

УДК 621.892.84:621.822.1
EDN: UQGCWQ

С.Н. Иванчик, Д.А. Сибриков, Е.С. Губин
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», Новосибирск, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ СФЕРОИДИЗИРОВАННОГО КАРБИДА ВОЛЬФРАМА К ОТРАБОТАННОМУ МАСЛУ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются условия работы подшипников скольжения. Факторы, которые существенно влияют на работоспособность подшипников, – это нагрузочная способность и долговечность работы. Цель состоит в оценке экспериментальным методом влияния присадки сфероидизированного порошка карбида вольфрама к новому моторному маслу и маслу, выработавшему свой ресурс, на коэффициент трения скольжения. Авторами проведена качественная оценка осаждаемости частиц сфероидизированного порошка в масле.

Материалы и методы. Использовались сфероидизированные частицы карбида вольфрама с добавками кобальта и хрома: WC-10Co-4Cr (WC – 86 %; Co – 10 %; Cr – 4 %); размер частиц 0,015–0,045 мкм. Изучение состояния частиц карбида вольфрама проводилось при помощи геолого-рудного микроскопа «Микромед ПОЛАР 1», предназначенного для исследования непрозрачных объектов в проходящем (обыкновенном) и отраженном (поляризованном) свете. Для проведения эксперимента применялось моторное масло SAE 10W-40 (API SG/CD) производства АО «Обнинскоргсинтез». Для измерения плотности использовался ареометр АНТ-2 830-910 ГОСТ 18481-81, для определения коэффициента трения – машина трения типа МИ-1 по схеме нагружения «вал – колодка». Качественно картина осаждения частиц оценена визуально с помощью стеклянной емкости с плоскими стенками.

Основные результаты. При высоких нагрузках около 110 кг (16 786 кПа) происходит частичное разрушение частиц порошка и обнаруживаются частицы неправильной формы меньшего размера относительно частиц шарообразной формы, что может свидетельствовать о частичном разрушении сферических частиц.

Закключение. Введение частиц карбида вольфрама при относительно невысоких нагрузках дает эффект снижения коэффициента трения как на новом масле, так и на «отработке». При высоких нагрузках значения коэффициента трения в случае эксперимента с отработанным маслом становятся больше в присутствии добавки в масле. Можно предполагать, что это связано с наличием в масле частиц – обломков частиц карбида вольфрама, а также с наличием продуктов износа и окисления масла.

Ключевые слова: коэффициент трения, отработанное масло, сфероидизированные частицы, моторное масло, подшипники скольжения, машина трения, осаждение частиц.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.892.84:621.822.1
EDN: UQGCWQ

S.N. Ivanchik, D.A. Sibrikov, E.S. Gubin
Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

STUDY OF THE EFFECT OF SPHEROIDIZED TUNGSTEN CARBIDE ADDITIVE TO TREATED OIL ON THE SLIDING FRICTION COEFFICIENT

Object and purpose of research. The object of the study is the operating conditions of plain bearings. Important factors that will significantly affect the performance of bearings are the load capacity and durability of the bearing. The aim of

Для цитирования: Иванчик С.Н., Сибриков Д.А., Губин Е.С. Изучение влияния добавки сфероидизированного карбида вольфрама к отработанному маслу на коэффициент трения скольжения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 115–124.

For citations: Ivanchik S.N., Sibrikov D.A., Gubin E.S. Study of the effect of spheroidized tungsten carbide additive to treated oil on the sliding friction coefficient. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 115–124 (in Russian).

the work is to evaluate the effect of adding spheroidized tungsten carbide powder to new motor oil and used oil on the coefficient of sliding friction using an experimental method. A qualitative assessment of the settling of spheroidized powder particles in oil was carried out in the work.

Materials and methods. Spheroidized tungsten carbide particles with cobalt and chromium additives were used: WC-10Co-4Cr (WC – 86 %; Co – 10 %; Cr – 4 %). Particle size was 0.015–0.045 mm. The state of tungsten carbide particles was studied using a geological and ore transmitted and reflected light (polarization) microscope Mikromed POLAR 1. The experiment was performed using SAE 10W-40 (API SG/CD) motor oil manufactured by JSC Obninskorgsintez. The density was measured using an ANT-2 830-910 GOST 18481-81 hydrometer. The friction coefficient was determined using an MI-1 friction machine with a shaft-shoe loading scheme. The particle deposition pattern was assessed visually using a glass container with flat walls.

