

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ НА МАШИНЕ ТРЕНИЯ

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

Рассмотрен процесс изнашивания плоского образца от врезания вращающегося диска под воздействием на него постоянной нормальной нагрузки. Предложена модель, позволяющая корректно оценивать как линейную, так и массовую интенсивность изнашивания. Разложение точной геометрической формулы расчета высоты и площади сегмента в ряд Тейлора позволило упростить функцию расчета исследуемых параметров от длины хорды. Предлагаемая модель имеет следующие преимущества: простая и технологичная конструкция исследуемого образца в виде прямоугольного бруска малых размеров; точное и простое определение линейного и массового износа по длине хорды; возможность проведения ускоренных испытаний износостойкости различных материалов как при абразивном износе, так и при испытаниях со смазочным материалом. Эффективность рассмотренной методики подтверждена сравнительным тестированием износостойкости ряда реальных материалов с оценкой влияния некоторых технологических факторов.

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

Статья посвящена обоснованию алгоритма проведения сравнительного тестирования износостойкости материала любой твердости на машине трения по схеме трения „диск—колодка“. В результате фрикционного взаимодействия пары трения на изношенной поверхности бруска образуется лунка в виде сегмента от врезания в него диска. При этом наблюдается снижение удельного давления на образец из-за увеличения хорды сегмента. Подобная пара трения рассмотрена в патенте [1] и работе [2], посвященной оценке износостойкости полимерных композиционных материалов при испытании без смазочного материала. Мерой износостойкости служит графическая зависимость удельного давления p от площади сегмента при постоянной нагрузке N . В последнее время конструкция пары трения „брусок—диск“ широко применяется в зарубежных лабораториях, оснащенных дорогостоящим стендовым оборудованием, позволяющим исследовать основные трибологические характеристики исследуемых пар трения (рис. 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).



Рис. 1

В настоящей работе применяется стандартная серийная машина трения СМЦ-2, для которой был спроектирован и рассчитан специальный держатель (рис. 2, а).

В работе [2] рассматривается функция линейного износа от ширины канавки, предложенная М. М. Хрущовым [3]. Однако обоснования этой простой функции, разработанной для клинообразной формы лунки при ее нарезании резцом на специальном станке (УПОИ-6), в литературе найти не удалось. Поэтому вопрос использования указанной выше пары трения с плоским образцом для тестирования любых материалов остался открытым.

Цель настоящей работы — подтверждение эффективности метода сравнительного тестирования износостойкости любого материала на машине трения, оснащенной держателем плоского образца в виде бруска, в результате изнашивания которого происходит уменьшение удельного давления на образец [4]. Для этого целесообразно рассмотреть несколько вариантов оценки износостойкости по данным о длине хорды сегмента. Для достижения поставленной цели необходимо определить износ по площади сегмента врезания диска в брусок.

При исследовании стандартной пары трения „колодка—диск“ криволинейная поверхность колодки полностью соприкасается с поверхностью диска, что обеспечивает постоянное удельное давление в процессе изнашивания [5]. Исследуемая конструкция пары трения (рис. 2, а) отличается от стандартной тем, что применяется небольшой брусок с плоской поверхностью, который в первоначальный момент времени опирается на поверхность диска по прямой линии.

Для обеспечения необходимой точности в процессе измерения длины хорды использован цифровой микроскоп с увеличением до 200 крат, оснащенный программой распознавания образов с целью точного измерения размеров изображения любой геометрической формы, включая тарировочную (калибровочную) сетку.

В работе [6] рекомендовано подбирать фрикционные пары трения таким образом, чтобы твердость исследуемого бруска была не менее чем в 1,5 раз меньше твердости диска.

При исследовании изнашивания использовались абразивные шкурки (АШ600) с величиной зерна не более 0,2 мм, которые наклеивались на диск. Для каждого образца материала использовалась новая шкурка.

На рис. 2, а показан эскиз исследуемой пары трения, в которой закрепленный в гнезде нажимного устройства 4 с помощью винта 3 образец — плоский брусок 2 размером 10×10×18 мм — трется о диск 1 [7].

