

УДК 921.01

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-855-861

АЛГОРИТМЫ НОВЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Тикалов, Л.В. Ефремов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация
Адрес для переписки: tikalov2010@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.06.19, принята к печати 23.07.19
Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Тикалов А.В., Ефремов Л.В. Алгоритмы новых методов оценки износостойкости материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 855–861. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-855-861

Аннотация

Предмет исследования. Представлены новые методы и алгоритмы проведения и анализа испытаний по определению износостойкости материалов. Испытаны различные пары трения, которые позволили определить зависимость износостойкости различных материалов как от режимов работы узла трения, так и от их твердости. **Метод.** Для расчета параметров износостойкости применен усовершенствованный метод искусственных баз и метод хорды. Для определения основного расчетного показателя, полученного в результате сверления на поверхности испытуемого материала — диаметра лунки, применены цифровой микроскоп и программа распознавания образов. **Основные результаты.** Разработан усовершенствованный метод искусственных баз, позволяющий быстро определять износ пар трения по разработанным алгоритмам и рассчитать основные параметры износостойкости. Применение материалов с различными механическими и физическими свойствами позволило определить время работы каждого образца, которое позволяет количественно оценить износостойкость исследуемой пары трения. Показано, что с увеличением твердости испытываемого материала износостойкость повышается в связи с появлением наклепа непосредственно в зоне трения. **Практическая значимость.** Разработанные методики и алгоритмы расчета износа и износостойкости могут найти применение при определении износа и подборе наиболее износостойких пар трения в таких важных узлах, как подшипники скольжения, цилиндрические втулки, поршни и крейцкопфы двигателей и компрессорных агрегатов, в торцевых уплотнениях насосов и другие.

Ключевые слова

цифровой микроскоп, подшипник скольжения, износостойкость, машина трения, лунка, образец, пара трения

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР: «Исследование эксплуатационной износостойкости подшипников скольжения на основе усовершенствованного метода искусственных баз».

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-855-861

ALGORITHMS OF NEW METHODS FOR MATERIAL WEAR RESISTANCE ESTIMATION

A.V. Tikalov, L.V. Efremov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation
Corresponding author: tikalov2010@mail.ru

Article info

Received 03.06.19, accepted 23.07.19
Article in Russian

For citation: Tikalov A.V., Efremov L.V. Algorithms of new methods for material wear resistance estimation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 855–861 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-855-861

Abstract

Subject of Research. New methods and algorithms for testing and determination of material wear resistance are presented. Various friction pairs have been tested, which made it possible to determine the dependence of the wear resistance of various materials both on the friction unit operating modes and on their hardness. **Method.** To calculate the parameters of wear resistance, an improved method of artificial bases and chord method were applied. A digital microscope and pattern recognition program were used to determine the diameter of the hole (the main calculation indicator of the resultant drilling on the test material surface). **Main Results.** An improved method of artificial bases has been developed, which makes it possible to determine the wear of friction pairs and calculate the basic parameters of wear resistance using the developed algorithms. The use of various

grades of material with different mechanical and physical properties made it possible to determine the operating time of each sample and enables the quantitative assessment of the wear resistance of each friction pair under research. With an increase in the hardness of the test material, the wear resistance increases as a result of mechanical hardening directly in the friction zone.

Practical Relevance. The developed methods and algorithms for wear and wear resistance calculation can be widely used in wear determination and selection of the most wear-resistant friction pairs in such important components as plain bearings, cylinder bushings, pistons and engine crossheads, compressor units, and mechanical seals of pumps.

Keywords

digital microscope, sliding bearing, wear resistance, friction machine, well, sample, friction pair

Acknowledgements

The work was performed in the framework of the research topic: “The study of the wear resistance of sliding bearings based on the improved method of artificial bases”.

Введение

Оценка износостойкости различных материалов при разработке или модернизации машин является одним из главных направлений в машиностроении. Для решения этой задачи на машине трения применяются различные методы тестирования пар трения при изучении износостойкости. Износ определялся в большинстве случаев методом взвешивания [1] с пересчетом на относительный износ. Этот метод требует наличия особо точных весов при решении проблемы обеспечения требуемой погрешности пересчета весового износа в линейный износ. Однако эту проблему проще решать новым вариантом метода искусственных баз [2] с применением специального микроскопа и программы распознавания образов. Основной задачей при проведении испытаний для сравнительной оценки износостойкости пар трения являлось установить одинаковый для всех образцов режим испытаний: частоту вращения вала, нагрузку, температуру, время испытаний [3].