Main results. At high loads of about 110 kg (16 786 kPa), partial destruction of powder particles occurs, irregularly shaped particles of smaller size relative to spherical particles are detected, which may indicate partial destruction of spherical particles.

Conclusion. The introduction of tungsten carbide particles at relatively low loads gives the effect of reducing the friction coefficient both on “new” oil and on “used” oil; At high loads, the friction coefficient values in the case of an experiment with used oil become higher in the presence of the additive in the oil. It can be assumed that this is due to the presence of particles in the oil – fragments of tungsten carbide particles, as well as the presence of wear products and oxidation of the oil.

Keywords: friction coefficient, waste oil, spheroidized particles, motor oil, plain bearings, friction machine, particle sedimentation.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Исследованию условий работы подшипников скольжения уделяется большое внимание. Это связано с тем, что данный тип подшипников широко применяется в различных механизмах и машинах [1, 2]. На работу подшипников оказывают влияние конструкция, материалы и покрытия рабочих поверхностей, а также условия работы [3]. Важными факторами, влияющими на работоспособность подшипника, являются состояние трущихся поверхностей [4] и режим работы масляного слоя и масляного клина [5]. Таким образом, нагрузочная способность и долговечность работы подшипника находятся в зависимости от характеристик масла: вязкости, плотности и пр.

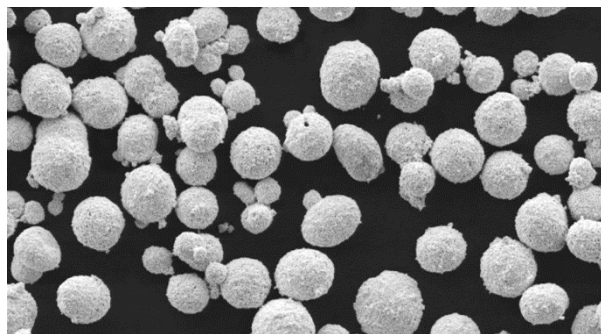


Рис. 1. Сфероидизированные частицы карбида вольфрама [13]

Fig. 1. Spheroidized tungsten carbide particles [13]

Современное масло представляет собой основу и комплекс присадок, улучшающих те или иные его свойства, при этом точный состав и соотношение присадок остается, как правило, неизвестным. С течением времени масло меняет свойства, или «старее» [6]. При этом меняются его кислотность и водородный показатель, увеличивается смолоотложение [7]. Кроме того, происходит его наполнение продуктами окисления и износа пар трения в механизме [8]; увеличивается угар масла [9], что приводит к ухудшению его эксплуатационных свойств [10–12] и увеличению износа трущихся деталей.

В статье приведены результаты экспериментального исследования влияния присадки сфероидизированного порошка карбида вольфрама к новому моторному маслу и маслу, выработавшему свой ресурс, на коэффициент трения скольжения.

В связи с большой разницей в плотности масла и карбида вольфрама можно предполагать, что осаждение частиц порошка в масле будет происходить достаточно быстро и частицы не будут попадать в рабочую зону пары трения «ролик – колодка». В случае использования несфероидизированных частиц порошка можно предполагать образование более крупных объединений за счет сцепления частиц между собой. Такое явление может послужить причиной образования устойчивого к размыванию осадка и устранению участия добавки в работе подшипника. В связи с этим в работе проведена качественная оценка осаждаемости частиц сфероидизированного порошка в масле.

Таблица 1. Основные параметры порошка [13]

Table 1. The main parameters of the powder [13]

Классификация	Карбид на основе вольфрама
Состав	86WC 10Co 4Cr
Способ изготовления	Агломерированный и спеченный
Морфология	Сферический
Назначение	Коррозионная износостойкость
Насыпная плотность г/см ³	2,9–5,8
Текучесть	Сыпучий порошок
Рабочая температура	≤ 500 °С
Плотность г/см ³	15,8 [14]

Материалы и методы испытания

Materials and methods of testing

В исследовании применены сфероидизированные частицы карбида вольфрама с добавками кобальта и хрома: WC-10Co-4Cr (WC – 86 %; Co – 10 %; Cr – 4 %). Размер частиц 0,015–0,045 мм (рис. 1). Основные свойства порошка приведены в табл. 1.

Изучение состояния частиц карбида вольфрама проводилось с использованием геолого-рудного микроскопа «Микромед ПОЛАР 1», предназначенного для исследования непрозрачных объектов в проходящем (обыкновенном) и отраженном (поляризованном) свете (рис. 2). Основные характеристики прибора приведены в табл. 2.

