
НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

УДК 921.01
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-58-63

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ И ОБЪЕМНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Л. В. ЕФРЕМОВ¹, А. В. ТИКАЛОВ^{2*}

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

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

^{*} *tikalov2010@mail.ru*

Аннотация. Решается актуальная проблема обоснования общего метода одновременного оценивания линейной и объемной износостойкости материалов с учетом постоянного и переменного давления на образец. Это открывает возможность оценивать уровень объемной износостойкости по стандартам для линейной износостойкости.

Ключевые слова: износ, износостойкость, материал, машина трения, пара трения, образец, оценка, сегмент, тестирование, трение, хорда

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Метод оценивания линейной и объемной износостойкости материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 1. С. 58—63. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-58-63

METHOD FOR EVALUATING THE LINEAR AND VOLUMETRIC WEAR RESISTANCE OF MATERIALS

L. V. Efremov^{1*}, A. V. Tikalov²

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

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

^{*} *tikalov2010@mail.ru*

Abstract. The actual problem of substantiating the general method for simultaneous evaluation of the linear and volumetric wear resistance of materials is solved with the account for constant and variable pressure on the sample. This makes it possible to assess the level of volumetric wear resistance in accordance with the standards of linear wear resistance.

Keywords: wear, wear resistance, material, friction machine, friction pair, sample, assessment, segment, testing, friction, chord

For citation: Efremov L. V., Tikalov A. V. Method for evaluating the linear and volumetric wear resistance of materials. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 65, N 1. P. 58—63 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-58-63.

При испытаниях образцов материалов на износ принято оценивать два вида износостойкости — либо линейную, либо объемную. Линейная износостойкость обычно определяется инструментальным методом искусственных баз (МИБ) [1, 2], объемная износостойкость — методом взвешивания образцов небольших размеров. В некоторых стандартах испытаний [3] этот показатель является основным и подлежит определению экспериментально, расчетным способом. В настоящей статье обосновывается метод совместной оценки износостойкости

© Ефремов Л. В., Тикалов А. В., 2022

независимо от способа испытаний на износ по стандарту для линейной износостойкости (ГОСТ 23.001-2004).

Для решения поставленной задачи перед началом испытаний следует установить следующие параметры:

- радиус диска r , мм;
- ширина колодки H_k , мм;
- нагрузка на образец F , Н;
- частота вращения диска n , об/мин;
- назначенное время испытаний t , мин;
- начальная масса образца G_0 , мг;
- плотность материала образца γ , мг/мм³ (при методе взвешивания);
- начальный размер искусственной базы, например диаметр лунки d_0 , мм (при МИБ).

При работе пары трения с постоянным давлением P , МПа, следует указать площадь пятна контакта s , мм², по приведенным далее методикам.

По окончании сеанса испытаний за время t должны быть определены либо вторичная масса образца G_1 , либо вторичные размеры искусственной базы, например диаметр лунки d_1 .

Напомним выражения для линейной износостойкости ε_L , км/мм, и объемной износостойкости ε_W , Н·м/мм³:

$$\varepsilon_L = S/\Delta h = 2\pi r n t / (10^6 \cdot \Delta h); \quad (1)$$

$$\varepsilon_W = A/W = 1000FS/W, \quad (2)$$

где S — путь трения, км; Δh — линейный износ, мм, за время t ; A — работа трения, Н·м; W — объем продуктов износа, мм³, за то же время.

Ключевым вопросом для обоснования закона о связи объемной ε_W и линейной ε_L износостойкости является информация о площади пятна контакта поверхностей изнашивающегося и изнашиваемого элементов пары трения, поскольку от нее зависят два важных показателя: давление P и объем W :

$$P = F/s, \quad (3)$$

$$W = s\Delta h. \quad (4)$$

Путем подстановки выражений (3), (4) в формулу объемной износостойкости (2) получаем доказательство закона связи объемной ε_W и линейной ε_L износостойкости, который был ранее обоснован более сложным способом [4—6] при изучении метода „block-on-ring“:

$$\varepsilon_W = 1000FS/W = 1000FS/(s\Delta h) = 1000P\varepsilon_L. \quad (5)$$

Для подтверждения универсальности выражения (5) целесообразно рассмотреть несколько примеров расчета износостойкости пар трения с постоянным и переменным давлением P .

