного из материалов, например сталь 40.

Ключевые слова: давление, диск, износ, износостойкость, материал, машина трения, колодка, трение, хорда

Для определения относительной износостойкости материалов на машине трения СМЦ-2 использовалась пара трения типа „диск—колодка“ („диск—брусок“) (рис. 1, а), где прямолинейная нижняя поверхность колодки (бруска) в начальный момент времени контактирует с поверхностью диска по линии; на рисунке: 1 — диск, 2 — стопорный винт, 3 — колодка, 4 — держатель. В результате фрикционного взаимодействия во время вращения диска на поверхности трения образуется сегмент, длина хорды которого является входным параметром при расчете износостойкости [1]. В свою очередь, удельное давление уменьшается с течением времени в связи с увеличением площади контакта.

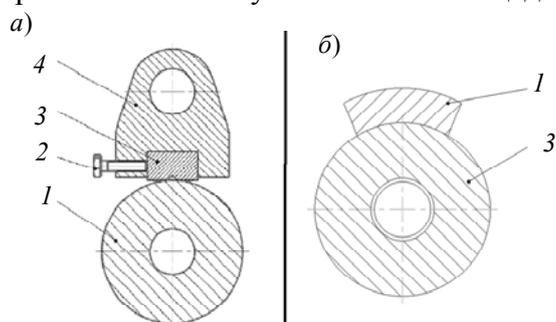


Рис. 1

а площадь пятна контакта условно равна нулю.

В процессе испытаний в течение времени T при заданных частоте вращения n и нагрузке F диск диаметром D врезается в брусок шириной H , образуя износ в виде сегмента площа-

Исследуемая пара трения отличается от стандартной пары трения геометрической формой колодки (рис. 1, б): вместо колодки с прямолинейной поверхностью используется колодка с криволинейной поверхностью, которая контактирует по всей криволинейной площади и обеспечивает постоянное давление в зоне фрикционного взаимодействия. Следовательно, перед началом испытаний исследуемой пары трения (см. рис. 1, а) контакт поверхностей имеет вид прямой линии,

дью A . Длина хорды образованного сегмента измеряется под микроскопом или визуально. Эскиз пары трения „диск—брусок“, где диск 1 вырезает сегмент в бруске 2 показан на рис. 2, где h — глубина сегмента, L — длина хорды, r — радиус диска.

Для расчета глубины h сегмента можно применить формулу для вычисления износа методом „искусственных баз“ [2, 3]:

$$h = \frac{L^2}{8r}. \quad (1)$$

Формулу (1) с погрешностью до 1 % удалось доказать путем разложения в ряд Тейлора (с помощью оператора “series” в редакторе MathCAD) точной геометрической функции для расчета глубины лунки:

$$h = r \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2r} \right)^2} \right] \text{series}, \quad L \Rightarrow \frac{L^2}{8r} + \frac{L^4}{128r} + \frac{L^6}{1024r} + \dots \approx \frac{L^2}{8r}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что второй и последующие члены ряда имеют малое значение и ими можно пренебречь.

Искусственная база, образуемая на поверхности бруска при фрикционном взаимодействии исследуемой пары трения „диск—брусок“ [4], имеет вид сегмента (см. рис. 2), площадь A которого вычисляется с погрешностью до 1 % после разложения точной геометрической функции от угла хорды в ряд Тейлора:

$$A = \frac{r^2}{2} \left(\frac{L}{r} - \sin \left(\frac{L}{r} \right) \right) \text{series}, \quad L \Rightarrow \dots \frac{L^3}{12r}. \quad (3)$$

Линейный h_l и весовой h_m износ рассчитываются соответственно по формулам

$$h_l = \frac{A}{L} = \frac{L^2}{12r}; \quad (4)$$

$$h_m = AH\gamma = h_l LH\gamma, \quad (5)$$

где γ — удельный вес материала исследуемого образца.

Сравнение формул (1) и (4) показывает, что глубина h сегмента в 1,5 раза больше линейного износа h_l .

При сравнительном тестировании материалов на износостойкость необходимо назначить износостойкость эталонного материала. Для этого рассчитывается интенсивность изнашивания $I = h_l/S$, а износостойкость ε является величиной, обратной интенсивности изнашивания:

$$\varepsilon = \frac{1}{I} = \frac{S}{h_l},$$

где $S = \pi DnT$ — путь трения.

Относительная износостойкость материала ε' рассчитывается по формуле

$$\varepsilon' = \varepsilon/\varepsilon_0,$$

где ε_0 — износостойкость эталонного образца.

