

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-8-66-71>

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

© Виктор Ефимович Редькин¹, Юрий Сергеевич Ткаченко¹,
Павел Олегович Суходаев^{1*}, Алексей Иванович Лямкин^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; *e-mail: entro34@gmail.com

² Отдел молекулярной электроники Федерального исследовательского Центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50.

*Статья поступила 10 декабря 2019 г. Поступила после доработки 20 февраля 2020 г.
Принята к публикации 28 апреля 2020 г.*

Разработано устройство (машина трения) для испытания материалов на трение и изнашивание, отличающееся компактностью и простотой конструкции. Устройство предназначено для определения износоустойчивости и коэффициента трения конструкционных, фрикционных и антифрикционных материалов, а также трибологических характеристик смазочных материалов. Система измерения машины трения включает в себя пружинный винтовой и плоский спиральный упругие элементы, совмещенные в одном узле, и предназначенные для измерения нормальной силы и момента силы трения соответственно. В качестве внешнего привода устройства могут быть использованы металлорежущие станки. Машина трения опробована при измерении интенсивности износа и величины коэффициента трения образцов чугуна марки СЧ20, латуни марки Л63, технического алюминия марки А7, а также модифицированного алюминия А7 с повышенными механическими характеристиками. Испытания материалов проводили в паре с контрольным образцом из закаленной стали 95Х18 по схеме шар-кольцо в режиме сухого трения и в режиме граничной смазки с использованием индустриального масла И-20А при нормальной нагрузке 50 Н и линейной скорости в зоне контакта 0,5 м/с. Величину износа образцов оценивали по учету потерь массы. Результаты измерений характеризовались достаточной точностью и воспроизводимостью. Установлен интенсивный износ латуни при заданной испытательной нагрузке. Испытания алюминиевых образцов, модифицированных ультрадисперсным алмазграфитовым порошком УДП-АГ, получаемым из взрывчатых веществ, показали улучшение трибологических характеристик на 10 – 18 %.

Ключевые слова: износ; трение; смазка; коэффициент трения; машина трения; испытание; модифицирование.

FRICITION AND WEAR TESTER

© Viktor E. Red'kin¹, Yurii S. Tkachenko¹, Pavel O. Sukhodaev^{1*},
Aleksei I. Lyamkin^{1,2}

¹ Siberian Federal University, 79, Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia; *e-mail: entro34@gmail.com

² Department of Molecular Electronics, Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

Received December 10, 2019. Revised February 20, 2020. Accepted April 28, 2020.

A compact and simple in design device (friction machine) for testing materials for friction and wear is developed. The device is intended for determination of the wear resistance and friction coefficient of structural, frictional and antifricition materials, as well as the tribological characteristics of lubricants. The measurement system of the device includes spring helical and flat spiral elastic elements, combined in one node and designed to measure the normal force and friction torque, respectively. Metal-cutting machines can be used as an external drive of the device. The friction machine was tested when measuring the wear rate and the value of the friction coefficient of the samples of cast iron SCh20, brass L63, technical aluminum A7, as well as modified aluminum A7 with improved mechanical characteristics. The materials were tested in tandem with a counter-sample made of hardened steel 95Kh18 according to the ball-ring scheme in dry friction mode and in boundary lubrication mode using I-20A industrial oil at a normal load of 50 N and a linear velocity in the contact zone of 0.5 m/sec. The wear degree was estimated by the weight loss. The obtained results are characterized by the sufficient accuracy and reproducibility. A severe wear of brass is observed at a given testing load. Tests of the aluminum samples modified with ultrafine diamond-graphite powder UDP-AG obtained from explosives showed an increase in the tribological characteristics by 10 – 18%.

Keywords: wear; friction; lubricant; friction coefficient; tribometer; testing; nanomaterials; modification.

Введение

Трение — один из главных факторов, приводящих к износу оборудования и дополнительным энергозатратам. По оценкам, 23 % потребляемой энергии в мире приходится на трение, из них 20 % — на преодоление трения и 3 % — на замену оборудования, отказавшего из-за трения и других связанных с ним причин [1]. Совокупность затрат на преодоление трения и износа, замену износившихся деталей, а также снижение эффективности работы машин может составлять до 9 % ВВП развитых стран³. Меры по преодолению трения и износа, применяемые в настоящее время, позволяют сократить эти затраты на 1,0 – 1,4 % [2].

