

УДК 621.89.099
EDN: XMOOHN

Е.С. Губин¹, Д.А. Сибриков¹, С.В. Титов¹, С.Н. Иванчик¹, И.С. Иванчик², В.И. Кузьмин³

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», Новосибирск, Россия

² АО «Новосибирский патронный завод», Новосибирск, Россия

³ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА КАРБИДА ВОЛЬФРАМА НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются механические потери пар трения машин и механизмов. Цель работы состоит в оценке влияния применения добавки сфероидизированных частиц карбида вольфрама с добавками кобальта и хрома: WC-10Co-4Cr (WC – 86 %; Co – 10 %; Cr – 4 %) для снижения коэффициента трения. Актуальность исследования связана с применением сфероидизированных частиц и использованием эффективной технологии плазменной обработки для получения сферических частиц.

Материалы и методы. Исследования коэффициента трения проводились с помощью машины трения типа МИ. В работе использована пара трения ролик – колодка. В качестве добавки в масло использован готовый порошок карбида вольфрама с добавками хрома и кобальта. Традиционно для получения сфероидизированных порошков применяется технология распылительной сушки. Более эффективной является технология сфероидизации порошков с помощью плазменной обработки, например, плазмотрона постоянного тока с секционированной межэлектродной вставкой «ПНК-50», разработанного в ИТПМ СО РАН.

Основные результаты. Получены результаты определения коэффициента трения на чистом масле и с добавлением присадки от 3 до 18 % при нагрузке от 765 до 1500 кПа. Оптимальное содержание добавки из соображений ее расхода и снижения коэффициента трения составило около 6 %.

Закключение. На основе анализа полученных результатов установлено, что введение от 6 до 12 % сфероидизированного порошка в масло позволяет сохранить значения коэффициента трения, включая область высоких нагрузок. При меньшем содержании присадки это малоэффективно, при более высоком содержании – приводит к катастрофическому увеличению интенсивности износа и разрушению образцов.

Ключевые слова: коэффициент трения, присадки, сфероидизированные частицы, моторное масло, плазмотрон, машина трения, износ поверхности.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.89.099
EDN: XMOOHN

E.S. Gubin¹, D.A. Sibrikov¹, S.V. Titov¹, S.N. Ivanchik¹, I.S. Ivanchik², V.I. Kuzmin³

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

² JSC "Novosibirsk Cartridge Plant", Novosibirsk, Russia

³ Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after. S.A. Khristianovich SB RAS, Novosibirsk, Russia

STUDYING THE INFLUENCE OF THE ADDITIVE OF FINE TUNGSTEN CARBIDE POWDER ON THE ANTI-FRICTION PROPERTIES OF LUBRICANTS

Object and purpose of research. The object of the study is the mechanical losses of friction pairs of machines and mechanisms. The purpose of the work is to evaluate the effect of using the addition of spheroidized tungsten carbide particles

Для цитирования: Губин Е.С., Сибриков Д.А., Титов С.В., Иванчик С.Н., Иванчик И.С., Кузьмин В.И. Изучение влияния добавки мелкодисперсного порошка карбида вольфрама на антифрикционные свойства смазочных материалов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 169–176.

For citations: Gubin E.S., Sibrikov D.A., Titov S.V., Ivanchik S.N., Ivanchik I.S., Kuzmin V.I. Studying the influence of the additive of fine tungsten carbide powder on the anti-friction properties of lubricants. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 169–176 (in Russian).

with additions of cobalt and chromium: WC-10Co-4Cr (WC – 86 %; Co – 10 %; Cr – 4 %) to reduce the coefficient of friction. The relevance of the research is related to the use of spheroidized particles and the use of effective plasma processing technology to obtain spherical particles.

Materials and methods. The friction coefficient studies were carried out using an MI type friction machine. In the work, a roller-block friction pair was used. As an additive to the oil, ready-made tungsten carbide powder with chromium and cobalt additives was used. Traditionally, spray drying technology is used to obtain spheroidized powders. More effective is the technology of spheroidization of powders using plasma processing technology, for example using a direct current plasma torch with a sectioned interelectrode insert PNK-50, developed at ITAM SB RAS.