Было проверено несколько вариантов методик тестирования материалов на износостойкость. Как будет показано далее, были апробированы два варианта наладочных испытаний, которые выполнялись по три сеанса с относительно малой периодичностью (от 2 до 15 мин) для установления зависимости износостойкости материалов от времени.

Усовершенствованный метод искусственных баз

Усовершенствованный метод искусственных баз относится к наладочному этапу испытаний [4] пары трения ролик-полувкладыш (рис. 1, а). Для моделирования реальных условий необходимо большое количество времени испытаний, в связи с чем возникла необходимость разработать альтернативный вариант ускоренных испытаний с целью оценки износостойкости [5] при абразивном изнашивании трех материалов: сталь (200 НВ), бронза (60 НВ), алюминий (50 НВ).

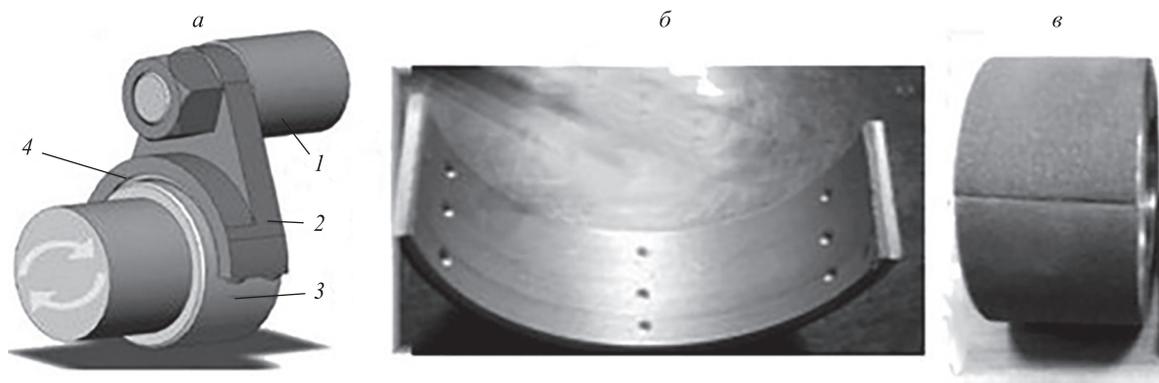


Рис. 1. Пара трения ролик-полувкладыш: а — узел трения, состоящий из ролика 3 (в), держателя 2, опоры 1 и полувкладыша 4 (б)

На полувкладыше (рис. 1, б) нарезались лунки и производился их замер при помощи цифрового микроскопа как до износа, так и после каждого сеанса испытаний. Данные обрабатывались при помощи программного обеспечения; расчеты основных параметров износостойкости производились в специальном алгоритме, составленном в редакторе MathCad. Результаты измерений лунок передавались на обработку по формуле (1).

Для абразивного изнашивания [6] использовалась мелкозернистая абразивная шкурка (АШ) — АШ600 (размер зерна 25 мкм), которая наклеивалась на ролик (рис. 1, в).

Для испытания образцов был назначен следующий режим работы: частота вращения $n = 300$ об/мин, нагрузка $N = 3$ кгс, диаметр ролика $D = 50$ мм. Удельная нагрузка на площадь проекции вкладыша составляла $0,315$ кгс/см².

В процессе испытаний износ измерялся методом искусственных баз с применением стандартного сверла с углом заточки $\varphi = 118^\circ$ [7]. Каждому материалу соответствовала своя серия испытаний i , состоящая из трех сеансов продолжительностью $T_i = 5$ мин. Суммарное время каждой серии испытаний составляло 15 мин. Соответствующий алгоритм расчета основных параметров износостойкости разработан в редакторе MathCad (рис. 2).