При создании узлов трения с высоким ресурсом работы, надежность которых ограничивает срок службы механизмов, имеющих подвижные сопряжения, ключевое значение имеют испытания на трение и износ, определяющие выбор материалов, износостойких покрытий, контроль качества и оптимизацию технологии изготовления пар трения.

Для проведения испытаний на трение и изнашивание используют, как правило, специальные машины трения — трибометры, с помощью которых в лабораторных условиях регистрируют данные об антифрикционных, противоизносных и антизадирных свойствах испытываемых материалов, а также моделируют условия работы реальных пар трения. Количество публикуемых статей и патентов показывает, что интенсивность разработок в области создания трибометров в последние десятилетия сохраняется высокой во всем мире. Это связано с непрерывным появлением конструкционных, фрикционных, антифрикционных и смазочных материалов, обладающих новыми свойствами, которые позволяют ужесточать условия работы узлов трения (повышать нагрузки и температуры, работать в агрессивных средах), и демонстрирующих нелинейные зависимости трибологических характеристик от параметров эксплуатации.

Актуальность создания новых трибометров связана также с необходимостью воспроизводить условия трения на современных высокотехнологичных объектах, таких как международный экспериментальный термоядерный реактор ITER [3], реакторы размножители [4], а также в условиях космоса [5] и сверхнизких температур [6].

Кроме того, постоянная миниатюризация движущихся частей трибосопряжений, встречающихся в том числе в микро- и нанoeлектро-механических системах (МЭМС и НЭМС), где за счет

малых размеров снижается инерция и увеличивается удельная поверхность деталей, приводит к существенному увеличению износа, что значительно повышает требования к используемым материалам и трибометрам [7].

При создании машин трения на первое место выходят такие их свойства, как простота конструкции, экономичность и универсальность, позволяющие испытывать широкий круг материалов, смазок и покрытий при различных формах, массе и относительных расположениях образцов.

В данной работе предлагается машина трения для триботехнических испытаний конструкционных, фрикционных, антифрикционных смазочных материалов и покрытий на трение и износ в различных режимах и условиях. Простота конструкции устройства и возможность приспособить его для испытаний практически под любой сверлильный, радиально-сверлильный или фрезерный станок позволяют получать широкий спектр необходимых трибомеханических характеристик материалов с максимальной оперативностью и малой трудоемкостью.

Описание установки

Устройство для измерения трения и износа сконструировано на основе запатентованной машины трения⁴. В оригинальную конструкцию были внесены изменения системы измерения силы трения за счет использования плоской спиральной пружины и способа фиксации образцов, позволяющего проводить измерения образцов различной геометрии. Схема установки приведена на рис. 1.

Машина трения включает основание 1 с установленной на нем стойкой 2, платформу 3, на которой расположен образец 4, вал (шпиндель станка) с приводом вращения и осевого его перемещения (на чертеже не показаны) с размещенным в нем держателем 5 и закрепленным контробразцом 6. Платформа 3 снабжена направляющим хвостовиком 7, на конце которого выполнен продольный паз 8, установленным в верхнем 9 и нижнем 10 подшипниках с возможностью его вертикального скользящего перемещения по внутренним кольцам подшипников. На верхнем подшипнике 9 расположено опорное поворотное кольцо 11. Между платформой 3 и опорным поворотным кольцом 11 размещен узел нагружения образцов, выполненный в виде пружины 12. Измерение силы трения между испытываемыми образцами осуществляется с помощью плоского

³ Jost P. Tribology — from Basics to Productivity and Employment / Opening speech at 5th World Tribology Congress (WTC-2013). — Torino, September 8 – 13, 2013.

⁴ Пат. 111660 РФ, G01 N3/56. Машина трения / Ткаченко Ю. С., Редькин В. Е., Щелканов С. И., Мишин А. А.; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. — № 20112881/28; заявл. 12.07.2011; опубл. 20.12.2011. Бюл. № 35.