Main results. The results of determining the friction coefficient on pure oil and with the addition of an additive from 3 to 18 % at a load from 765 to 1500 kPa were obtained. The optimal content of the additive for reasons of consumption and reduction of the friction coefficient was about 6 %.

Conclusion. Based on the analysis of the results obtained, it was established that the introduction of 6 to 12 % spheroidized powder into the oil allows maintaining the friction coefficient values, including in the area of high loads. At a lower content of the additive, it is ineffective, at a higher content it leads to a catastrophic increase in wear rate and destruction of samples.

Keywords: coefficient of friction, additives, spheroidized particles, motor oil, plasmatron, friction machine, surface wear.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Большая часть механических потерь в механизмах и машинах связана с наличием трения. В подшипниках скольжения, наиболее распространенных в двигателях внутреннего сгорания, масло подается под давлением. Режим смазки определяется характеристиками масла, нагрузкой на пары трения, скоростью перемещения поверхностей относительно друг друга при поступательном движении или частотой вращения при вращательном. Скорость изнашивания и величина износа будут зависеть от величины трения, а следовательно, при одной величине нагрузки – от коэффициента трения. Наименьшее значение коэффициента трения принимает для режима жидкостного (гидродинамического) трения 0,001–0,005; для

смешанного (полужидкостного) трения 0,008–0,1 [1] и сухого трения 0,15–0,2 [2].

С целью снижения коэффициента трения производители моторных и трансмиссионных масел добавляют к базовому маслу комплексы присадок. Известны работы по введению мелкодисперсных частиц, например графита [3], наночастиц дисульфида молибдена [4], фуллеренов [5] и др. добавок для снижения коэффициента трения и износа пар трения, в т.ч. подшипников скольжения и качения.

Материалы и методы испытания

Materials and methods of testing

В данной работе предлагается использовать в качестве добавки сфероидизированные частицы карбида

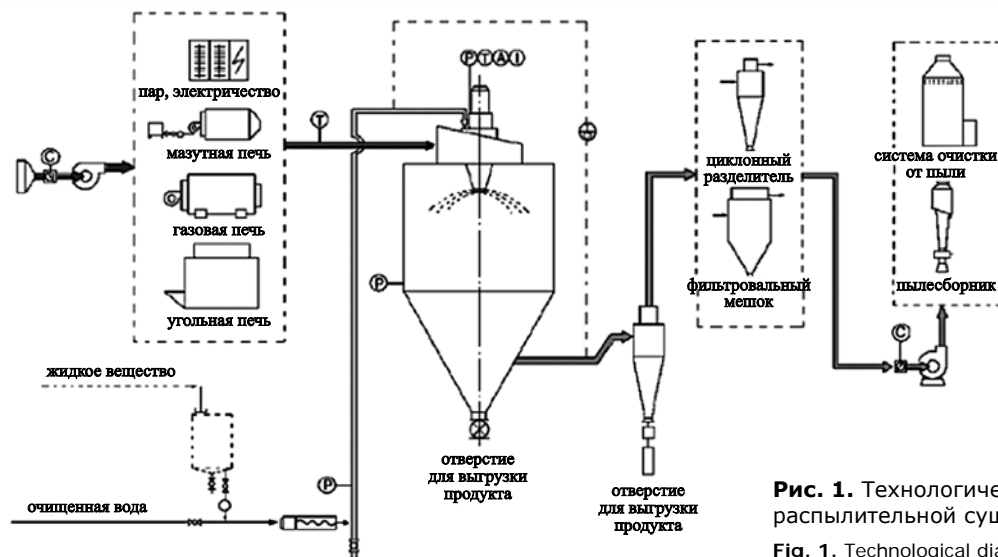


Рис. 1. Технологическая схема распылительной сушки [6]

Fig. 1. Technological diagram of spray drying [6]

вольфрама с добавками кобальта и хрома: WC-10Co-4Cr (WC – 86 %; Co – 10 %; Cr – 4 %). Размер частиц составляет 0,015–0,045 мм. Твердость частиц примерно 1300 HV, что существенно превышает твердость поверхностей трения подшипников скольжения. Особенностью частиц является сферическая форма, получаемая в результате применения технологии распылительной сушки.

