

## АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЛИНЕЙНОЙ И ОБЪЕМНОЙ (ВЕСОВОЙ) ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ

Л. В. ЕФРЕМОВ<sup>1</sup>, А. В. ТИКАЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия

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

Рассмотрены универсальные способы и алгоритмы оценки интенсивности изнашивания материалов на машине трения при постоянном и переменном удельном давлении. Особое внимание уделяется исследованию линейного и объемного износа. Предложены упрощенные формулы оценки износа на основе разложения в ряд Тейлора геометрических функций. Обосновывается эффективность применения пары трения с переменным давлением путем врезания диска в плоский образец — метода хорды. Приводится и доказывается зависимость линейной и объемной износостойкости при проведении исследований с переменным давлением. Получена зависимость износостойкости исследуемых материалов от времени с учетом коэффициентов корреляции для каждого образца.

**Ключевые слова:** износ, интенсивность изнашивания, материал, машина трения, пара трения, образец, оценка, сегмент, сектор, тестирование, трение, хорда

На сегодняшний день в заводских и учебных лабораториях при исследовании трибологических свойств применяется машина трения СМЦ-2 [1], предназначенная для испытания материалов на трение и износ. Однако экспериментальная оценка линейной и объемной интенсивности изнашивания любого твердого материала при рассмотрении пар трения типа „диск—колодка“ требует совершенствования как самой методики, так и последующих расчетов (алгоритмов расчета).

На рис. 1 приведены пары трения, работающие при постоянном удельном давлении ( $a—в$ ) и при переменном ( $г$ ) [2]. Колодки (полувкладыш) 2, 3, 4, 6 при постоянной нагрузке  $F$  опираются на диск (вал) 1 радиусом  $r$ , вращающийся с частотой  $n$ , в результате чего образуются износ 5 ( $h$ ) и хорда сегмента  $L$  7 [3, 4].

Каждая пара трения содержит два элемента — изнашивающий и изнашиваемый. Как правило, твердость изнашивающего в 1,3—1,6 раз выше, чем изнашиваемого [5]. Это условие соблюдается при тестировании материалов по схеме рис. 1,  $a$ ,  $б$ ,  $г$  для диска с упрочненной поверхностью или с наклеенной абразивной лентой (на рис. 1,  $в$  менее твердый диск — изнашиваемый элемент).

В парах трения на рис. 1,  $a—в$  криволинейная нижняя поверхность условно полностью соприкасается с поверхностью диска, что обеспечивает постоянство удельного давления  $P$ :

$$P = \frac{F}{LH}, \quad (1)$$

где  $L$  и  $H$  — длина и ширина пятна контакта колодки с диском.

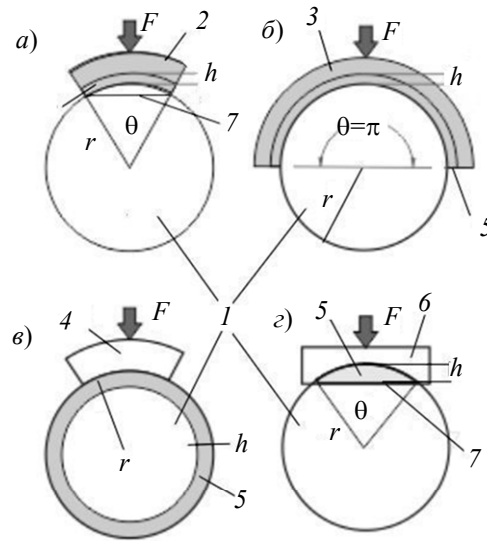


Рис. 1

Пара трения на рис. 1, г работает при переменном давлении, поскольку величина  $L$  в формуле (1) является хордой сегмента, образованной от врезания диска в плоскость бруска: увеличение хорды по мере износа приводит к снижению удельного давления  $P$  при постоянной нагрузке  $F$  [6, 7].