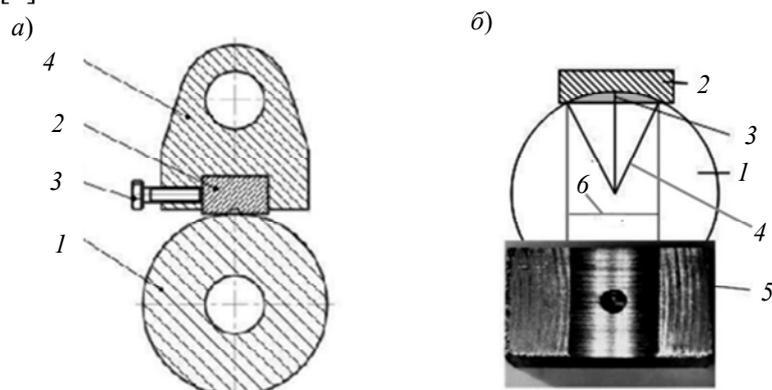


Рис. 2

Перед началом испытаний брусок с диском соприкасаются по прямой линии, а площадь пятна контакта близка к нулю, что приводит к появлению большого удельного давления в начальный момент времени. В процессе испытаний диск врезается в брусок и образует на его поверхности сегмент площадью A . При этом на поверхности бруска шириной H образуется хорда L , границы которой отчетливо видны (рис. 2, б, 4 — радиус диска, 5 — брусок с образованным сегментом, 6 — хорда). Увеличение хорды по мере изнашивания сопровождается

снижением удельного давления p по причине увеличения площади пятна контакта. По окончании испытаний удельное давление p определяется по формуле:

$$p = \frac{N}{LH}. \quad (1)$$

Интенсивность изнашивания I и износостойкость ε рассчитываются по формулам:

$$I = \frac{\pi D n T}{1000 h_l}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{I} = \frac{1000 h_l}{\pi D n T}, \quad (3)$$

где h_l — линейный износ, D — диаметр диска, n — частота вращения диска.

Для обоснования простых вариантов расчета величины линейного износа h_l и площади сегмента A с погрешностью не более 1,2 % при длине хорды до 10 мм в редакторе MathCad, при помощи оператора *series* выполнено разложение точных геометрических функций в ряд Тейлора и принят первый член ряда для расчета. Этот метод условно можно назвать „метод хорды“, поскольку исходным параметром во всех формулах является длина хорды L , которая образуется за время испытаний T и измеряется микроскопом или, при большом значении длины хорды, другим измерительным прибором.

Таким образом, максимальный линейный износ h рассчитывается по формуле:

$$h = r \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2r} \right)^2} \right) \text{series}, L \Rightarrow \frac{L^2}{8r} + \frac{L^4}{128r^3} + \dots \approx \frac{L^2}{8r}. \quad (4)$$

В свою очередь, площадь образованного сегмента A рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{r^2}{2} \left(\frac{L}{r} - \sin\left(\frac{L}{r}\right) \right) \text{series}, L \rightarrow \frac{L^3}{12r} + \frac{L^5}{240r^3} + \dots \approx \frac{L^3}{12r}. \quad (5)$$

Оптимальный линейный h_l и весовой h_m износ рассчитывается по формулам:

$$h_l = \frac{A}{L} = \frac{L^2}{12r}, \quad (6)$$

$$h_m = AH\gamma = h_l LH\gamma, \quad (7)$$

где γ — удельный вес материала бруска.

Линейный износ h_l нужно определять по (6) с учетом площади сегмента A по известной функции (5) от угла хорды Q путем замены сегмента прямоугольником с той же площадью при длине прямоугольника, равной длине хорды L :

$$Q = 2a \sin\left(\frac{L}{2r}\right) \text{series}, L \rightarrow \frac{L}{r} + \frac{L^3}{24r^3} + \frac{3L^5}{640r^5} + \dots \approx \frac{L}{r}. \quad (8)$$

При разложении функций (4), (5) и (8) в ряд Тейлора с помощью оператора *series* в редакторе MathCad удалось получить простейшие формулы с погрешностью вычисления не более 1,2 % (табл. 1).

Таблица 1

L , мм	Погрешность расчета по соответствующим формулам, %			
	Q	A	h_l	h_m
2	0,027	0,048	0,048	0,048
5	0,167	0,301	0,301	0,301
10	0,674	1,212	1,212	1,212

Сравнение формул (4) и (6) показывает, что $h = 1,5h_l$.