Перед использованием проводилось определение цены деления шкалы (или сетки) окуляра в плоскости объекта для каждого объектива с помощью объект-микрометра. Калибровочный слайд представляет собой прозрачное стекло (по размеру

предметного стекла микроскопа) с нанесенной на него микрометрической шкалой с разрешением $0,01 \pm 0,001$ мм (рис. 3).



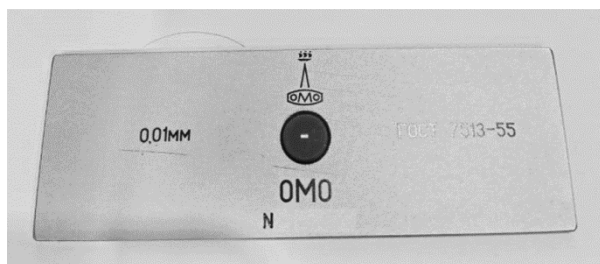
Рис. 2. Микроскоп «Микромед ПОЛАР 1» [15]

Fig. 2. Microscope Mikromed POLAR 1 [15]

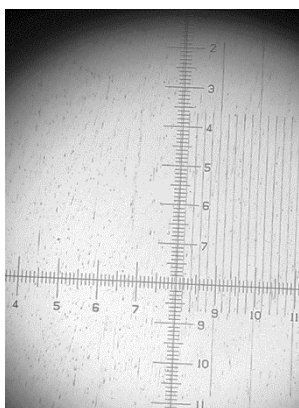
Таблица 2. Основные характеристики микроскопа «Микромед ПОЛАР 1»

Table 2. The main characteristics of the microscope Mikromed POLAR 1

Видимое увеличение микроскопа, крат	50–500
Увеличение планахроматических объективов, крат	5, 10, 20, 50
Увеличение визуальной насадки	1
Видимое увеличение широкопольных окуляров	10
Методы исследования	В проходящем (обыкновенном) свете в светлом поле
	В отраженном (поляризованном) – ортоскопическое наблюдение



а)



б)

Рис. 3. К определению точности измерения: а) объект-микрометр; б) сетки объект-микрометра и окуляра (увеличение 200×)

Fig. 3. To determine the measurement accuracy: а) object-micrometer; б) grids of the object-micrometer and eyepiece (magnification 200×)

Цена деления по результатам калибровки, определенная по формуле (1), составила

$$E = \frac{TL}{A}, \quad (1)$$

где L – число делений объект-микрометра, 10; T – цена деления шкалы объект-микрометра, указанная

на объект-микрометре, 0,01 мм; A – число делений шкалы окуляра, 20.

$$E = \frac{0,01 \cdot 10}{20} = 0,005 \text{ мм.}$$

При увеличении 500× цена деления шкалы составит 0,002 мм.

Для проведения эксперимента использовалось моторное масло SAE 10W-40 (API SG/CD) производства АО «Обнинскоргсинтез» с характеристиками, приведенными в табл. 3 [16] и на рис. 4.

Плотность по результатам измерений чистого масла составила 865 кг/м³, а отработанного – 894 кг/м³, температура при измерениях – 25 °С.

Для измерения плотности использовался ареометр АНТ-2 830-910 ГОСТ 18481-81 «Ареометры и цилиндры стеклянные. Общие технические условия» с пределами измерения 830–910 кг/м³ (рис. 5). Цена деления шкалы – 1 кг/м³, предел основной допускаемой погрешности – 1 кг/м³.

При испытаниях было использовано свежее масло и масло после наработки около 150 ч. Для определения коэффициента трения применялась машина трения типа МИ-1 по схеме нагружения «вал – колодка» [17, 18].

Образцы для испытания были изготовлены в виде ролика из стали 45 диаметром 76 мм, закаленной на твердость HRC40 ГОСТ 9012–59, и колодки из серого антифрикционного чугуна на перлитной основе марки СЧ 25 ГОСТ 1585–85, вырезанные из цилиндровой втулки дизеля Д6. Образцы имеют размер 10×10×4 мм.