Прежде всего, справедливость формулы (5) можно доказать для простых и эффективных трибометров модели, приведенной на рис. 1, *a*, реализующей схему трения „палец—диск“. При этом палец 2 изнашивается о плоскость вращающегося диска 1 (при скорости вращения n) на расстоянии радиуса r пути трения от центра. Образец имеет площадь контакта s . Износ пальца 2 определяется методом взвешивания по следующим формулам:

$$W = (G_0 - G_1)/\gamma, \quad (6)$$

$$\Delta h = W/s. \quad (7)$$

По данным об износе Δh и площади контакта s можно определить сначала линейную износостойкость ε_L по формуле (1) и давление P по (3), а затем перейти к корректному подтверждению расчета ε_W по закону (5).

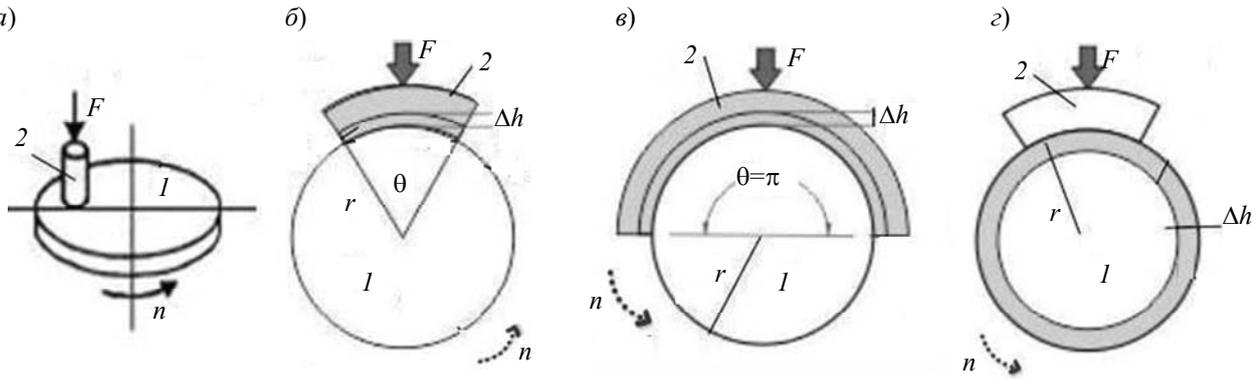


Рис. 1

Далее рассмотрим три стандартные модели пар трения (см. рис. 1, б—г, где 1 — контртело, 2 — образец), работающие при постоянном давлении из-за постоянной величины s [6] и при максимальном износе 1 мм:

- модель 1, б — износ стандартной колодки с углом радиуса $\theta = 45^\circ = 0,25 \pi$ рад;
- модель 1, в — износ подшипника скольжения с углом радиуса $\theta = 180^\circ = \pi$ рад;
- модель 1, г — износ диска с углом радиуса $\theta = 360^\circ = 2\pi$ рад.

Для определения объема W необходимо по результатам испытаний оценить линейный износ Δh , используя МИБ. Например, при использовании сверла с углом заточки 118° имеем $\Delta h = (d_0 - d_1)/2 \operatorname{tg}(118^\circ/2) = 0,3(d_0 - d_1)$. Тогда исходные формулы для расчета объема износа W будут иметь следующий вид:

- для моделей 1, б, в: $W = (\theta/2)[(r + \Delta h)^2 - r^2]H_k$;
- для модели 1, г: $W = (\theta/2)[r^2 - (r - \Delta h)^2]H_k$.

Процедуру их упрощения можно показать на примере моделей 1, б, в:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{\theta}{2} \left((r + \Delta h)^2 - r^2 \right) H_k = \frac{\theta}{2} (r^2 - r^2 + 2\Delta h r + \Delta h^2) = \\
 &= \frac{\theta}{2} \left(2 + \frac{\Delta h}{r} \right) r \Delta h H_k \approx \theta r \Delta h H_k = s \Delta h.
 \end{aligned} \quad (8)$$

Как видно из анализа выражения (8), упрощение с погрешностью $\Delta = 2\%$ достигается за счет пренебрежения малым значением отношения $\Delta h/r = 0,04$ в сумме $(2 \pm \Delta h/r)$ при $\Delta h \leq 1$ мм в формуле

$$\Delta = \frac{\left(2 \pm \frac{\Delta h}{r} \right) - 2}{\left(2 \pm \frac{\Delta h}{r} \right)} = \frac{\pm \Delta h/r}{\left(2 \pm \frac{\Delta h}{r} \right)} = \frac{|0,04|}{2,04} = 0,02 = 2\%. \quad (9)$$

Далее можно оценить площадь пятна контакта $s = W/\Delta h$ из выражения (4) и давление P по формуле (3) для каждой модели пары трения:

- $s = 0,25\pi r H_k$ для модели 1, б (износ колодок);
- $s = \pi r H_k$ для модели 1, в (износ подшипников);
- $s = 2\pi r H_k$ для модели 1, г (износ диска).