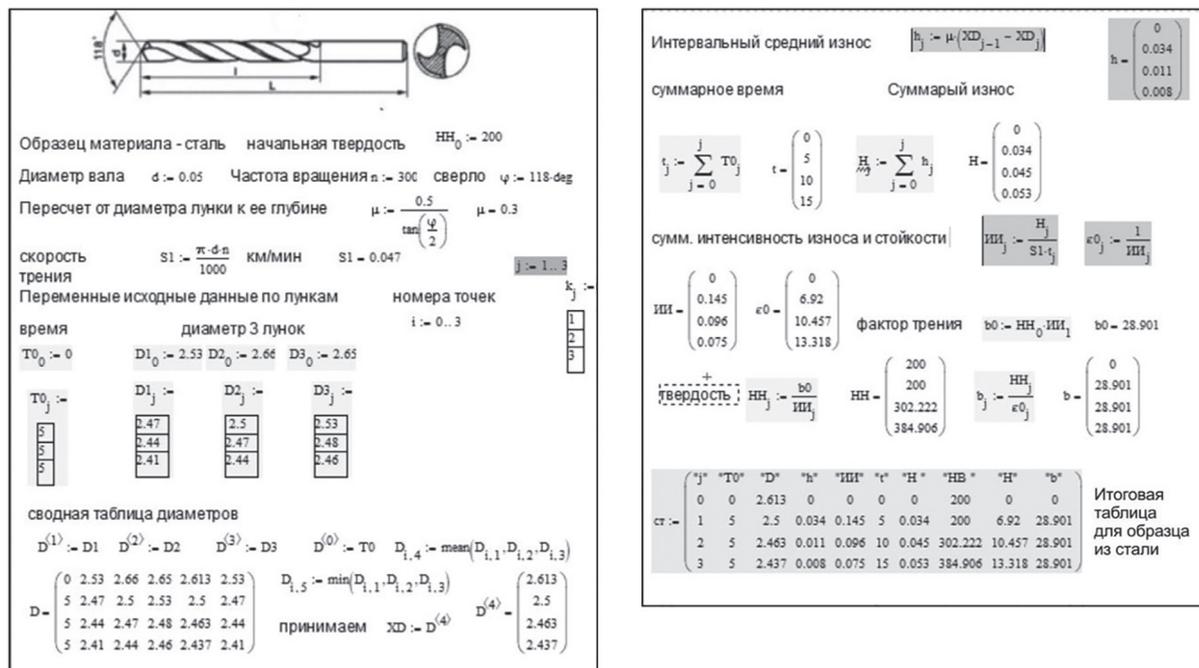


Рис. 2. Алгоритм расчета абразивного изнашивания стального образца

Исходными данными в алгоритме для расчета основных показателей износостойкости служит диаметр лунки d_i , замеренный перед началом и после окончания каждого сеанса. Зная диаметр лунки d_i , находим интервальный износ Iz_i (1) и суммарный износ SIz_i (2):

$$Iz_i = \mu(d_{i-1} + d_i), \tag{1}$$

где μ — коэффициент, $\mu = 0,5/\tan(\varphi/2)$.

$$SIz_i = \sum_0^i Iz_i. \tag{2}$$

Зная суммарный износ, рассчитаем интенсивность изнашивания Jji :

$$Jji = \frac{SIz_i}{(10^3 \pi D n \sum_0^i T_i)}, \tag{3}$$

где $\sum_0^i T_i$ — общее время работы всех сеансов для одного образца, мин.

Износостойкость образца Js_i определяется за суммарное время работы

$$Js_i = 1/Jji. \tag{4}$$

Учитывая, что в процессе трения образца с роликом [8] образуется упрочнение поверхности (наклев), твердость HB_i непосредственно в зоне контакта повышается [9] и может быть рассчитана по формуле:

$$HB_i = b/Jji, \tag{5}$$

где b — фактор пары трения (получен расчетным путем для каждого отдельно образца).

На рис. 2 (два фрагмента) изображен алгоритм расчета основных параметров износостойкости по эмпирическим данным для серии испытаний на абразивный износ стального образца. Алгоритм содержит три вектора измерений диаметров трех лунок, вырезанных на поверхности трения исследуемого образца [10]. При расчете было использовано среднеарифметическое значение диаметров всех лунок для каждого из четырех измерений (с учетом нулевого измерения нарезанной начальной лунки).