Основная задача настоящей работы заключается в усовершенствовании методики и разработки алгоритмов оценки линейной  $I_l$  и объемной  $I_w$  (весовой  $I_g$ ) интенсивности изнашивания, а также относительной износостойкости  $\varepsilon'$  различных материалов по результатам тестирования на машине трения по схеме рис. 1, г.

При проведении испытаний задаются суммарное время испытаний  $T$ , которое разбивается на три участка  $T_i$  ( $i=1, 2, 3$ ), а также частота вращения  $n$  и нагрузка  $F$ . Каждый сеанс испытания завершается остановкой машины для измерения износа по методике, соответствующей исследуемой паре трения.

Для измерения износа в основном применяются линейный и весовой методы. В первом случае необходимы инструмент для образования искусственной базы и микроскоп с увеличением 20—300 крат [8]. Предварительные исследования показали, что наиболее точными и простыми инструментами для образования искусственной базы в виде круглой лунки диаметром  $d = 3—5$  мм являются сверло (ГОСТ 10902-77) с углом заточки  $\varphi = 118^\circ$  и абразивный диск радиусом 12 мм. Для точной оценки размеров изображения лунки применяется цифровой микроскоп, который обладает программным обеспечением для распознавания образов различной геометрической формы.

Для измерения весового износа необходимы высокоточные весы.

Рассмотрим общие функции алгоритма оценки линейной  $I_l$  и объемной  $I_w$  интенсивности изнашивания образцов при любой схеме пары трения (см. рис. 1):

$$I_l = \frac{1000h_l}{\pi DnT} \Rightarrow \varepsilon_l = \frac{1}{I_l}, \quad (2)$$

$$I_w = \frac{G}{F\pi DnT\gamma} = \frac{W}{F\pi DnT} = \frac{AH}{F\pi DnT} \Rightarrow \varepsilon_w = \frac{1}{I_w}, \quad (3)$$

$\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_w$  — линейная и объемная износостойкость (как обратные интенсивности изнашивания величины). В (2) знаменатель характеризует путь трения, а числитель — линейный износ  $h_l$  за время  $T$ . В формуле (3) знаменатель характеризует работу трения, а числитель — объем продуктов износа  $W$  за время  $T$ . Оценим площадь износа  $A$ :

$$W = \frac{G}{\gamma} \Rightarrow A = \frac{W}{H} = \frac{G}{\gamma H}, \quad (4)$$

$G$  — вес образца,  $\gamma$  — удельный вес исследуемого материала. Поскольку показатель  $G$  рассчитывается по разнице веса образца до и после сеанса испытаний, метод называется весовым или объемным.

Таким образом, решение поставленной задачи по оценке линейной и объемной интенсивности изнашивания, а также относительной износостойкости при тестировании различных материалов сводится к обоснованию формул для расчета площади износа  $A$  любой пары трения на рис. 1.

Метод искусственных баз (МИБ) может использоваться для всех пар трения при определении линейного износа  $h_l$ . Рассчитаем линейный износ с помощью искусственной базы, образованной сверлом и диском соответственно:

$$h_l = \frac{d_0 - d_1}{2} \operatorname{ctg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{d_0 - d_1}{2} \operatorname{ctg} \left( \frac{118^\circ}{2} \right) \approx 0,3(d_0 - d_1), \quad (5)$$

$$h_l = \frac{l_0 - l_1}{8r}, \quad (6)$$

где  $d_0$ ,  $d_1$  — диаметр образованной сверлом лунки, до и после износа;  $l_0$ ,  $l_1$  — длина хорды образованной диском радиусом искусственной базы, до и после износа.

Измерение износа МИБ требует анализа поверхности изнашивания [8] путем повторного измерения искусственной базы в нескольких точках.

Для пар трения (см. рис. 1, *a—в*), работающих при постоянном удельном давлении  $P$ , разработаны функции зависимости площади износа от радиуса диска и линейного износа. Следующая формула применяется, если  $h_l$  уже определен МИБ, тогда полученное значение площади сегмента  $A$  позволяет оценить объем  $W=AH$  и объемную интенсивность изнашивания  $I_w$  по формуле (3):

$$A = \pi \left( r^2 - (r - h_l)^2 \right) \Rightarrow h_l = r - \sqrt{r^2 - \frac{A}{\pi}}. \quad (7)$$

Если применяется весовой метод, площадь вычисляется по формуле  $A=G/(\gamma H)$ ,  $h_l$  вычисляется по обратной зависимости.