Распылительная сушка представляет собой процесс мелкого распыления густой суспензии из субмикронного порошка и клеевой связующей в рабочей камере, через которую подается газовая среда. Чаще всего в качестве такой среды используются нагретый воздух или продукты сгорания топлива. При движении капли, полученной при распылении суспензии в газовой среде, происходит ее высыхание и получение частиц, по форме близких к сфере. Технологическая схема процесса приведена на рис. 1 [6].

Наряду с указанным способом для получения сферических керамических или стальных частиц применяется технология плазменной сфероидизации, которая является менее затратной [7]. Суть технологии состоит в том, что порошок, который необходимо сфероидизировать, подается в плазменную струю, где частицы расплавляются и движутся в потоке. Поскольку расплавленная капля под действием сил поверхностного натяжения приобретает форму шара, то частицы, попадая в емкость с водой, окончательно остывают, сохраняя сферическую форму. Технологическая схема приведена на рис. 2. В соответствии с информацией из открытых источников, для сфероидизации можно использовать плазматрон постоянного тока с секционированной межэлектродной вставкой «ПНК-50», разработанный ИТПМ СО РАН мощностью 50 кВт, производительностью обработки металлических порошков до 30 кг/ч, керамических – до 10 кг/ч [7].

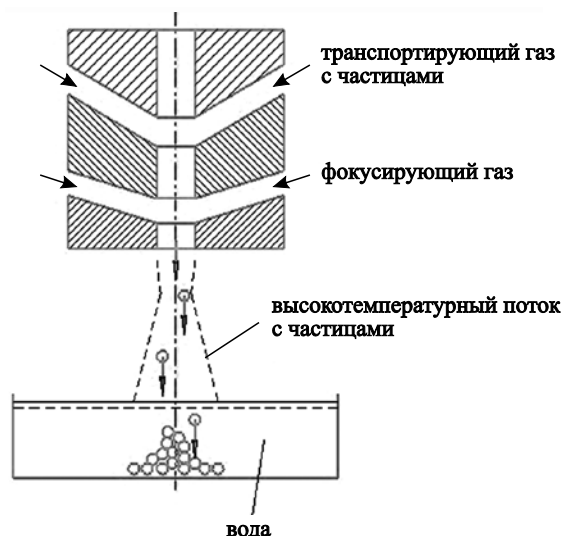


Рис. 2. Технологическая схема сфероидизации порошков с помощью плазматрона

Fig. 2. Technological diagram of powder spheroidization using a plasmatron

Фотографии сферических частиц, полученные с помощью оптического микроскопа, приведены на рис. 3.

Согласно открытым данным [8], зазор в подшипниках скольжения составляет от 0,05 до 0,8 мм при диаметре вала от 50 до 500 мм.

Анализ основных результатов измерений

Analysis of main measurement results

Испытания проводились на машине трения типа МИ. Этот тип машин позволяет проводить испытания образцов в виде двух роликов при изучении трения качения, либо ролика и колодки при изуче-