Вычисления показали, что при длине хорды $L = 10$ мм массовый износ для стали составил всего 0,265 г, что требует применения очень точных весов. Метод хорды не имеет таких ограничений [8].

Таким образом, получены все данные для расчета износостойкости и интенсивности изнашивания материала в зависимости от длины хорды. В некоторых случаях износостойкость оценивалась по удельному давлению p , однако на практике широкое распространение получило сравнительное тестирование металлических материалов [9]. При этом во всех изученных иностранных научных источниках испытания проводятся при постоянной нагрузке N . Удельное давление p рассчитывается в конечный момент испытаний.

Для особо твердых материалов заказчик может потребовать результатов оценки износостойкости при соблюдении определенного удельного давления p . Для этого можно рекомендовать модель оценки длины хорды L . Выполняются два этапа исследований — настроечный и оценочный. Для настроечного используется одна сторона бруска, где при заданной нагрузке N выполняется измерение длины хорды L_1 , L_2 и L_3 при трех значениях времени наработки, например $T_1 = 5$, $T_2 = 10$ и $T_3 = 15$ мин. Затем методом наименьших квадратов (МНК) при логарифмической анаморфозе $X_i = \log(L_i)$, $Y_i = \log(T_i)$ в редакторе MathCad определяются степенные функции:

$$L(T) = \left(\frac{T}{a}\right)^{1/b} \quad (9)$$

Оценивается требуемая длина хорды L по обратной функции (1): $L = N/(p \cdot H)$.

На втором этапе определяется время T , при котором наступит необходимое удельное давление p при соответствующей длине хорды L :

$$T(L) = aL^b \quad (10)$$

где a и b — коэффициенты для каждого материала, полученные в редакторе MathCad.

Для проверки эффективности предложенного метода выполнены сравнительные испытания износостойкости семи различных материалов (рис. 3, a — при абразивном изнашивании, b — при работе со смазочным материалом): 1 — сталь 08X18H10T; 2 — сталь 40; 3 — алюминий АМг5М (образец №1); 4 — алюминий АМг5М (образец №2); 5 — бронза БрАЖНц 9-4-4-1; 6 — олово О1; 7 — чугун СЧ30.

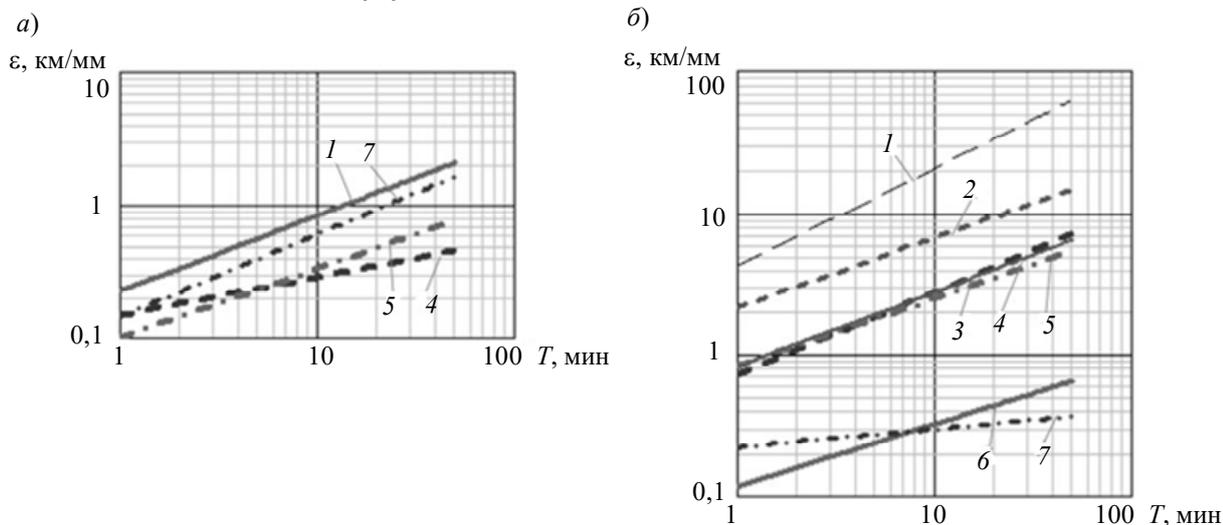


Рис. 2

Завершается тестирование сравнением относительной износостойкости материалов $\varepsilon' = \varepsilon(T)/\varepsilon_0(T)$, где $T = \text{const}$ для каждого образца, $\varepsilon_0(T)$ — износостойкость эталонного материала. В рассмотренном примере для тестирования принято время наработки $T = 10$ мин, а в качестве эталонного материала принята сталь 40.