Очевидно, что колодка в виде полувкладыша подшипника будет иметь угол сектора  $\theta=\pi$ . Если этот угол не задан, его можно рассчитать, предварительно измерив с помощью микроскопа длину хорды:

$$\theta = 2 \arcsin(L/2r), \quad (8)$$

тогда для варианта пары трения рис. 1, *a* получаем формулу

$$A = \frac{\theta}{2} \left( (r + h_l)^2 - r^2 \right) \Rightarrow h_l = \sqrt{r^2 + \frac{2A}{\theta}} - r. \quad (9)$$

Пара трения на рис. 1, *г* отличается тем, что износ происходит при переменном удельном давлении  $P$  из-за врезания поверхности диска в плоскую поверхность бруска. В связи с тем, что исходным параметром при расчете трибологических характеристик пары

трения на рис. 1,  $z$  является длина хорды, этот способ оценки интенсивности изнашивания был назван методом хорды. Современные исследования показали эффективность метода хорды, который отличается простотой конструкции исследуемых образцов, точностью измерения износа из-за больших размеров хорды и обоснованным алгоритмом расчета площади износа с использованием разложения точной геометрической функции в ряд Тейлора через оператор series в редакторе MathCAD:

$$A = \frac{r^2}{2} (\theta - \sin \theta) \text{series}, L, 6 \rightarrow \frac{L^3}{12r} + \frac{L^5}{160r^3} + \dots \approx L^3/12r. \quad (10)$$

Угол хорды  $\theta$  определим по выражению (8), отсюда находим линейный износ:

$$h_l = A/L = L^2/12r. \quad (11)$$

Удельное давление  $P$  в явном виде не учитывается при расчетах интенсивности изнашивания и износостойкости. В некоторых исследованиях полимерных композиционных материалов [11, 12] мерой интенсивности изнашивания служит графическая зависимость удельного давления  $P$  от первичной нагрузки  $F$ , что не позволяет отнести такой принцип исследований к универсальным средствам тестирования износостойкости любых материалов. Более того, по мере изнашивания и увеличения длины хорды давление  $P$  постоянно уменьшается в связи с увеличением площади контакта. Преобразовав формулу (3), можно получить связь объемной интенсивности изнашивания  $I_w$  с линейной  $I_l$ :

$$\begin{aligned} I_w &= \frac{AH}{F\pi DnT} = \frac{L^3 H}{12rF\pi DnT} = \frac{L^2 LH}{12rF\pi DnT} = \\ &= \frac{h_l LH}{F\pi DnT} = \frac{h_l}{P\pi DnT} = \frac{I_l}{1000P}. \end{aligned} \quad (12)$$

Отсюда следует связь объемной  $\varepsilon_w$  и линейной  $\varepsilon_l$  износостойкости:

$$\varepsilon_w = 1000P\varepsilon_l. \quad (13)$$

Для подтверждения формул (12) и (13) рассмотрим следующий пример: частота вращения  $n = 300$  об/мин, нагрузка  $F = 200$  Н, диаметр диска  $D = 50$  мм, ширина бруска  $H = 10$  мм.

Таблица 1

**Результаты исследования объемной интенсивности изнашивания и износостойкости при трех сеансах испытаний одного образца**

Параметр		Формула						
		(10)	(11)	(2)	(1)	(3)	(12)	(3)
$T$ , мин	$L$ , мм	$A$ , мм	$h_l$ , мм	$I_l$ , мм/км	$P$ , МПа	$I_w$ , мм <sup>3</sup> /км		$\varepsilon_w$ , км/мм <sup>3</sup>
1	3,9	0,2	0,05	1,08	5,13	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$4,77 \cdot 10^3$
4	4,8	0,37	0,08	0,54	4,17	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$7,67 \cdot 10^3$
14	6	0,72	0,12	0,25	3,33	$7,64 \cdot 10^{-6}$	$7,64 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^4$

Для проверки эффективности метода исследования трибологических свойств пары трения, представленной на рис. 1,  $z$ , выполнено сравнительное тестирование 14 различных материалов.