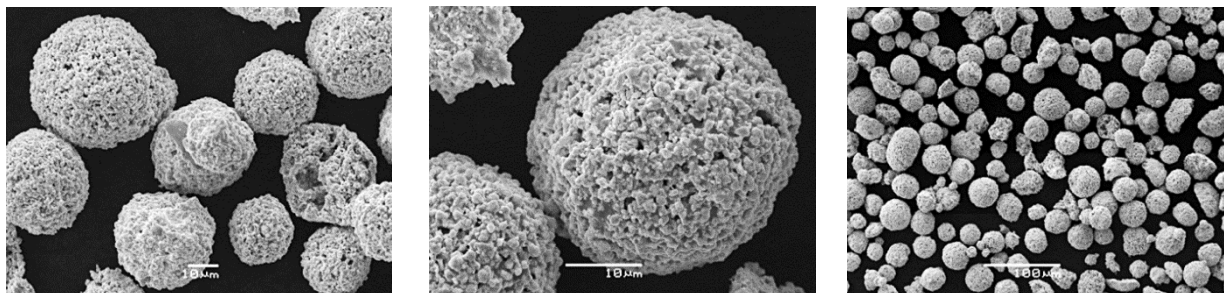


Рис. 3. Сфероидизированные частицы карбида вольфрама

Fig. 3. Spheroidized tungsten carbide particles

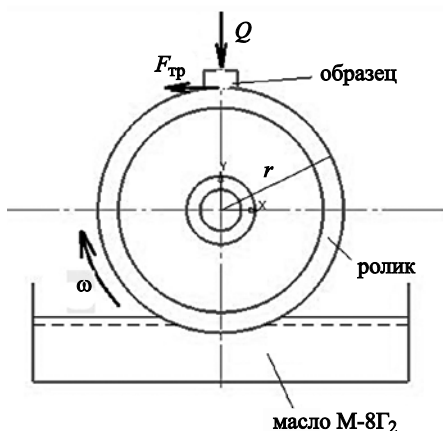


Рис. 4. Принципиальная схема машины трения типа МИ

Fig. 4. Schematic diagram of a friction machine type MI

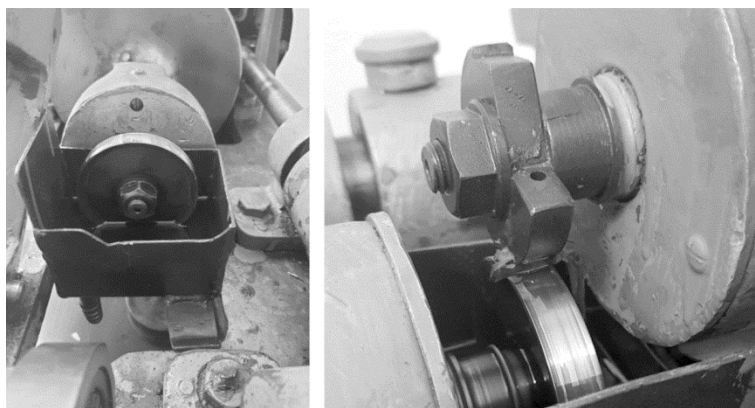


Рис. 5. Проведение эксперимента
Fig. 5. Conducting an experiment

нии трения скольжения. В данной работе был использован вариант ролик – колодка.

Принцип работы машины трения заключается в следующем: электродвигатель с помощью передаточного механизма с маятниковым устройством для измерения момента трения приводит в движение вал с роликом. Образец закрепляется в верхней каретке и прижимается к цилиндрической поверхности ролика. Усилие прижима образца к ролику задается с помощью нагрузочного устройства. Масло для смазки пары трения захватывается поверхно-

стью ролика, погруженного в емкость с маслом, и уносится к колодке роликом.

Расчетная схема установки для определения коэффициента трения приведена на рис. 4, фотографии – на рис. 5.

Исследование проводилось с использованием чистого масла М-8Г₂, а также для образцов масла с добавлением присадки. Нагрузка на образец варьировалась в диапазоне от 50 до 100 кг, что обеспечивало давление на поверхности контакта от 7630 кПа до 15 260 кПа.

Коэффициент трения определялся по формуле:

$$f = \frac{M_T}{Qr}, \quad (1)$$

где M_T – момент трения, Нм; Q – нагрузка на образец, Н; r – радиус нижнего ролика, м.

Параллельно с измерением момента трения производились измерения температуры масла в емкости под роликом. Характер изменения температуры совпадает с характером изменения расчетных значений коэффициента трения. Следует отметить, что при проведении испытаний с максимальным содержанием присадки значение температуры превысило 135 °С уже при нагрузке 80 кг. Результаты приведены на рис. 6 и в табл. 1–5.