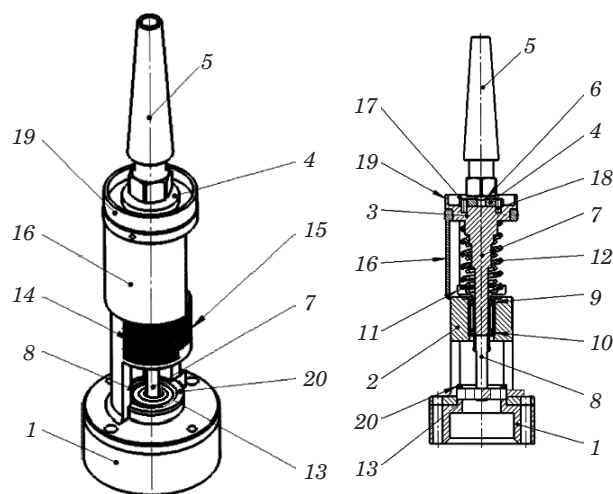


Рис. 1. Схема установки

Fig. 1. Scheme of the device

спирального упругого элемента 13, установленного в пазах основания 1 и хвостовика 7. Система измерения силы нагружения выполнена в виде линейной шкалы 14, размещенной на стойке 2, а система измерения силы трения — в виде угловой шкалы 15, находящейся на стойке 2. Показания по линейной 14 и угловой 15 шкалам отсчитывают по двухстороннему стрелочному индикатору 16. Платформа 3, в свою очередь, снабжена штифтами 17 и 18 для установки образца 4 и буртиком 19, образующим масляную ванну. Упругий элемент 13, установленный в поперечном пазу основания 1 и пазу хвостовика 7, фиксируется стопорным кольцом 20.

Машина трения работает следующим образом. В гнезде платформы 3 устанавливают образец (контроль) 4 на штифты 17 и 18 либо блокируют его между штифтами, а в держателе 5 закрепляют контроль (образец) 6; при необходимости исследуют сухое трение, в противном случае ванну заполняют маслом. Посредством вертикального перемещения вала вместе с держателем 5 доводят образец 6 до контактного соприкосновения с контролем 4. Дальнейшим вертикальным перемещением держателя 5 деформируют пружину 12 узла нагружения до требуемой нагрузки, отсчитываемой по линейной шкале 14 и двухстороннему стрелочному индикатору 16. Установив необходимую нагрузку, вал вместе с держателем 5 жестко фиксируют. При деформации пружины 12 платформа 3 с направляющим хвостовиком 7 перемещается вниз, при этом продольный паз 8 хвостовика скользит по упругому элементу 13, находясь в постоянном зацеплении. Затем включают привод вращения вала вместе с держателем 5 и образцом 6. Возникающая сила трения между исследуемыми образцами заставляет платформу 3 поворачиваться во-

круг своей оси и деформировать упругий элемент 13. При этом величина деформации фиксируется по угловой шкале 15 двухсторонним стрелочным индикатором 16. По показаниям, снятым с линейной и угловой шкал, определяют характеристики исследуемых образцов либо смазочных материалов.

Плоская спиральная пружина обеспечивает линейную зависимость угла поворота платформы от момента сил трения, что упрощает измерения и градуировку угловой шкалы.

Разработанная машина трения отличается следующими преимуществами перед аналогичными образцами:

- 1) широким спектром испытаний на трение и изнашивание при различных геометрических схемах расположения образцов и контрольных образцов;
- 2) простотой исполнения и возможностью использования привода металлорежущих станков, имеющих чрезвычайно жесткие конструкции станин, что обеспечивает высокую надежность и позволяет существенно снизить стоимость машины трения;
- 3) использованием малогабаритных образцов и контрольных образцов, что снижает затраты материалов на испытания; в ряде случаев в качестве исследуемых образцов могут выступать готовые детали;
- 4) высокой воспроизводимостью получаемых результатов триботехнических испытаний, а также их адекватностью данным опытно-промышленных испытаний.

Эксперимент

В качестве тестовых материалов для апробации машины трения выбраны образцы латуни марки Л63, чугуна СЧ20, технического алюминия А7 и разработанного в СФУ композиционного материала (КМ) на основе технического алюминия А7, модифицированного углеродным наноматериалом — ультрадисперсным алмазографитовым порошком УДП-АГ. КМ обладает повышенной твердостью и меньшим размером зерна по сравнению с базовым сплавом [8, 9].