Эскиз конструкции пары трения приведен на рис. 2,  $a$ , а образованная в результате износа хорда 5 — на рис. 2,  $b$ . Образец исследуемого материала выполнен в виде плоского бруска 2 ( $10 \times 10 \times 18$  мм), закрепленного в гнезде нажимного устройства 4 и зафиксированного при помощи винта 3. Нижняя плоскость бруска опирается на диск 1. Перед началом испытательный контакт поверхностей происходит по линии, а площадь пятна контакта близка к нулю.

Увеличение хорды  $L$  по мере изнашивания сопровождается снижением удельного давления  $P$  из-за увеличения площади контакта  $A$ .

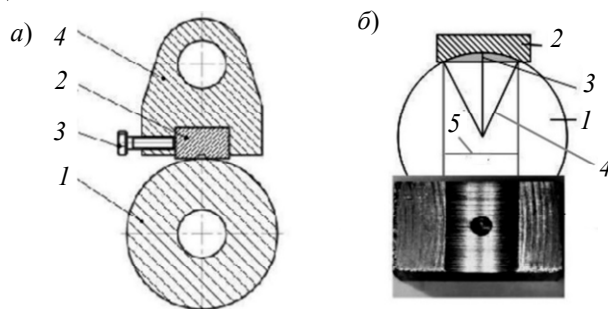


Рис. 2

Спроектированное, изготовленное и установленное на машине трения СМЦ-2 устройство использовано для сравнительного тестирования следующих материалов: сталь конструкционная 08Х18Н10Т, сталь 40, материал ВК-8, керамика, специальный композит, алюминий АМг5М (образец №1), алюминий АМг5М (образец №2), бронза БрАЖНМц 9-4-4-1, олово О1, чугун СЧ30.

Для каждого образца выполнялось по три сеанса испытаний с суммарным временем наработки  $T$ , что позволило обосновать методом наименьших квадратов степенную функцию зависимости длины хорды от времени:

$$L(T) = aT^b, \tag{14}$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты для каждого исследуемого материала бруска, полученные методом наименьших квадратов в редакторе MathCad. Выполнение этого действия связано с необходимостью выбора времени наработки для определения и сравнения износостойкости тестируемых материалов в одинаковых условиях.

Тестирование включает следующие этапы:

- назначить эталонный материал (например, сталь 40);
- выбрать единое время наработки  $T_0$ ;
- определить функцию износостойкости материала в зависимости от времени наработки:

$$\varepsilon(T_0) = aT_0^b, \tag{15}$$

- вычислить относительную износостойкость:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon(T_0)}{\varepsilon_3(T_0)}, \tag{16}$$

где  $\varepsilon_3(T_0)$  — износостойкость эталонного образца за время наработки  $T_0$ .

В табл. 2 приведены результаты исследования основных трибологических параметров исследуемых пар трения (см. рис. 1, 2) как при граничном трении со смазочным материалом, так и при сухом трении по абразивной шкурке АШ600 (размер зерна 0,2 мм). Отметим, что в последних столбцах таблицы показаны результаты исследования относительной износостойкости материалов при линейном и объемном износе за время наработки 10 мин.

На рис. 3 в логарифмических координатах приведены зависимости линейной износостойкости исследуемых материалов от времени наработки в соответствии с табл. 2 ( $a$  — абразивное изнашивание с абразивной лентой АШ600 (сухое трение);  $b$  — граничное трение со смазочным материалом).