Режим трения изменялся увеличением нагрузки на образец от 500 до 1100 Н, т.к. частота вращения ролика постоянна и равна 200 об/мин. Учитывая

Таблица 3. Характеристики масла

Table 3. Oil characteristics

Вязкость кинематическая, мм ² /с (сСт), при температуре 40 °С	98,05
Вязкость кинематическая, мм ² /с (сСт), при температуре 100 °С	14,08
Индекс вязкости	147
Щелочное число, мг КОН на 1 г	7,53
Кислотное число, мг КОН на 1 г	1,66

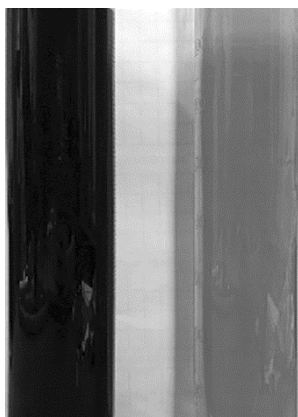


Рис. 4. Масло моторное: «отработка» (слева), чистое (справа)

Fig. 4. Motor oil: used (left), clean (right)

Рис. 5. Ареометр АНТ-2

Fig. 5. Hydrometer ANT-2



диаметр валика, скорость скольжения может быть определена по формуле:

$$v = \frac{2\pi rn}{60}, \quad (2)$$

где r – радиус ролика, 0,036 м; n – частота вращения ролика, 200 об/мин.

$$v = \frac{2\pi \cdot 0,36 \cdot 200}{60} = 0,75 \text{ м/с.}$$

После установки образца, перед проведением замеров, осуществлялась притирка пар трения с учетом полученных ранее данных [19]. Температура масла, находящегося в ванне, контролировалась термометром ТТ-М-П-6-1-260-103. Диапазон измерения 0–200 °С, цена деления 1 °С. Предел допускаемой погрешности термометра ± 2 °С.

Испытания проводились на свежем и отработанном масле с добавкой 6 % по массе сфероидизированных частиц карбида вольфрама. Производителем заявлен размер частиц 15–30 мкм. Фотографии частиц, приведенные ниже, показывают очень малое количество мелких и крупных частиц. Ранее проведенные исследования [18] показали, что данная концентрация является оптимальной и позволяет получить наименьшие значения коэффициента трения скольжения.

Анализ основных результатов измерений

Analysis of main measurement results

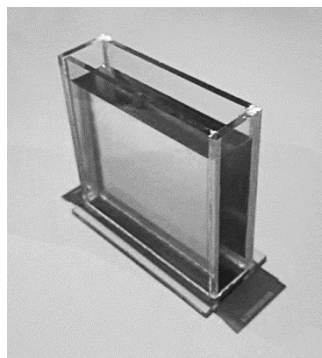
С точки зрения качества картина осаждения частиц была оценена визуально с помощью стеклянной емкости с плоскими стенками (рис. 6а). Обнаружено, что при введении порошка в масло частицы карбида вольфрама практически неразличимы. Осадок на дне образовывался спустя несколько часов.

Следует отметить, что при перемешивании масла в емкости осадок легко переходил во взвешенное состояние. Это наблюдение позволяет предположить, что при проведении эксперимента трения на машине частицы присадки находятся во взвешенном состоянии и попадают на поверхность контакта со смазочным маслом. Проверка осаждаемости частиц карбида вольфрама в масле была проведена только на свежем масле, т.к. прозрачность «отработки» намного меньше и визуально оценить появление осадка сложно. Более подробное рассмотрение осаждаемости частиц представляет отдельный вопрос для изучения.

Изучение коэффициента трения проводилось в диапазоне допускаемых машиной трения масс грузов от 50 до 110 кг (от 7630 до 16786 кПа). После испытаний проводились отборы пробы для

Рис. 6: а) емкость для оценки осаждаемости порошка в масле; б) масло с добавкой порошка

Fig. 6: а) container for assessing powder settling in oil; б) oil with powder additive



а)



б)

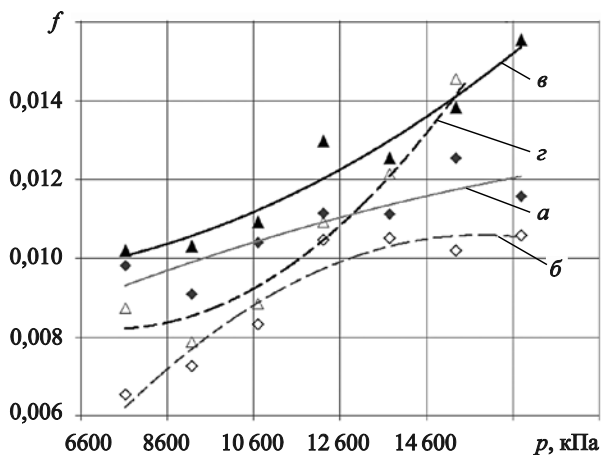


Рис. 7. Зависимость $f = f(p)$: а) новое масло; б) новое масло с добавкой карбида вольфрама 6 % масс.; в) отработанное масло; г) отработанное масло с добавкой карбида вольфрама 6 % масс.