Порошок УДП-АГ представляет собой углеродную смесь с размером частиц 10 – 40 нм, получаемую детонационным методом из взрывчатых веществ с избыточным содержанием углерода. В этой смеси доля графита составляет 40 – 60 % продукта взрыва, другая часть находится в виде высокодисперсной алмазоподобной фазы. Материал может применяться для модифицирования металлов, сплавов, полимеров, жидких и твердых смазок [10 – 13].

Контрольный образец был изготовлен из закаленной стали 95Х18 высокой твердости и износостойкости, работающей при температуре до 500 °С.



Рис. 2. Схема испытания

Fig. 2. Testing scheme

Испытания проводили в режиме сухого трения и в режиме смазки, в качестве которой использовали индустриальное масло И-20А.

Для проведения испытаний выбрана схема (рис. 2), в которой вращающийся шар контактирует с узким сферическим поясом на внутренней поверхности образца с круглым отверстием (ГОСТ 23.221–84). Данная схема подходит для испытания на износ в присутствии смазки, а также при сухом трении и позволяет зафиксировать изменения масс в конце испытания, которые затем можно сравнить между собой для обоих режимов.

Образец для испытания имел форму прямоугольных параллелепипедов, в центре которого просверливали отверстие диаметром 10 мм, куда затем вдавливали шарик 12 мм при нагрузке 5 кН для создания начальной рабочей поверхности. Образцы закрепляли с помощью штифтов. Контроль образца — деталь в виде цилиндрического вала диаметром 6 мм, имеющего на конце шарик диаметром 12 мм, — закрепляли в патроне сверлильного станка. Образец и контрольный образец перед началом испытания показаны на рис. 3.

Значения коэффициента трения отсчитывали по угловой шкале на приборе, которая была градуирована для указанной схемы испытания с помощью формулы

$$f = \frac{M \cos \varphi}{dP_0}, \quad (1)$$

где M — момент трения, Н/м; P_0 — осевая нагрузка, Н; φ — угол наклона между осью вращения и направлением приложения нормальной силы к поверхности трения; d — расстояние между диаметрально противоположными точками на середине фаски отверстия в образце.



Рис. 3. Образец перед испытанием

Fig. 3. Sample before testing

Давление в зоне контакта при линейном законе изнашивания распределяется согласно соотношению [14]

$$p = \frac{\gamma \omega \operatorname{tg} \varphi}{\omega KR}, \quad (2)$$

где γ — удельный износ; ω — угловая скорость вращения шара; R — радиус шара; K — коэффициент пропорциональности, зависящий от материалов пары трения. При небольшой ширине сферического пояса в зоне контакта давление можно приблизительно считать равномерным.

Условия износа в выбранной схеме испытания близки к условиям работы сферических упорных подшипников скольжения (подпятников). Упоры для них в наиболее ответственных трибосопряжениях, находящихся под большой нагрузкой и работающих при высоких скоростях, часто изготавливают из высокопрочной корундовой керамики. Для моделирования работы таких сопряжений используют специальные трибометры [15, 16].

Испытания на износ проводили при осевой нагрузке 50 Н. Линейная скорость шарового контрольного образца в зоне контакта составляла 0,5 м/с, время испытаний каждого образца — 45 мин. Величину износа измеряли путем взвешивания образцов после испытаний, по потере массы.

Результаты

В таблице приведены средние за время испытания значения коэффициента трения, которые измеряли во время приработки трущихся материалов и далее в установившемся режиме. Ре-

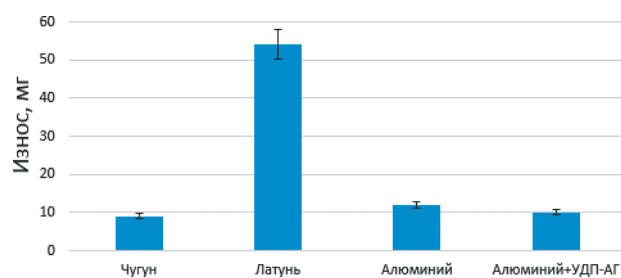


Рис. 4. Величина износа образцов

Fig. 4. Values of the sample wear

зультаты определения износа образцов при сухом трении представлены на рис. 4.