Результаты исследования износостойкости различных материалов

Диск	Образец		$a$	$b$	$L$ , мм	$P$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\varepsilon_l$ , км/мм	$\varepsilon_w$ , Н·м/мм <sup>3</sup>	$\varepsilon(T_0)_l$	$\varepsilon(T_0)_w$
	№	Марка								
Наклеена АШ600	1	Сталь 20	4,54	0,217	7,481	2,67	0,84	2251	0,115	0,039
	2	Чугун СЧ30	5,70	0,188	8,791	2,28	0,61	1387	0,083	0,024
	3	Бронза БрАЖН 9-4-1-1	5,58	0,358	12,736	1,57	0,29	456	0,04	0,008
	4	Алюминий АМг5М	6,85	0,358	15,632	1,28	0,19	246	0,026	0,004
Со смазочным материалом	5	Олово О1	6,30	0,283	12,097	1,65	0,32	532	0,044	0,009
	6	Чугун СЧ30	4,62	0,435	12,571	1,59	0,29	474	0,041	0,008
	7	Композит	3,9	0,187	6,03	6,67	0,65	4368	0,089	0,075
	8	Алюминий АМг5М (образец №1)	2,56	0,205	4,104	4,87	2,79	13630	0,38	0,235
	9	Алюминий АМг5М (образец №2)	2,39	0,257	4,326	4,62	2,52	11640	0,342	0,2
	10	Бронза БрАЖН 9-4-1-1	2,38	0,237	4,113	4,86	2,78	13550	0,379	0,233
	11	Сталь 40Х	1,46	0,256	2,532	7,90	7,35	58070	1	1
	12	Сталь 08Х18Н10Т	1,05	0,154	1,501	13,32	20,9	279000	2,844	4,797
	13	ВК-8	0,67	0,22	1,114	7,95	37,8	132199	5,147	2,277
	14	Керамика	0,37	0,22	0,763	6,21	121	756389	16	13

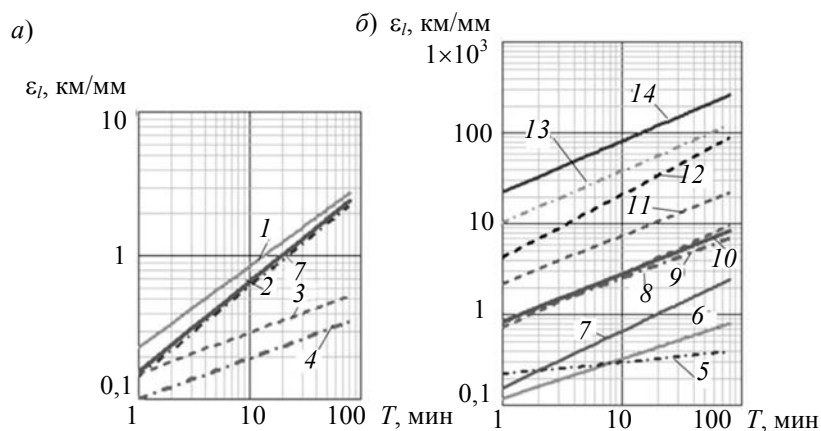


Рис. 3

Гистограмма распределения относительной линейной износостойкости образцов (см. табл. 2) при  $T_0=10$  мин приведена на рис. 4.