Основные результаты расчетов по алгоритму (рис. 2) сведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики абразивного изнашивания стального образца

Сеанс	T, мин	D, мм	Iz, мм	Σ Iz, мм	Jj, мм/км	Js, км/мм	HB
0	0	2,613	0	0	0	0	200
1	5	2,5	0,034	0,034	0,145	6,9	200
2	10	2,463	0,011	0,045	0,096	10,5	302
3	15	2,437	0,008	0,053	0,075	13,3	385

По полученным данным, на рис. 3, а показаны зависимости сравнения суммарной износостойкости и твердости при трении стального образца по ролику с абразивной шкуркой АШ600 (кривая 1) и по чистому стальному ролику (без АШ600), но со смазочным материалом (кривая 2).

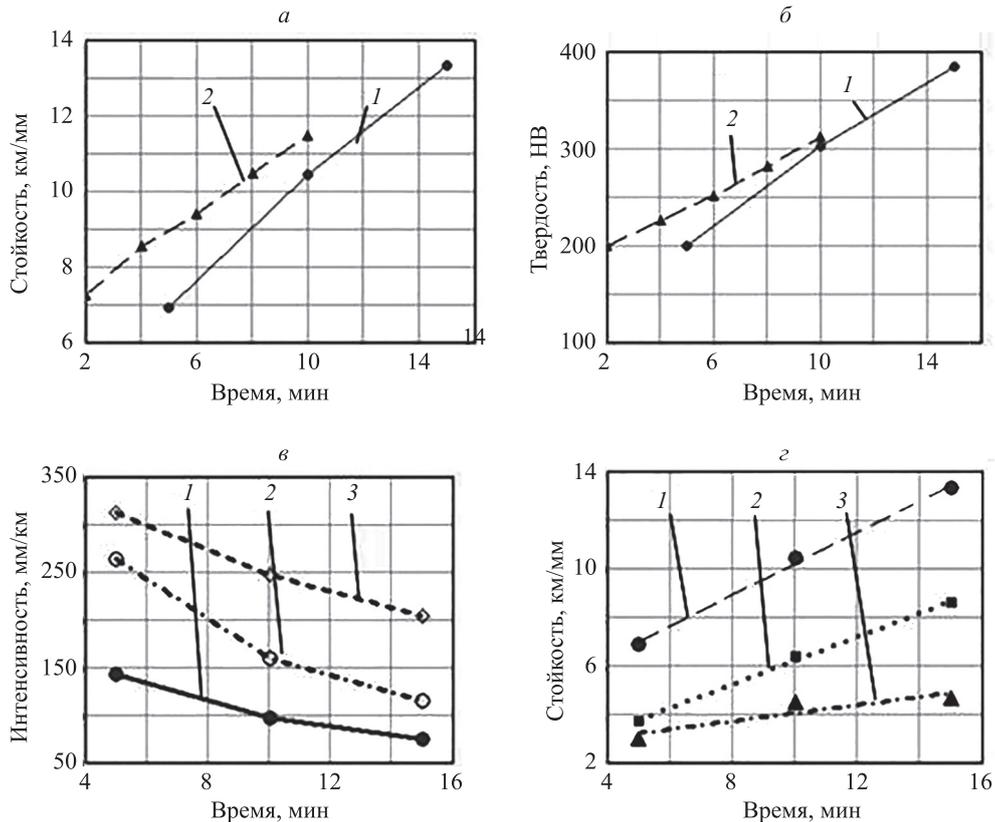


Рис. 3. Результаты испытаний в виде графиков: (а) и (б) — зависимости износостойкости и твердости соответственно от времени при абразивном изнашивании стали 1 и при изнашивании стали со смазкой 2; (в) и (з) — зависимости интенсивности изнашивания и износостойкости от времени соответственно для стали 1, алюминия 2 и бронзы 3

Из графиков (на рис. 3) видно, что износостойкость и твердость увеличиваются с увеличением времени работы узла трения, а интенсивность изнашивания уменьшается.