Fig. 7. Dependence $f = f(p)$: a) new oil; b) new oil with the addition of tungsten carbide 6 % by weight; c) used oil; d) used oil with the addition of tungsten carbide 6 % by weight

изучения состояния частиц порошка под микроскопом. Экспериментально полученные зависимости коэффициента трения (f) от давления в паре трения (p) приведены на графике (рис. 7) и в табл. 4–7.

На рис. 8 приведены фотографии частиц карбида вольфрама в масле, снятые в проходящем свете с увеличением 200× при разных нагрузках от 70 до 100 кг. На рис. 9 – частицы при увеличении 500× и нагрузках 70 и 100 кг.

Закключение

Conclusion

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

При высоких нагрузках около 110 кг (16786 кПа) происходит частичное разрушение частиц порошка: на рис. 8б обнаруживаются частицы неправильной формы меньшего размера относительно рис. 8а с частицами шарообразной формы,

Таблица 4. Результаты определения коэффициента трения (новое масло)

Table 4. Results of the coefficient of friction determination (new oil)

Нагрузка, кг	Нагрузка на образец, Н	Давление в паре трения, кПа	Момент трения, Нм	Коэффициент трения	Температура, °С
50	763	7630	0,27	0,00983	60
60	916	9156	0,30	0,00910	60
70	1068	10 682	0,40	0,0104	75
80	1221	12 208	0,49	0,0112	80
90	1373	13 734	0,55	0,0111	80
100	1526	15 260	0,69	0,0126	70
110	1679	16 786	0,70	0,0116	75

Таблица 5. Результаты определения коэффициента трения (новое масло с добавкой карбида вольфрама)

Table 5. Results of the coefficient of friction determination (new oil with the addition of tungsten carbide)

Нагрузка, кг	Нагрузка на образец, Н	Давление в паре трения, кПа	Момент трения, Нм	Коэффициент трения	Температура, °С
50	763	7630	0,18	0,00655	50
60	916	9156	0,24	0,00728	50
70	1068	10 682	0,32	0,00832	75
80	1221	12 208	0,46	0,0105	75
90	1373	13 734	0,52	0,0105	80
100	1526	15 260	0,56	0,0102	80
110	1679	16 786	0,64	0,0106	85

Таблица 6. Результаты определения коэффициента трения (отработанное масло)

Table 6. Results of the coefficient of friction determination (used oil)

Нагрузка, кг	Нагрузка на образец, Н	Давление в паре трения, кПа	Момент трения, Нм	Коэффициент трения	Температура, °С
50	763	7630	0,28	0,0102	50
60	916	9156	0,34	0,0103	60
70	1068	10 682	0,42	0,0109	60
80	1221	12 208	0,57	0,0130	75
90	1373	13 734	0,62	0,0125	80
100	1526	15 260	0,76	0,0138	80
110	1679	16 786	0,94	0,0155	90

Таблица 7. Результаты определения коэффициента трения (отработанное масло с добавкой карбида вольфрама)

Table 7. Results of the coefficient of friction determination (used oil with the addition of tungsten carbide)

Нагрузка, кг	Нагрузка на образце, Н	Давление в месте контакта образцов, кПа	Момент трения, Нм	Коэффициент трения	Температура, °С
50	763,0	7630	0,24	0,00874	50
60	915,6	9156	0,26	0,00789	50
70	1068,2	10 682	0,34	0,00884	60
80	1220,8	12 208	0,48	0,0109	60
90	1373,4	13 734	0,6	0,0121	75
100	1526,0	15 260	0,8	0,0146	80
110	1678,6	16 786	0,98	0,0162	95

что может свидетельствовать о частичном разрушении сферических частиц.

Введение частиц карбида вольфрама при относительно невысоких нагрузках дает эффект снижения коэффициента трения как на новом масле, так и на «отработке».

При высоких нагрузках значения коэффициента трения в случае эксперимента с отработанным маслом становятся больше в присутствии добавки в масле. Можно предполагать, что это связано с наличием в масле частиц – обломков частиц карбида вольфрама, а также с наличием продуктов износа и окисления масла.