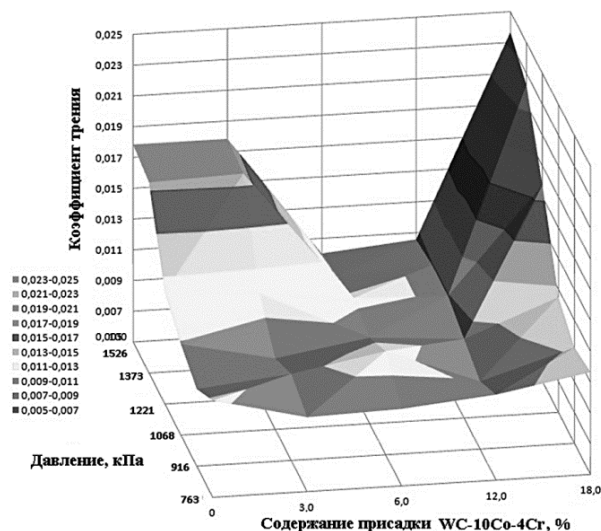


Рис. 6. Результаты определения коэффициента трения

Fig. 6. Results of determining the friction coefficient

Заклучение

Conclusion

Анализируя полученные данные, можно отметить, что при небольших нагрузках (до 70 кг) полученные

Таблица 1. Результаты испытаний на чистом масле

Table 1. Test results in pure oil

Массовая доля присадки	Нагрузка на пружине, кг	Нагрузка на образце, Н	Давление в месте контакта образцов, кПа	Момент трения, Нм	Радиус образца, м	Коэффициент трения
0	50	763,0	7630	0,31	0,036	0,0113
0	60	915,6	9156	0,33	0,036	0,0100
0	70	1068,2	10 682	0,42	0,036	0,0109
0	80	1220,8	12 208	0,54	0,036	0,0123
0	90	1373,4	13 734	0,86	0,036	0,0174
0	100	1526,0	15 260	0,98	0,036	0,0178

Таблица 2. Результаты испытаний. Содержание присадки 3 %

Table 2. Test results. Additive 3 %

Массовая доля присадки	Нагрузка на пружине, кг	Нагрузка на образце, Н	Давление в месте контакта образцов, кПа	Момент трения, Нм	Радиус образца, м	Коэффициент трения
0,030	50	763,0	7630	0,27	0,036	0,0098
0,030	60	915,6	9156	0,35	0,036	0,0106
0,030	70	1068,2	10 682	0,37	0,036	0,0096
0,030	80	1220,8	12 208	0,52	0,036	0,0118
0,030	90	1373,4	13 734	0,87	0,036	0,0176
0,030	100	1526,0	15 260	0,98	0,036	0,0178

Таблица 3. Результаты испытаний. Содержание присадки 6 %

Table 3. Test results. Additive 6 %

Массовая доля присадки	Нагрузка на пружине, кг	Нагрузка на образце, Н	Давление в месте контакта образцов, кПа	Момент трения, Нм	Радиус образца, м	Коэффициент трения
0,057	45	686,7	6867	0,29	0,036	0,0117
0,057	55	839,3	8393	0,32	0,036	0,0106
0,057	80	1220,8	12 208	0,49	0,036	0,0111
0,057	90	1373,4	13 734	0,52	0,036	0,0105
0,057	100	1526,0	15 260	0,55	0,036	0,0100

Таблица 4. Результаты испытаний. Содержание присадки 12 %

Table 4. Test results. Additive 12 %

Массовая доля присадки	Нагрузка на пружине, кг	Нагрузка на образце, Н	Давление в месте контакта образцов, кПа	Момент трения, Нм	Радиус образца, м	Коэффициент трения
0,117	50	763,0	7630	0,29	0,036	0,0106
0,117	60	915,6	9156	0,31	0,036	0,0094
0,117	70	1068,2	10 682	0,39	0,036	0,0101
0,117	80	1220,8	12 208	0,48	0,036	0,0109
0,117	90	1373,4	13 734	0,54	0,036	0,0109
0,117	100	1526,0	15 260	0,58	0,036	0,0106

Таблица 5. Результаты испытаний. Содержание присадки 18 %

Table 5. Test results Additive 18 %

Массовая доля присадки	Нагрузка на пружине, кг	Нагрузка на образце, Н	Давление в месте контакта образцов, кПа	Момент трения, Нм	Радиус образца, м	Коэффициент трения
0,179	50	763,0	7630	0,32	0,036	0,0116
0,179	60	915,6	9156	0,37	0,036	0,0112
0,179	70	1068,2	10 682	0,48	0,036	0,0125
0,179	80	1220,8	12 208	0,78	0,036	0,0177

значения коэффициента трения слабо зависят от содержания присадки в масле и находятся в пределах 0,010–0,013.