Основные испытания всех материалов проводились при граничном трении со смазочным материалом. Данные из табл. 2 и построенная по ней гистограмма (рис. 4, зона А — абразивный износ; зона В — цветные металлы со смазочным материалом; зона С — граничное трение со смазочным материалом для сталей; k — номер образца) позволяют предположить, что в большинстве случаев износостойкость зависит от твердости материала [10]. В результате получен высокий коэффициент корреляции K эмпирических и теоретических данных.

Таблица 2

№	Пара трения		Коэффициенты		K	$\varepsilon(T)$, км/мм	ε'
	диск	брусочек	a	b			
1	По абразиву АШ600	Сталь 20	0,226	0,57	0,996	0,842	0,13
2		Чугун СЧ30	0,144	0,625	0,970	0,608	0,09
3		Бронза БРАЖМц 9-4-4-1	0,164	0,201	0,977	0,262	0,04
4		Алюминий АМг5М	0,101	0,519	0,987	0,332	0,05
5	Со смазочным материалом	Олово О1	0,119	0,434	0,995	0,323	0,05
6		Чугун СЧ30	0,223	0,125	0,994	0,298	0,04 4
7		Алюминий АМг5М (образец №1)	0,718	0,591	0,994	2,792	0,41
8		Алюминий АМг5М (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

Максимальная относительная износостойкость наблюдаются у стали, износостойкость для алюминия и бронзы практически совпала ($\varepsilon'=0,4$). Также проявились особые свойства чугуна, у которого относительная износостойкость составила $\varepsilon'=0,04$ (меньше, чем у олова!), хотя его твердость соизмерима с твердостью стали.

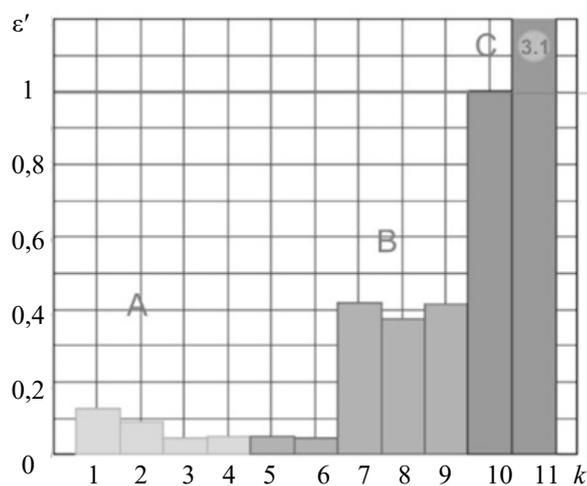


Рис. 4

Отметим, что у чугуна наблюдается самая малая относительная износостойкость в диапазоне от 0,033 до 0,044 как при абразивном изнашивании (сухое трение), так и при граничном трении со смазочным материалом, что также подтверждается из источника [11]. Это явление объясняется хорошими антифрикционными свойствами чугуна в сочетании с прочностными характеристиками.

Приведенные в статье данные подтверждают преимущества применения „метода хорды“ для тестирования износостойкости материалов при исследовании пары трения „брусочек—

диск“. В частности, метод хорд оказался несоизмеримо проще и точнее метода взвешивания для исследуемых материалов, что подтверждается высоким коэффициентом корреляции.

Применение теории рядов позволило предложить формулы для оптимальной и весовой оценки линейной износостойкости по размеру хорды. Это позволило создать рабочий вариант методики сравнительного тестирования износостойкости материалов на машине трения при заданных эталонных параметрах (включая время сеанса испытаний). Исследования сравнительного тестирования ряда образцов показали зависимость износостойкости от твердости и антифрикционных свойств материалов. Например, обнаружена минимальная износостойкость чугуна, несмотря на его высокую твердость.