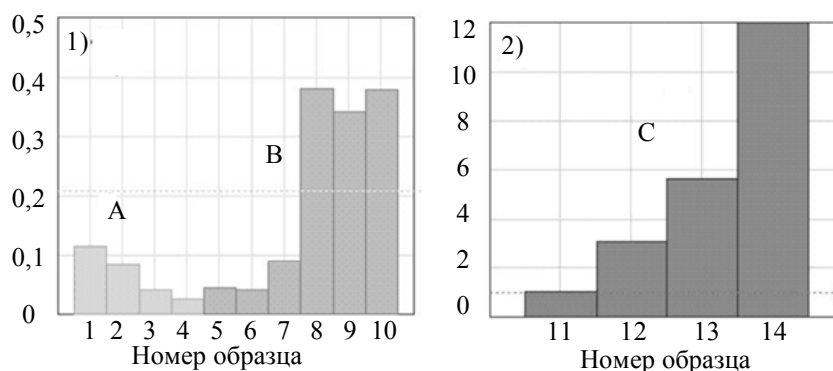


Рис. 4

Рис. 4 разбит на три зоны: А — абразивный износ; В — граничное трение цветных металлов со смазочным материалом; С — граничное трение сталей и керамик со смазочным материалом. Данные рис. 4 и табл. 2 позволяют подтвердить, что в большинстве случаев износостойкость напрямую зависит от твердости материала. Максимальная относительная износостойкость наблюдаются у сталей и керамики (№11—14), относительная износостойкость алюминия и бронзы практически совпала (0,4). Также проявились особые фрикционные свойства чугуна, его относительная износостойкость  $\varepsilon(T_0)=0,041$  (меньше, чем у олова), хотя его твердость соизмерима с твердостью стали, что совпадает с данными [13]. Это явление можно объяснить хорошими антифрикционными свойствами чугуна в сочетании с прочностными характеристиками [14].

**Выводы.** В статье рассмотрены алгоритмы оценки линейной и объемной интенсивности изнашивания различных материалов на машине трения. Приведенные данные подтверждают преимущества метода хорды при испытаниях с плоскими образцами (рис. 1, *з*), износ которых происходит в виде сегмента от врезания диска. В частности, метод хорды оказался несоизмеримо проще и точнее применения стандартной колодки или полувкладыша подшипника скольжения. Принцип работы пары трения „брусоч—диск“ подобен принципу работы твердомера, где роль отпечатка исполняет хорда, а роль индентора — внедряемый в поверхность бруска диск.

Применение теории рядов позволило упростить методику оценки линейной и объемной (весовой) интенсивности изнашивания, что позволило создать рабочий вариант методики сравнительного тестирования износостойкости материалов на машине трения. Сравнительное тестирование показало зависимость износостойкости материалов от твердости и антифрикционных свойств. Например, обнаружена низкая износостойкость чугуна при его высокой твердости. Доказана целесообразность применения пары трения „диск—брусоч“ при исследовании трибологических параметров, а также обоснована их зависимость от нагрузки и удельного давления.

Предпочтительны сравнительные испытания при граничном трении со смазочным материалом при минимальных температуре и вибрации. Разработанная конструкция пары трения и алгоритмы метода хорды могут найти широкое применение при тестировании износостойкости материалов высокой твердости на машине трения.

Вопросы выбора режима и условий испытаний должны решаться с учетом особенностей эксплуатации материала и требований заказчика. Необходимо задать одинаковую продолжительность испытаний для всех исследуемых материалов, включая эталонный образец. С этой целью рекомендуется получить степенную функцию зависимости длины хорды и износостойкости каждого образца от времени работы узла трения путем корреляционного анализа трехкратных сеансов испытаний при измерении износа каждого образца.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. доп. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
2. ASTM G77-05(2010), Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. DOI: 10.1520/G0077-05R10.
3. 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. P. 462—468.
4. Banghan W., Qiujuan L., Genliang H. Tribological behavior of Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and PEEK einforced PTFE composites // *AIP Conf. Proc.* 2017. Vol. 1794. P. 020030.
5. Хрущов М. М., Беркович Е. С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.
6. Goldstein M. A. Uncertainty Analysis of a Multifunctional Tribometer: Theses and Dissertations. 2017 [Электронный ресурс]:<<https://preserve.lehigh.edu/etd/2604>>.

7. Servin R., Calderon I., Perez A., Equihua F., Falcon L., Garcia M., Orozco P. Analysis of friction coefficient for a base steel 5 % Cr, applying variable loads of 196 N, 294 N and 392 N, and speeds of 0,18 m/sec, 0,36 m/sec and 0,54 m/sec // *МЕТАВК*. 2018. Vol. 57, N 4. P. 303—306.
8. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Бреки А. Д. Ускоренные испытания стальных образцов на ИС методом искусственных баз // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 8. С. 671—676.
9. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.
10. Хрущов М. М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / Отв. ред. И. Г. Горячева. М., 2011. 512 с.
11. Патент РФ 2 526 223 С2. Способ оценки износостойкости полимерных композиционных материалов / А. И. Герасимов, О. В. Гоголева, Н. Р. Адамов. 08. 20.2014.
12. Гинзбург Б. М., Точилычиков Д. Г. Влияние фуллеренсодержащих добавок к фторопластам на их несущую способность при трении // *ЖТФ*. 2001. Т. 71, вып. 2. С. 129—132.
13. Энциклопедия трибологии — Абразивное изнашивание [Электронный ресурс]: <[http://tribology.site/index/abrazivnoe\\_izn/0-37](http://tribology.site/index/abrazivnoe_izn/0-37)>.
14. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.