При более высоких нагрузках (80–100 кг) значение коэффициента трения при замерах на чистом масле увеличиваются до 0,018. При увеличении содержания присадки до 6 % отмечается снижение коэффициента трения до 0,01 (что подтверждается полученными более низкими значениями температуры масла на уровне 90 °С), затем, при увеличении содержания присадки до 18 %, происходит рост коэффициента трения до 0,023, что сопровождается резким увеличением температуры масла и интенсивности износа поверхностей.

Предположительно, при невысоких нагрузках толщина масляной пленки между трущимися поверхностями существенно больше размера частиц присадки, поэтому существенного влияния на коэффициент трения не происходит, что соответствует жидкостному трению. По мере увеличения нагрузки толщина масляного слоя уменьшается. Начиная с некоторого значения нагрузки сферические частицы присадки, взаимодействуя с трущимися поверхностями, препятствуют возникновению полужидкостного или сухого трения, тем самым препятствуя росту трения.

Следует отметить, что дополнительные исследования могут подтвердить или опровергнуть выдвигаемые предположения. Подводя итог, можно сделать вывод, что введение небольшого количества присадки (около 6 %) к маслу позволяет существенно снизить коэффициент трения и скорость изнашивания поверхностей трения в области высоких нагрузок.

Список использованной литературы

1. Бутенко А.Ф., Портаков А.Б. Детали машин и основы конструирования : учебное пособие. Зерно-

град : Азово-Черноморский инженерный институт, 2014. 178 с.

2. Коэффициенты трения скольжения // Инженерный справочник. Таблицы DPVA : [сайт]. [Б.м.], 2024. URL: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/Frication/FricationOfSlicing/> (дата обращения: 20.01.2024).
3. Исследование нагрузочной способности смазочных композиций с наночастицами WS₂ и WSe₂ для железнодорожных втулок / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, М.Ю. Максимов, С.Г. Чулкин // Вопросы материаловедения. 2012. № 2(70). С. 109–113.
4. Сравнительное исследование противозносных свойств смазочных композиционных материалов, содержащих сплошные наночастицы дисульфида вольфрама и фуллереноподобные частицы дисульфида молибдена при трении стали ШХ15 по поверхности стали 45 / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, О.В. Толочко [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 5(68). С. 63–77.
5. Влияние добавки фуллереновой сажи в пластичную смазку Литол-24 на основные закономерности процесса трения скольжения в паре сталь Р6М5-сталь 45 / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 2. С. 33–40. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-0-2-33-40.
6. Распылительная сушка: методы и технология // Диапазон Фарм : [сайт]. Москва, 2024. URL: <https://www.diapazon-pharm.ru/raspylitelnaya-sushka-metody-i-tehnologiya> (дата обращения: 26.01.2024).
7. Применение плазменной обработки для сферидизации металлических порошков / А.А. Сапрыкин, В.И. Кузьмин, Д.В. Сергачев, Д.В. Дудихин // Актуальные проблемы машиностроения. 2017. Т. 4, № 2. С. 16–20.
8. Как измерить зазоры в подшипниках скольжения? // Нов-электро : [сайт]. [Б.м.], 2013. URL:

<http://www.nov-electro.com/2013/zazori-v-podshipnikah-skolzheniya> (дата обращения: 20.01.2024).