Таким образом, получены исходные значения s , Δh и P для обоснования формулы (5) с погрешностью не более 2% для пар трения с постоянным давлением. Имеется в виду, что информация о пути трения $S = 2\pi r n t / 10^6$ и нагрузке F задана при испытаниях. Следовательно, закон (5) корректно подтвержден для пар трения с постоянным давлением.

Остается рассмотреть особенности пары трения с переменным давлением (рис. 2), что характерно для метода „block-on-ring“ по международному стандарту ASTM G77 [3]. Этот способ является одним из эффективных при испытании материалов на износ методом искус-

ственных баз [1]. Как показано на рис. 2, а, исследуемая пара трения состоит из диска 1 радиусом r и прямоугольного плоского бруска (блока) 2 шириной H_k , в плоскую поверхность которого врезается диск, образуя массу износа в виде сегмента. Это отличается от похожего макета 1, б, где пятно контакта практически остается постоянным при малом износе $\Delta h \leq 1\text{—}2$ мм. Метод „block-on-ring“ в работах авторов настоящей статьи (например, [4]) назван методом хорды, поскольку все исследуемые параметры являются функцией хорды L , мм, образованной из-за врезания диска в образец. Величину L можно точно измерить при испытаниях (рис. 2, б). Поскольку величина L и пятно контакта $s = LH_k$ по мере изнашивания образца увеличиваются, то этот метод характеризуется переменным давлением (3) в отличие от модели, приведенной на рис. 1, б.

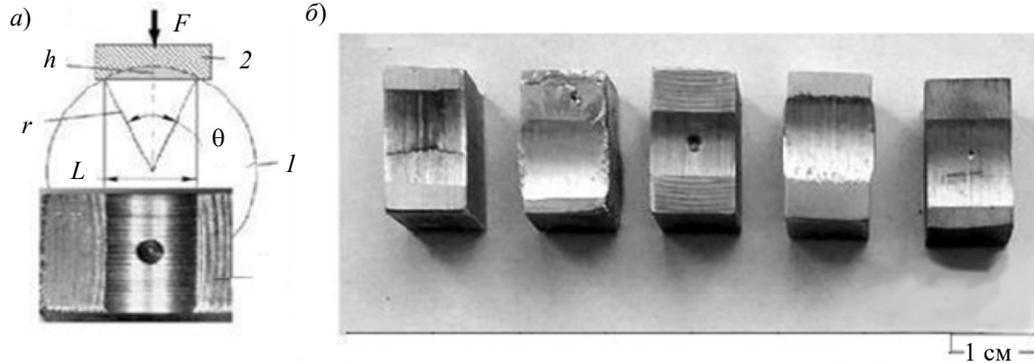


Рис. 2

Для получения упрощенного алгоритма оценки объема $W \approx L^3/(12r)$ применен способ разложения точной формулы

$$W = \left[r^2 \arcsin\left(\frac{L}{2r}\right) - \frac{L}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right] H_k \rightarrow \left(\frac{L^3}{12r} + \frac{L^5}{160r^3} + \frac{3L^7}{3584r^5} \dots \right) H_k \approx \frac{L^3}{12r} H_k \quad (10)$$

в ряд Тейлора с отбрасыванием членов этого ряда высокого порядка, кроме одного или двух первых [5]. Очевидно, что площадь пятна контакта определяется по формуле $s = LH_k$. Поэтому приближенный износ соответствует выражению

$$\Delta h = W/s = W/LH_k = \frac{L^2}{12r}. \quad (11)$$

Зависимость (11) обеспечивает совпадение износостойкости, определенной как методом взвешивания, так и инструментальным методом хорды. После определения давления по формуле (3) остается подтвердить закон (5) для расчета объемной износостойкости ε_W . При этом погрешность расчета по формуле (11) не превышает 3 %, так как зависит только от измерения величины хорды L .

В заключение целесообразно рассмотреть условный пример оценки объемной износостойкости образцов материалов пар трения моделей, приведенных на рис. 1, 2.