В некоторых работах удельное давление P применяется как показатель износостойкости при исследованиях трибологических свойств материалов [5, 6]. Отметим, что по мере изнашивания бруска происходит уменьшение удельного давления P . Однако в настоящей работе при решении задачи определения износостойкости материалов удельное давление является вспомогательным показателем и в методике не учитывается. Основной динамический показатель — нагрузка F , таким образом, удельное давление определяется как

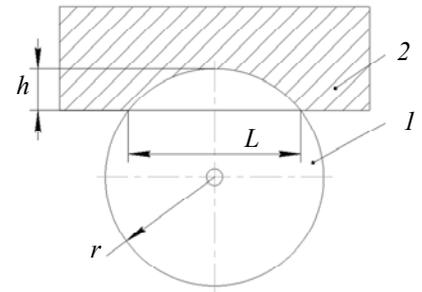


Рис. 2

$$P = \frac{F}{LH}.$$

Отметим, что во время износа в зоне трения происходит поверхностное упрочнение материала (наклеп), что способствует повышению твердости НВ поверхностного слоя (ГОСТ 23.225-99).

Для проверки эффективности предложенного метода определения износостойкости были проведены сравнительные испытания 11 образцов различных материалов как при абразивном изнашивании, так и при работе со смазочным материалом. Для проведения абразивных испытаний на диск наклеивалась абразивная лента с величиной зерна 0,02 мм (АШ600).

Результаты испытаний исследуемых пар трения на износостойкость представлены в табл. 1. Для каждого образца выполнялось по три измерения длины хорды L при соответствующем времени наработки T . Для каждого i -го измерения рассчитаны износ h_i , интенсивность изнашивания I , удельное давление P и износостойкость ε [7].

Таблица 1

Пара трения		T , мин	L , мм	h_i , мм	I , мм/км	P , кгс/мм ²	ε , км/мм	
Диск	Брусочек							
Наклеена АШ600	Сталь 20	2,5	5,55	0,103	2,621	0,36	0,381	
		5	6,42	0,137	1,749	0,312	0,571	
		7,5	7,05	0,166	1,407	0,284	0,711	
	Чугун СЧ30	2	6,6	0,145	4,622	0,303	0,216	
		4	7,1	0,168	2,675	0,282	0,373	
		6	8,2	0,224	2,378	0,244	0,42	
	Бронза 9-4-4-1	2,5	7,73	0,199	5,072	0,259	0,197	
		3,5	8,79	0,257	4,685	0,228	0,213	
		4,5	9,53	0,303	4,597	0,21	0,217	
	Алюминий АМг5	1	6,89	0,158	10,074	0,29	0,099	
		2	8	0,213	6,791	0,25	0,147	
		3	9	0,27	5,729	0,222	0,174	
	Нанесен смазочный материал	Олово О1	2	7,7	0,197	6,291	0,26	0,159
			3,5	8,9	0,264	4,803	0,225	0,209
			5	10	0,333	4,244	0,2	0,236
Чугун СЧ30		5	9,3	0,288	3,671	0,215	0,273	
		10	12,6	0,529	3,369	0,159	0,297	
		15	15	0,75	3,183	0,133	0,313	
Алюминий АМг5 (образец № 1)		5	3,57	0,043	0,541	0,56	1,848	
		10	4,07	0,055	0,351	0,491	2,845	
		15	4,48	0,067	0,284	0,446	3,522	
Алюминий АМг5 (образец № 2)		5	3,62	0,044	0,556	0,552	1,799	
		10	4,34	0,063	0,4	0,461	2,502	
		15	4,8	0,077	0,326	0,417	3,067	
Бронза БРАЖ 9-4-4-1		5	3,5	0,041	0,52	0,571	1,923	
		10	4,07	0,055	0,351	0,491	2,845	
		15	4,55	0,069	0,293	0,44	3,414	
Сталь 40Х		5	2,2	0,016	0,205	0,909	4,867	
		10	2,7	0,024	0,155	0,741	6,463	
		15	2,9	0,028	0,119	0,69	8,404	
Сталь 08Х18Н10Т		5	1,35	0,006	0,077	1,481	12,928	
		10	1,5	0,007	0,048	1,333	20,944	
		15	1,6	0,009	0,036	1,25	27,612	

Как показано в табл. 1 время испытания образцов различное, поэтому не всегда существует возможность проверить износостойкость при одном общем времени наработки T . В связи с этим методом наименьших квадратов были получены степенные функции зависимости износостойкости от времени работы $\varepsilon(T)$ для каждого исследуемого образца:

$$\varepsilon(T) = a T^b, \quad (6)$$

где a и b — коэффициенты для каждого исследуемого материала бруска, полученные расчетным путем в редакторе MathCAD.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов a и b для функции (6), которые позволяют при одинаковом времени наработки $T=10$ мин рассчитать износостойкость $\varepsilon(10)$ для всех исследуемых пар трения. Заключительным этапом тестирования материалов на износостойкость было определение относительной износостойкости $\varepsilon'(10)$ за время наработки $T=10$ мин. В качестве эталонного материала принята сталь 40. Отметим высокий коэффициент корреляции K эмпирических данных и расчетных по формуле (6).