References

1. *Butenko A.F., Portakov A.B.* Machine parts and design fundamentals : Textbook. Zernograd : Azov-Black Sea Engineering Institute, 2014. 178 p.
2. Engineering reference book. URL: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/Frication/FrictionOfSlicing/> (Accessed: 01/20/2024).
3. Study of the load capacity of lubricant compositions with WS₂ and WSe₂ nanoparticles for railway bushings / *A.D. Breki, E.S. Vasilyeva, M.Yu. Maksimov, S.G. Chulkin* // Questions of Materials Science. 2012. No. 2(70). P. 109–113.
4. Comparative study of the anti-wear properties of lubricating composite materials containing solid nanoparticles of tungsten disulfide and fullerene-like particles of molybdenum disulfide during friction of steel ShKh15 on the surface of steel 45 / *A.D. Breki, S.E. Aleksandrov, O.V. Tolochko* [et al.] // News of the South-Western State University. 2016. No. 5(68). P. 63–77.
5. The influence of the addition of fullerene soot to the Litol-24 grease on the main laws of the sliding friction process in the steel R6M5-steel 45 pair / *A.D. Breki, S.G. Chulkin, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev* // Deformation and destruction of materials. 2022. No. 2. P. 33–40. DOI 10.31044/1814-4632-2022-0-2-33-40.
6. Technological diagram of spray drying // *Diapazon-pharm.ru* : [site]. Moscow, 2024. URL: <https://www.diapazon-pharm.ru/raspylitelnaya-sushkametody-i-tehnologiya> (Accessed: 01/26/2024).
7. Application of plasma processing for spheroidization of metal powders / *A.A. Saprykin, V.I. Kuzmin, D.V. Ser-gachev, D.V. Dudikhin* // Current problems of mechanical engineering. 2017 Vol. 4. No. 2. P. 16–20.
8. Hoy to measure sliding bearings clearance. URL: <http://www.nov-electro.com/2013/zazori-v-podshipnikah-skolzheniya> (Accessed: 20.01.2024).

Сведения об авторах

Губин Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры судовых энергетических установок ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: e.v.gubin@nsawt.ru.

Сибриков Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Судовых энергетических установок» ФГБОУ

ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: sibrikov@nsawt.ru.

Титов Сергей Владиленович, д.т.н., доцент кафедры «Судовых энергетических установок» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: titov@nsawt.ru.

Иванчик Сергей Николаевич, старший преподаватель кафедры «Теории корабля судостроения и технологии материалов» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: ivan-ilija@yandex.ru.

Иванчик Илья Сергеевич, ведущий инженер по метрологии АО «Новосибирский патронный завод». Адрес: 630108, Россия, Новосибирск, Станционная ул., д. 30а. E-mail: Zap4astiba2@yandex.ru.

Кузьмин Виктор Иванович, к.т.н., старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, Институтская ул., д. 4/1. Тел: +7 (383) 330-42-68. E-mail: vikuzmin57@mail.ru.

About the authors

Evgeniy S. Gubin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Ship Power Plants Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Water Transport”. Address: 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, Russia, post code 630099. E-mail: e.v.gubin@nsawt.ru.

Dmitry A. Sibrikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Ship Power Plants Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Water Transport”. Address: 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, Russia, post code 630099. E-mail: sibrikov@nsawt.ru.

Sergey V. Titov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of Ship Power Plants Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Water Transport”. Address: 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, Russia, post code 630099. E-mail: titov@nsawt.ru.

Sergey N. Ivanchik, Senior Lecturer of Shipbuilding Theory and Materials Technology Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Water Transport”. Address: 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, Russia, post code 630099. E-mail: ivan-ilija@yandex.ru.

Ilya S. Ivanchik, Lead Metrology Engineer, JSC Novosibirsk Cartridge Plant. Address: 30a, Stationnaya st.,

Novosibirsk, Russia, post code 630108. E-mail:
Zap4astiba2@yandex.ru.

Viktor I. Kuzmin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Khrisianovich Institute of Theoretical and Applied Mecha-
nics. Address: 4/1, Institutskaya st., Novosibirsk, Russia,
post code 630090. E-mail: vikuzmin57@mail.ru.

Поступила / Received: 07.03.24
Принята в печать / Accepted: 16.05.24
© Коллектив авторов, 2024