#### Сведения об авторах

Леонид Владимирович Ефремов

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

Андрей Владимирович Тикалов

— аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Поступила в редакцию  
03.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Алгоритмы оценки линейной и объемной (весовой) интенсивности изнашивания материалов на машине трения // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 4. С. 293—301.

### ALGORITHMS FOR EVALUATING LINEAR AND VOLUMETRIC (WEIGHT) WEAR RATES OF MATERIALS USING A FRICTION MACHINE

L. V. Efremov<sup>1</sup>, A. V. Tikalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, 199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: fadinspb@yandex.ru

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Russia  
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Universal methods and algorithms for estimating the wear rate of materials with a friction machine at constant and variable specific pressure are considered. Special attention is paid to the study of linear and volumetric wear. Simplified formula for the wear evaluation based on geometric functions decompositions in a Taylor series are proposed. The efficiency of applying a pair of friction with variable pressure by embedding a disk in a flat sample (the chord method) is proved. The dependence of linear and volumetric wear resistance on variable pressure is revealed. Time dependence of the wear resistance is established with the account for correlation coefficients for each of the sample of materials under consideration.

**Keywords:** wear, wear intensity, material, friction machine, friction pair, sample, evaluation, segment, sector, testing, friction, chord

#### REFERENCES

1. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* (Friction and Wear), Moscow, 1968. (in Russ.)
2. ASTM G77-05(2010), Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org, DOI: 10.1520/G0077-05R10.
3. Lai S.-Q., Yue L., Li T.-S., Hu Z.-M. *Wear*, 2006, vol. 260, pp. 462—468.
4. Banghan W., Qiujuan L., Genliang H. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1794, p. 020030.
5. Khrushchov M.M., Berkovich E.S. *Opredelenie iznosa detaley mashin metodom iskusstvennykh baz* (Determination of Wear of Machine Parts by the Method of Artificial Bases), Moscow, 1959, 217 p. (in Russ.)



6. Goldstein M.A. *Uncertainty Analysis of a Multifunctional Tribometer*, Doctor's thesis, 2017, <https://preserve.lehigh.edu/etd/2604>.
7. Servin R., Calderon I., Perez A., Equihua F., Falcon L., Garcia M., Orozco P. *METABK*, 2018, no. 4(57), pp. 303–306.
8. Efremov L.V., Tikalov A.V. Breki A.D. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 8(59), pp. 671–676. (in Russ.)
9. 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.)
10. Khrushchov M.M. *Treniye, iznos i mikrotverdest' materialov: Izbrannyye raboty* (Friction, Wear and Microhardness of Materials: Selected Works), Moscow, 2011, 510 p. (in Russ.)
11. 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.)
12. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2001, no. 2(46), pp. 249–253.
13. [http://tribology.site/index/abrazivnoe\\_izn/0-37](http://tribology.site/index/abrazivnoe_izn/0-37). (in Russ.)
14. Musalimov V.M., Valetov V.A. *Dinamika friktsionnogo vzaimodeystviya* (Friction Interaction Dynamics), St. Petersburg, 2006, 191 p. (in Russ.)

#### Data on authors

- Leonid V. Efremov** — Dr. Sci., Professor; Institute of Problems of Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Friction and Wear; E-mail: levlefre@ya.ru
- Andrey V. Tikalov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design Basics; E-mail: tikalov2010@mail.ru

**For citation:** 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, N 4. P. 293—301 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-293-301