Таблица 2

Номер образца	Пара трения		Коэффициент		Коэффициент корреляции K	$\varepsilon(10)$, км/мм	$\varepsilon'(10)$
	Диск	Брусок	a	b			
1	Наклеена АШ600	Бронза БРАЖ 9-4-4-1	0,164	0,201	0,977	0,262	0,04
2		Алюминий АМг5	0,101	0,519	0,987	0,332	0,05
3		Чугун СЧ30	0,144	0,625	0,970	0,608	0,09
4		Сталь 20	0,226	0,57	0,996	0,842	0,13
5	Нанесен смазочный материал	Чугун СЧ30	0,223	0,125	0,994	0,298	0,044
6		Олово О1	0,119	0,434	0,995	0,323	0,05
7		Алюминий АМг5 (образец №1)	0,718	0,591	0,994	2,792	0,41
8		Алюминий АМг5 (образец №2)	0,822	0,485	0,999	2,79	0,41
9		Бронза БРАЖ 9-4-4-1	0,83	0,527	0,998	2,505	0,37
10		Сталь 40	2,189	0,488	0,998	6,732	1,00
11		Сталь 08Х18Н10Т	4,257	0,691	0,999	20,898	3,10

На рис. 3 показана гистограмма сравнительного анализа [8] относительной износостойкости материалов в зависимости от условий работы пары трения в соответствии с табл. 2: зона А — абразивный износ; В, С — граничное трение со смазочным материалом соответственно цветных металлов и сталей; N — номер образца.

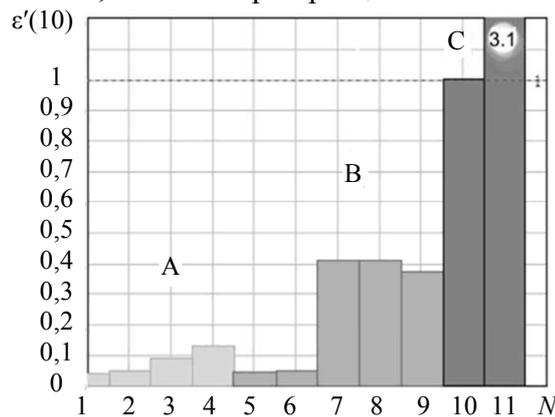


Рис. 3

На основе данных табл. 2 и гистограммы можно предположить, что износостойкость в большинстве случаев непосредственно зависит от твердости материала. Например, относительная износостойкость стали 40 в 2,5 раза превышает этот показатель для бронзы БРАЖ 9-4-4-1 и алюминия АМг5, хотя износостойкость последних практически совпадает. Наименьшее значение $\varepsilon'(10)=0,05$ получено для олова О1 с минимальной твердостью. Однако оказалось, что еще меньшая относительная износостойкость $\varepsilon'(10)=0,044$ наблюдается у чугуна СЧ30, твердость которого соизмерима с твердостью стали. Подтверждением данного

результата исследования может служить справочник [9]. Это явление можно объяснить хорошими антифрикционными свойствами чугуна в сочетании с прочностными характеристиками. Не случайно чугун применяют для изготовления таких изделий, как поршневые кольца дизелей и компрессоров, поршни и цилиндрические втулки, вкладыши подшипников скольжения и другие узлы трения, которые должны обладать высокими антифрикционными свойствами.

Проведенные исследования подтверждают преимущество применения на машине трения образцов в виде плоского бруска для определения износостойкости материалов. В результате фрикционного взаимодействия исследуемых пар трения в бруске образуется след износа в виде сегмента. Измерение хорды сегмента позволяет по приведенным формулам рассчитать линейный, объемный и весовой износ, интенсивность изнашивания и износостойкость исследуемого материала.