Обсуждение

При выбранных параметрах нагрузки и скорости максимальный износ среди испытанных материалов зафиксирован у латуни при минимальном коэффициенте трения. Латунь считается хорошим антифрикционным материалом, с низким коэффициентом трения. Однако при нагрузках более 5 кг ее износ приобретает интенсивный характер, что характеризуется повышенной потерей массы по сравнению с другими металлами, например, алюминием⁵.

Модифицированный УДП-АГ алюминий А7 имеет меньший износ и коэффициент трения, чем базовый сплав, что связано с повышенной твердостью данного материала [8] и смазывающим действием графита, содержащегося в УДП-АГ.

Заключение

Разработано устройство (машина трения), позволяющее проводить испытания конструкционных, фрикционных, антифрикционных и смазочных материалов на трение и изнашивание, отличающееся компактностью, простотой узла нагружения и системы измерения силы трения. В качестве привода для устройства могут использоваться сверлильные, радиально-сверлильные, фрезерные и другие станки. Предложенная машина трения позволяет получить все необходимые показатели качества трущихся материалов и масел с достаточной точностью и при меньшей трудоемкости испытаний по сравнению с аналогичными устройствами.

С помощью данной машины проведены измерения износа и коэффициента трения чугуна, латуни, технического и модифицированного

Измеренные коэффициенты трения

Measured values of the friction coefficients

Образец/смазка	Коэффициент трения — приработка/эксплуатационный режим	
	Сухое трение	Трение при смазке (И-20А)
Чугун	0,50/0,39	0,25/0,19
Латунь	0,42/0,35	0,25/0,17
Алюминий	0,60/0,55	0,26/0,21
Алюминий + УДП-АГ	0,60/0,52	0,24/0,21

алюминия в паре с закаленной сталью. Продемонстрирована эффективность наноматериала УДП-АГ как добавки в алюминиевые сплавы.

Система измерения трения и износа, положенная в основу разработанной машины трения, может быть также выполнена с применением электронных датчиков нормальной и угловой нагрузки, что позволит уменьшить размеры устройства и осуществлять цифровую обработку данных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions / Friction. 2017. Vol. 5. N 3. P. 263 – 284. DOI: 10.1007/s40544-017-0183-5.
2. Tzanakis I., Hadfield M., Thomas B., et al. Future perspectives on sustainable tribology / Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16. N 6. P. 4126 – 4140. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.064.
3. Chen Z., Hillairet J., Turq V., et al. Multifunctional tribometer development and performance study of CuCrZr-316L material pair for ITER application / Tribology International. 2017. Vol. 116. P. 208 – 216. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.07.024.
4. Kumar H., Vijayaraghavan S., Albert S. K., et al. Design and development of high-temperature tribometer for material testing in liquid sodium environment / International Journal of Nuclear Energy Science and Technology. 2016. Vol. 10. N 3. P. 276 – 285. DOI: 10.1504/IJNEST.2016.078962.
5. Prozhega M. V., Albagachiev A. Y., Smirnov N. I., Smirnov N. N. Lubricating Materials for Mechanisms Operating in Space / Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39. N 4. P. 335 – 340. DOI: 10.3103/S106836661804013X.
6. Padmini B. V., Sampathkumaran P., Seetharamu S., et al. Investigation on the wear behaviour of Aluminium alloys at cryogenic temperature and subjected to cryo-treatment / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing. 2019. Vol. 502. N 1. P. 012191. DOI: 10.1088/1757-899X/502/1/012191.
7. Williams J. A. Friction and wear of rotating pivots in MEMS and other small scale devices / Wear. 2001. Vol. 251. N 1 – 12. P. 965 – 972. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00720-7.
8. Суходаев П. О., Редькин В. Е., Богданова Т. А. Кузнецов В. А. Влияние наночастиц на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов / Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 3. С. 317 – 326.
9. Ставер А. М., Губарева Н. В., Лямкин А. И., Петров Е. А. Ультрадисперсные алмазные порошки, полученные с использованием энергии взрыва / Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 5. С. 100 – 104.
10. Mochalin V. N., Shenderova O., Ho D., Gogotsi Y. The properties and applications of nanodiamonds / Nature nanotechnology. 2012. Vol. 7. N 1. P. 11 – 23. DOI: 10.1038/nnano.2011.209.