Исследования износостойкости материалов при абразивном изнашивании завершается расчетом относительной износостойкости (ИСо), как отношения значения испытанных материалов к эталону. В данном случае за эталон принимаем образец из стали для данной периодичности, например: $t = 5, 10$ и 15 мин (табл. 2). Необходимо использовать только одно стандартное время, например: $t = 10$ мин. Таким образом, получаем значение ИСо: для стали ИСо = 1, для алюминия ИСо $\approx 0,6$ и для бронзы ИСо $\approx 0,4$.

Таблица 2. Относительная износостойкость материалов

Время, мин	Износостойкость эталона, км/мм	Относительная износостойкость, км/мм		
		Сталь	Алюминий	Бронза
5	6,92	1	0,541	0,431
10	10,457	1	0,611	0,43
15	13,318	1	0,647	0,35

Метод хорды

Для определения закономерностей зависимости относительной износостойкости ИСо от марки испытываемого материалов [11] был разработан метод хорды, который предназначен для испытаний образцов на машине трения с более простой, экономически эффективной и технологичной конструкцией (рис. 4).

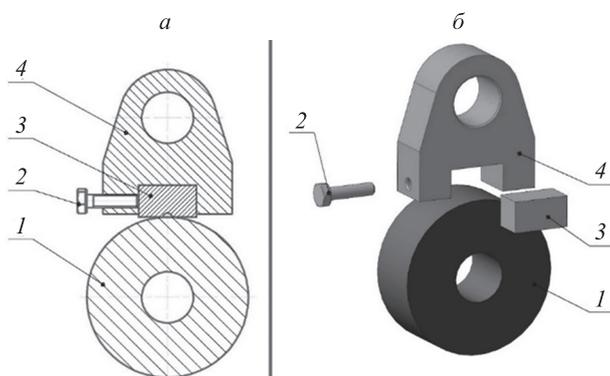


Рис. 4. Устройства для испытаний образцов материалов в виде бруска: а — формат 2D, б — формат 3D.
1 — диск, 2 — винт для фиксации колодки, 3 — брусок, 4 — держатель

Метод хорды предназначен для испытаний пары трения по схеме, показанной на рис. 4, с целью оценки относительной износостойкости любых материалов, изготовленных в виде бруска 3 размером 10×10×18 мм.

Основным показателем метода хорды для оценки износостойкости материалов является длина хорды L кругового сегмента, образованного при внедрении диска 1 в плоскость бруска 2 по мере его износа (рис. 5). Опыт показал, что расчет основных параметров износа [12] можно выполнить путем предварительного сверления лунки на поверхности исследуемого материала и последующим расчетам по формулам (1)–(5), однако эту задачу проще и точнее можно решить методом хорды путем измерения длины хорды L , границы которого четко определены и хорошо просматриваются как визуально (при больших значениях), так и под микроскопом.

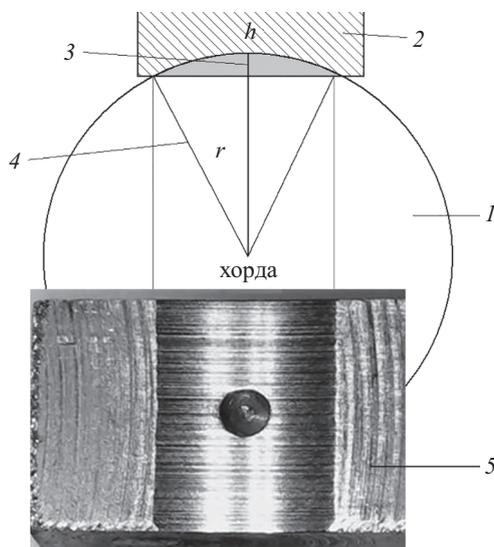


Рис. 5. Схема образования хорды в образце в виде бруска: 1 — ролик, 2 — брусок, 3 — сектор от пересечения диска с бруском (h — хорда), 4 — радиус ролика (r), 5 — фотография образования хорды на поверхности образца

По методу хорды износ рассчитываем по формуле:

$$I_z = \frac{L^2}{4000D}, \tag{6}$$

где D — диаметр ролика.

Значение интенсивности изнашивания J_j определяем по формуле:

$$J_j = I_z / (1000\pi DnT), \tag{7}$$

где T — время сеанса.