Рекомендуется отдать предпочтение сравнительным испытаниям металлов при граничном трении со смазочным материалом, когда наблюдаются минимальные температура и вибрация. Такой метод проще реализовать, по сравнению с абразивными испытаниями. Разработанная конструкция пары трения и алгоритмы метода хорды могут найти широкое применение для сравнительного тестирования различных твердых материалов. При испытаниях целесообразно использовать разработанную конструкцию пары трения и программы расчета износостойкости по данным о времени сеанса испытания T и длине хорды L . Выбор режимов и условий испытаний, а также выбор эталонного образца, должен решаться исполнителем с учетом особенностей эксплуатации материала и требованиями заказчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ 2 526 223 С2. Способ оценки износостойкости полимерных композиционных материалов / А. И. Герасимов, О. В. Гоголева, Н. Р. Адамов. 08. 20.2014.
2. 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.
3. Хрущов М. М., Беркович Е. С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.
4. Goldstein M. A. Uncertainty Analysis of a Multifunctional Tribometer: Theses and Dissertations. 2017 [Электронный ресурс]: <<https://preserve.lehigh.edu/etd/2604>>.
5. 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.
6. Хрущов М. М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / Отв. ред. И. Г. Горячева. 512 с.
7. 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.
8. Banghan W., Qiujuan L., Genliang H. Tribological behavior of Nano-Al₂O₃ and PEEK einforced PTFE composites // AIP Conf. Proc. 2017. Vol. 1794. P. 020030.
9. Musalimov V. M., Nuzhdin K. A. Modelling of External Dynamics of Frictional Interaction Using the Elastic System Stability Theory // J. of Friction and Wear. 2019. Vol. 40, N 1. P. 51—57.
10. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
11. 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
07.12.19 г.

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Моделирование процесса изнашивания плоских образцов материалов на машине трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 163—169.

SIMULATION OF THE WEAR PROCESS OF FLAT MATERIAL SAMPLES ON A FRICTION MACHINE

L. V. Efremov¹, A. V. Tikalov²

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

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Russia*
E-mail: tikalov2010@mail.ru

The process of wear of a flat sample from the insertion of a rotating disk under the influence of a constant normal load is considered. A model is proposed that allows for a correct estimation of both linear and mass wear intensity. Decomposition of the exact geometric formula for calculating segment height and area into the Taylor makes it possible to simplify calculation of the studied parameters dependence from the chord length. The proposed model is noted to have the following advantages: a simple and technological design of the test sample in the form of a rectangular bar of small dimensions; accurate and simple determination of linear and mass wear along the length of the chord; possibility of conducting accelerated tests of the wear resistance of various materials both during abrasive wear and during tests with a lubricant. The described method effectiveness is confirmed by comparative testing of the wear resistance of several real materials with an assessment of the influence of certain technological factors.

Keywords: wear, wear resistance, material, friction machine, sample, testing, estimate, friction, segment, chord, disk

REFERENCES

1. 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.)
2. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2001, no. 2(46), pp. 249–253.
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. 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.)
5. Goldstein M.A. *Uncertainty Analysis of a Multifunctional Tribometer*, Doctor's thesis, 2017, <https://preserve.lehigh.edu/etd/2604>.
6. Servin R., Calderon I., Perez A., Equihua F., Falcon L., Garcia M., Orozco P. *METABK*, 2018, no. 4(57), pp. 303–306.
7. Efremov L.V., Tikalov A.V. Breki A.D. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 8(59), pp. 671–676. (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. Khrushchov M.M. *Treniye, iznos i mikrotverdest' materialov: Izbrannyye raboty* (Friction, Wear and Microhardness of Materials: Selected Works), Moscow, 2011, 510 p. (in Russ.)
10. Lai S.-Q., Yue L., Li T.-S., Hu Z.-M. *Wear*, 2006, vol. 260, pp. 462–468.
11. <https://planetcalc.ru/1421/>. (in Russ.)
12. *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.)
13. Banghan W., Qiujuan L., Genliang H. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1794, p. 020030.
14. Musalimov V.M., Nuzhdin K.A. *Journal of Friction and Wear*, 2019, no. 1(40), pp. 51–57.
15. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* (Friction and Wear), Moscow, 1968. (in Russ.)
16. 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. Simulation of the wear process of flat material samples on a friction machine. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 2. P. 163—169 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-163-169