⁵ Rana R. Batra M., Sharma V. K., Sahni A. Wear Analysis of Brass, Aluminium and Mild Steel by using Pin-on-disc Method / 3rd International Conference on Manufacturing Excellence — MANFEX 2016. — Noida, 2016. P. 17 – 20.

11. Люты М., Костюкович Г. А., Скасевич А. А. и др. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / Трение и износ. 2002. Т. 25. № 4. С. 411 – 424.
12. Терентьев В. Ф., Еркаев Н. В., Докшанин С. Г. Трибо-надежность подшипниковых узлов в присутствии модифицированных смазочных композиций. — Новосибирск: Наука, 2003. — 142 с.
13. Докшанин С. Г. Использование ультрадисперсного порошка алмазграфита в качестве наполнителя к пластичным смазочным материалам / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 1043 – 1045.
14. Хебда М., Чичинадзе А. В. Справочник по триботехнике: в 3-х т. Т. 1. Теоретические основы. — М.: Машиностроение, 2000. — 397 с.
15. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing in oil-bath lubrication for high rotational speed application / Wear. 2013. Vol. 302. N 1 – 2. P. 1506 – 1513. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.032.
16. Qiu M., Chen L., Yan J. Bearing Tribology: Principles and Applications. Springer, 2016. — 333 p.
- Space / Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39. N 4. P. 335 – 340. DOI: 10.3103/S106836661804013X.
6. Padmini B. V., Sampathkumaran P., Seetharamu S., et al. Investigation on the wear behaviour of Aluminium alloys at cryogenic temperature and subjected to cryo-treatment / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing. 2019. Vol. 502. N 1. P. 012191. DOI: 10.1088/1757-899X/502/1/012191.
7. Williams J. A. Friction and wear of rotating pivots in MEMS and other small scale devices / Wear. 2001. Vol. 251. N 1 – 12. P. 965 – 972. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00720-7.
8. Sukhodaev P. O., Redkin V. E., Bogdanova T. A. Kuznetsov V. A. Influence of nanoparticles on the structure and mechanical properties of aluminium alloys / Zh. Sib. Fed. Univ. Ser. Tekhn. Tekhnol. 2017. Vol. 10. N 3. P. 317 – 326 [in Russian].
9. Staver A. M., Gubareva N. V., Lyamkin A. I., Petrov E. A. Ultrafine diamond powders made by the use of explosion energy / Fiz. Goren. Vzryva. 1984. Vol. 20. N 5. P. 567 – 570. DOI: 10.1007/BF00782253 [in Russian].
10. Mochalin V. N., Shenderova O., Ho D., Gogotsi Y. The properties and applications of nanodiamonds / Nature nanotechnology. 2012. Vol. 7. N 1. P. 11 – 23. DOI: 10.1038/nnano.2011.209.
11. Luty M., Kostyukovich G. A., Skaskevich A. A., et al. Methods of creating lubricating materials with nanomodifiers / Trenie Iznos. 2002. Vol. 25. N 4. P. 411 – 424 [in Russian].
12. Terent'ev V. F., Erkaev N. V., Dokshanin S. G. Tribo-durability of bearing units in a presence of modified lubricant compositions. — Novosibirsk: Nauka, 2003. — 142 p. [in Russian].
13. Dokshanin S. G. Application of ultradisperse powder mixture of diamond and graphite as the filling agent for lubricating greases / Izv. Samar. NTs RAN. 2011. Vol. 13. N 4(3). P. 1043 – 1045 [in Russian].
14. Khebda M., Chichinadze A. V. Reference book on tribotechnics: In 3 vol. Vol. 1. Theoretical basis. — Moscow: Mashinostroenie, 2000. — 397 p. [in Russian].
15. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing in oil-bath lubrication for high rotational speed application / Wear. 2013. Vol. 302. N 1 – 2. P. 1506 – 1513. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.032.
16. Qiu M., Chen L., Yan J. Bearing Tribology: Principles and Applications. Springer, 2016. — 333 p.

REFERENCES