Значение удельного давления p в зоне контакта, зная длину хорды L , находим по формуле:

$$p = F/LH \tag{8}$$

где F — нагрузка, кгс; H — ширина колодки, мм.

Твердость HB_i , создаваемая наклепом непосредственно в зоне контакта, и износостойкость J_s рассчитываются по формулам (9) и (4) соответственно:

$$HB_i = HB_1 J_i / J_1, \tag{9}$$

где HB_1 — твердость материала.

Масса продуктов износа, выделяющихся в процессе изнашивания колодки, рассчитывается по формуле (10):

$$m = fHg, \tag{10}$$

где $f = \frac{r^2}{2}(v - \sin(v))$ — площадь сектора, м², где r — радиус ролика, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; $v = 2\arccos[(r - Iz)/r]$ — центральный угол, рад.

По расчетным формулам (6)–(10), полученным из алгоритма расчета основных параметров износостойкости по методу хорды в редакторе MathCad, получены значения параметров износостойкости для образцов из стали, бронзы, алюминия как при абразивном изнашивании [13] с АШ600, так и по гладкому ролику со смазочным материалом.

Расчетные результаты представленных пар трения сведены в табл. 3. Зная время работы узла трения T и длину хорды L (исходные данные для алгоритма) производится расчет износа Iz , интенсивности изнашивания J_j , фактического удельного давления p , фактической твердости в зоне трения HB и износостойкости J_s .

Таблица 3. Результаты экспериментального определения износостойкости

Действие	Исходные данные		Расчетные данные					
	Параметр	T	L	Iz	J_j	p	HB	J_s
Размерность		мин	мм	мм	мм/км	кгс/мм ²		км/мм
Формула		—	—	(6)	(7)	(8)	(9)	(4)
Сталь с АШ600	2,5	5,55	0,154	3,932	0,36	200	0,254	
	5	6,42	0,206	2,624	0,312	299,689	0,381	
	7,5	7,05	0,249	2,111	0,284	372,464	0,474	
Бронза с АШ600	2,5	7,73	0,299	7,608	0,259	100	0,131	
	3,5	8,79	0,386	7,027	0,228	108,27	0,142	
	4,2	9,53	0,455	6,895	0,21	110,345	0,145	
Алюминий с АШ600	1	6,89	0,237	15,111	0,29	50	0,066	
	2	8	0,32	10,186	0,25	74,175	0,098	
	3	9	0,405	8,594	0,222	87,911	0,116	
Алюминий со смазкой	5	3,57	0,064	0,811	0,56	50	1,232	
	10	4,07	0,083	0,527	0,491	76,939	1,897	
	15	4,48	0,1	0,426	0,446	95,251	2,348	
Бронза со смазкой	5	3,5	0,061	0,78	0,571	50	1,282	
	10	4,07	0,083	0,527	0,491	73,952	1,897	
	15	4,55	0,104	0,439	0,44	88,757	2,276	
Сталь 40Х	5	2,2	0,024	0,308	0,909	200	3,245	
	10	2,7	0,036	0,232	0,741	265,56	4,309	
	15	2,9	0,042	0,178	0,69	345,2	5,603	
Сталь 08Х18Н10Т	5	1,35	0,009	0,116	1,481	200	8,619	
	10	1,5	0,011	0,072	1,333	324	13,963	
	15	1,6	0,013	0,054	1,25	428	18,408	

Таким образом, износостойкость материала повышается с увеличением твердости, что свидетельствует об уплотнении поверхности [14] в зоне контакта через непродолжительное время работы, и тем самым повышается износостойкость материала.

Заключение

Разработанные методы проведения испытаний для оценки основных параметров износостойкости и составленные алгоритмы расчета подтвердили свою эффективность при проведении лабораторных испытаний и могут быть применены к реальным объектам исследования как для определения срока службы изделия по мере его изнашивания, так и для подбора пар трения с наибольшей износостойкостью, которые будут обеспечивать необходимую износостойкость и будут работоспособны в заданный срок службы. Отметим, что эмпирические и расчетные данные основных параметров износостойкости имеют высокий коэффициент корреляции 0,98, что подтверждается расчетными и опытными данными.