Путем разложения в ряд Тейлора доказано, что глубина сегмента в 1,5 раза превышает линейный износ. Это позволило упростить и повысить достоверность расчета износостойкости и удельного давления, а также создать рабочий вариант методики сравнительного тестирования материалов на машине трения при заданных эталонных параметрах (включая время сеанса испытаний) за короткий промежуток времени. Результаты сравнительного тестирования ряда образцов подтвердили зависимость износостойкости исследуемого материала от его твердости и антифрикционных свойств. Опыт применения предложенной конструкции узла трения, методики проведения испытаний и программного обеспечения показал высокую производительность за счет упрощения процедуры испытаний, а также высокую точность полученных результатов, как эмпирических, так и теоретических.

Рекомендуется отдать предпочтение исследованиям при граничном трении со смазочным материалом, когда температура и уровень вибрации минимальны. Такой метод проще реализовать по сравнению с абразивными испытаниями. Режим и условия испытаний должны выбираться с учетом особенностей эксплуатации исследуемого материала и требований заказчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрущов М. М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы. М.: Изд-во „Красанд“, 2012. 512 с.
2. Хрущов М. М., Беркович Е. С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 217 с.
3. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
4. Ефремов Л. В., Тикалов А. В., Бреки А. Д. Ускоренные испытания стальных образцов на износостойкость методом искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 671—676.
5. Гинзбург Б. М., Точильников Д. Г. Влияние фуллеренсодержащих добавок к фторопластам на их несущую способность при трении // ЖТФ. 2001. Т. 71, вып. 2. С. 129—132.
6. Пат. 2 526 223 С2 РФ. Способ оценки износостойкости полимерных композиционных материалов / А. И. Герасимов, О. В. Гоголева, Н. Р. Адамов. 2014.
7. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наук. думка, 1979. 188 с.
8. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.
9. Энциклопедия трибологии - Абразивное изнашивание [Электронный ресурс]: <http://tribology.site/index/abrazivnoe_izn/0-37>.

Сведения об авторах

Леонид Владимирович Ефремов

— д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория трения и износа; E-mail: levlefr@mail.ru

Андрей Владимирович Тикалов

— аспирант; СПбПУ, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Поступила в редакцию
16.10.19 г.

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Оценка износостойкости материалов на машине трения при снижении удельного давления на плоский образец // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 1. С. 78—83.

EVALUATION OF WEAR RESISTANCE OF MATERIALS ON A FRICTION MACHINE AT DECREASING THE SPECIFIC PRESSURE ON A FLAT SAMPLE

L. V. Efremov¹, A. V. Tikalov²

¹Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, 199178, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Russia

E-mail: tikalov2010@mail.ru

A method for estimating the wear resistance of materials on a friction tire is presented. The method is based on the principle of embedding the disk in a flat sample and calculation of wear and specific pressure along the length of the formed chord on the top of the bar during the tests. An algorithm for calculating the wear resistance of materials is developed, which allows estimating linear, mass and volume wear along the length of the chord. Results of tests of samples of various materials for wear resistance, carried out with a constant load, but at variable pressure, are presented. The test conditions allow to test materials of any hardness and evaluate the relative wear resistance in a short period of time, taking as a reference a sample of one of the materials, such as steel 40.

Keywords: pressure, disk, wear, wear resistance, material, friction machine, pad, friction, chord

REFERENCES

1. Khrushchov M.M. *Treniye, iznos i mikrotverdost' materialov: Izbrannyye raboty* (Friction, Wear and Microhardness of Materials: Selected Works), Moscow, 2011, 510 p. (in Russ.)
2. Khrushchov M.M., Berkovich E.S. *Opreделение iznosa detaley mashin metodom iskusstvennykh baz* (Determination of Wear of Machine Parts by the Method of Artificial Bases), Moscow, 1959, 217 p. (in Russ.)
3. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* (Friction and Wear), Moscow, 1968. (in Russ.)
4. Efremov L.V., Tikalov A.V., Breki A.D. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 8(59), pp. 671–676. (in Russ.)
5. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2001, no. 2(46), pp. 249–253.
6. Patent RU 2 526 223 C2, G01N 3/56(2014.08), *Sposob otsenki iznosostoykosti polimernykh kompozitsionnykh materialov* (A method for Assessing the Wear Resistance of Polymer Composite Materials), Gerasimov A.I., Gogoleva O.V., Adamov N.R., Priority 17.12.2012, Published 20.08.2014. (in Russ.)
7. *Slovar'-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detaley mashin* (Dictionary-Reference on Friction, Wear and Lubrication of Machine Parts), Kyiv, 1979, 188 p. (in Russ.)
8. 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.)
9. http://tribology.site/index/abrazivnoe_izn/0-37. (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; E-mail: levlefr@mail.ru
- Andrey V. Tikalov** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design Basics; E-mail: tikalov2010@mail.ru

For citation: 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, N 1. P. 78—83 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-78-83