Для сравнения указанных моделей использованы одинаковые исходные данные режимов испытаний при максимальном износе $\Delta h = 1$ мм: $r = 25$ мм, $H_k = 10$ мм, $F = 200$ Н, $n = 100$ об/мин, $t = 10$ мин. Поэтому для всех моделей получена одинаковая линейная износостойкость $\varepsilon_L = 2\pi r n t / 10^6 \Delta h = 0,16$ км/мм (см. таблицу).

Модель	ε_L , км/мм	s , мм ²	P , МПа	ε_W , Н·м/мм ³
1, а	0,16	196,35	1,02	160
1, б	0,16	196,35	1,02	160
1, в	0,16	785,4	0,25	40
1, г	0,16	1570,8	0,13	20
2, а	0,16	173,21	1,15	181,38

Основное различие результатов расчета давления P и объемной износостойкости ε_W связано с разными способами оценки площади пятна контакта s . Эта величина для модели 1, a условно принята равной площади контакта в модели 1, b . При круглом сечении пальца 2 (см. рис. 1, a) его диаметр составит $D = \sqrt{4s/\pi} = \sqrt{4 \cdot 196,35/\pi} = 15,8$ мм.

Отметим, что ширина стандартной округлой колодки (см. рис. 1, b) составляет 19,6 мм при радиусе диска 25 мм, а длина хорды сектора врезания диска (в течение 10 мин) при $\Delta h = 1$ мм равна $L = \sqrt{\Delta h \cdot 12r} = \sqrt{1 \cdot 12 \cdot 25} = 17,32$ мм для модели 2, a , что обеспечивает близкие значения пятна контакта s , давления P и объемной износостойкости ε_W моделей 1, a , 1, b и 2, a . Модели 1, b и 1, c имеют значительно большие площади пятен контакта $s = \pi r H_k = 785,4$ мм² и $s = 2\pi r H_k = 1570,8$ мм², что обуславливает малые значения ε_W — 40 и 20 Н·м/мм³ соответственно. Это в 4—8 раз меньше значения ε_W , равного 160 и 180 Н·м/мм³, для моделей 1, a , 1, b и 2, a .

Таким образом, выполнено корректное обоснование метода, характеризующего естественную взаимосвязь объемной и линейной износостойкости с учетом давления на образец при трибологических испытаниях. Универсальность этого метода подтверждена расчетом износостойкости материалов при испытаниях любых моделей пар трения как при постоянном, так и при переменном давлении, включая модель типа „block-on-ring“. Большое практическое значение этот метод имеет, например, для оценки линейной износостойкости материала в случае применения весового способа оценки массы продуктов износа. Предложенный алгоритм расчета позволяет упрощенно перейти к оценке линейной износостойкости испытуемых материалов, что может облегчить сравнительную оценку результатов триботехнических испытаний, проведенных на различном оборудовании по стандарту для линейной износостойкости (ГОСТ 23.001-2004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрущов М. М., Беркович Е. С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.
2. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
3. 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.
4. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Алгоритмы оценки линейной, объемной (весовой) интенсивности изнашивания материалов на машине трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 293—301.
5. 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.
6. Development of a method for testing the wear resistance of friction pairs based on the synthesis of the method of M. V. Lomonosov with the improved method of artificial bases // R. V. Davydov, A. V. Tkalov, S. G. Chulkin, A. D. Breki, L. B. Efremov, V. Yu. Rud, N. N. Bykova, L. R. Valiullin // J. of Physics: Conf. Series. 2021. DOI:10.1088/1742-6596/1942/1/012058.

Сведения об авторах

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, кафедра 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 03.08.2021; одобрена после рецензирования 30.08.2021; принята к публикации 02.12.2021.

REFERENCES

1. Khrushchov M.M., Berkovich E.S. *Opredeleniye iznosa detaley mashin metodom iskusstvennykh baz* (Determination of Wear of Machine Parts by the Method of Artificial Bases), Moscow, 1959, 217 p. (in Russ.)
2. Musalimov V.M., Valetov V.A. *Dinamika friktsionnogo vzaimodeystviya* (Dynamics of Frictional Interaction), St. Petersburg, 2006, 191 p. (in Russ.)
3. *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.
4. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 4(63), pp. 293–301. (in Russ.)
5. 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.)
6. Davydov R.V., Tikalov A.V., Chulkin S.G., Breki A.D., Efremov L.B., Rud V.Yu., Bykova N.N., Valiullin L.R. *NMAT 2020 IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1942, pp. 012058, DOI:10.1088/1742-6596/1942/1/012058.

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. Tikalov** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design Basics; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Received 03.08.2021; approved after reviewing 30.08.2021; accepted for publication 02.12.2021.