Литература

1. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / Отв. ред. И.Г. Горячева; Предисл. И.Г. Горячевой; Вступ. ст. И.А. Буяновского, М.М. Хрущова (мл.). М.: URSS Красанд, 2012. 512 с.
2. Хрущов М.М., Беркович Е.С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Машиностроение», 1968. 480 с.
4. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техніка, 1970. 396 с.
5. 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. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-671-676
6. Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Измерение износов деталей машин в полевых условиях на основе метода искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 237–242. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-237-242
7. Ефремов Л.В., Баева Л.С., Тикалов А.В. Виброакустические испытания образцов трибосопряжений на износостойкость // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. 2017. № 2. С. 69–76. doi: 10.24143/2073-1574-2017-2-69-76
8. Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Виброакустический контроль изнашивания образцов цилиндрических пар трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 2. С. 106–111. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-106-111
9. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наук. думка, 1979. 188 с.
10. Ефремов Л.В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб.: Art-Xpress, 2015. 206 с.
11. Ефремов Л.В., Черняховский Э.Р. Надежность и вибрация дизельных установок промышленных судов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 232 с.
12. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: Учебник. М.: Инфра-М, 2014. 336 с.
13. Энциклопедия трибологии – Абразивное изнашивание [Электронный ресурс]. URL: http://tribology.site/index/abrazivnoe_izn/0-37 (дата обращения: 15.08.2019)
14. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: Учеб. пособие. СПб.: Севзапучцентр, 2013. 152 с.

Авторы

Тикалов Андрей Владимирович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8821-916X, tikalov2010@mail.ru

Ефремов Леонид Владимирович — доктор технических наук, профессор, профессор, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-2372-8403, Levlefr@mail.ru

References

1. Khrushchov M.M. *Friction, wear and microhardness of materials: Selected works (on the 120th anniversary of birth)*. Moscow, URSS Krasand Publ., 2012, 512 p. (in Russian)
2. Khrushchov M.M., Berkovich E.S. *Determination of wear of machine parts by artificial base method*. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences, 1959, 217 p. (in Russian)
3. Kragelsky I.V. *Friction and wear*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 480 p. (in Russian)
4. Kostetskiy B.I. *Friction, lubrication and wear in machines*. Kiev: Tekhnika Publ., 1970, 396 p. (in Russian)
5. Efremov L.V., Tikalov A.V., Breki A.D. Accelerated testing of steel samples on the durability by the artificial bases method. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 671–676. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-671-676
6. Efremov L.V., Tikalov A.V. Measurement of machine part wear in field conditions with the use of artificial base method. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 237–242. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-237-242
7. Efremov L.V., Baeva L.S., Tikalov A.V. Vibroacoustic testing of tribounits endurance. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2017, no. 2, pp. 69–76. (in Russian). doi: 10.24143/2073-1574-2017-2-69-76
8. Efremov L.V., Tikalov A.V. Vibroacoustic control of wearing of samples of cylindrical friction couple. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 106–111. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-106-111
9. *Dictionary-reference on friction, wear and lubrication of machine parts*. Kiev: Naukova dumka Publ., 1979, 188 p. (in Russian)
10. Efremov L.V. *Problems of reliability-oriented technical operation of machines*. St. Petersburg, Art-Xpress Publ., 2015, 206 p. (in Russian)
11. Efremov L.V., Chernyakhovsky E.R. *Reliability and vibration of fishing vessel diesel installations*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980, 232 p. (in Russian)
12. Dotsenko A.I., Buyanovsky I.A. *Basics on tribotechnology*. Textbook. Moscow, Infra-M Publ., 2014, 336 p. (in Russian)
13. *Encyclopedia of Tribology — Abrasive wear*. Available at: http://tribology.site/index/abrazivnoe_izn/0-37 (accessed: 15.08.2019). (in Russian)
14. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibration diagnostics of machinery and equipment. Vibration analysis*. Handbook. St. Petersburg, Sevzapuccenter, 2013, 152 p. (in Russian)

Authors

Andrey V. Tikalov — postgraduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8821-916X, tikalov2010@mail.ru

Leonid V. Efremov — D.Sc., Full Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-2372-8403, Levlefr@mail.ru