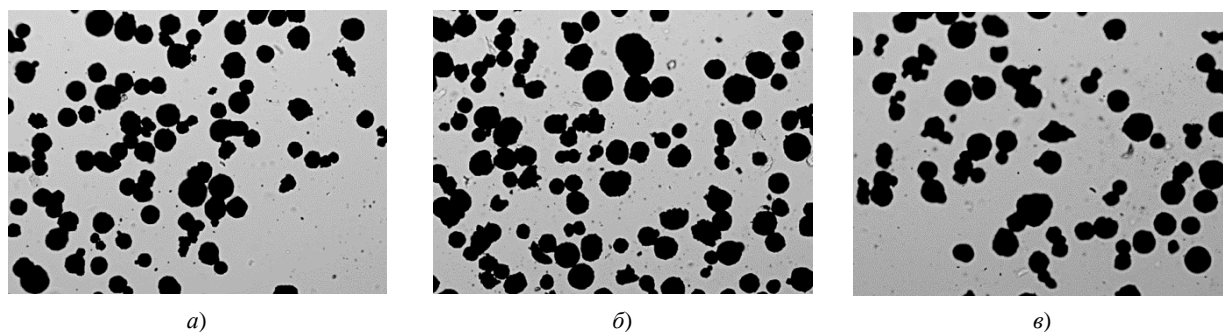


Рис. 8. Частицы карбида вольфрама с увеличением 200х: а) нагрузка 70 кг; б) нагрузка 90 кг; в) нагрузка 100 кг

Fig. 8. Tungsten carbide particles with 200× magnification: a) 70 kg load; b) 90 kg load; c) 100 kg load

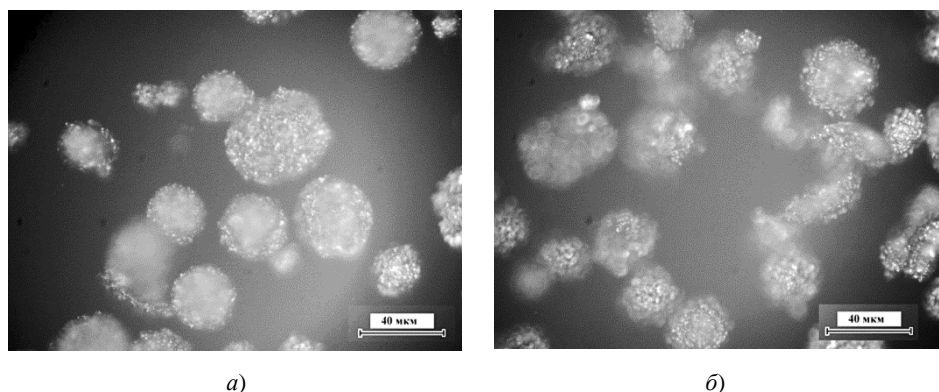


Рис. 9. Частицы карбида вольфрама. Увеличение 500х: а) нагрузка 70 кг; б) нагрузка 100 кг

Fig. 9. Tungsten carbide particles. Magnification 500x: a) load 70 kg; b) load 100 kg

Несмотря на то что износ трущихся поверхностей чаще всего связан с наличием крупных твердых частиц в масле, при наличии сфероидизированных частиц, как показали результаты исследования, значения коэффициента трения снижаются во всей области нагрузок. Можно ожидать также, что скорость изнашивания деталей, образующих пару трения, тоже будет снижаться.

Список использованной литературы

1. Математическая модель вязкопластичной смазки подшипников скольжения с деформируемой опорной поверхностью / *К.С. Ахвердиев, И.В. Колесников, М.А. Мукутадзе, И.С. Семенко* // Вестник Донского государственного технического университета. 2012. Т. 12, № 8(69). С. 18–22.
2. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения / *А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин* [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 171–180.
3. Экспериментальное исследование работы подшипников скольжения с жидкостной смазкой в нештатных режимах / *Ю.А. Равикович, Ю.И. Ермилов, Д.П. Холобцев* [и др.] // Труды МАИ. 2011. № 46. С. 20.
4. *Иззатуллоев М.А.* Экспериментальная оценка влияния регулярной микрогеометрии на трибологические характеристики радиального подшипника скольжения // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. № 1(53). С. 87–94.
5. *Слепова А.Ш.* Анализ факторов, влияющих на износ подшипников // Наука, техника и образование. 2017. № 10(40). С. 28–33.
6. *Маркелова О.А., Маркелов А.В.* Изменение свойств работающего моторного масла вызывающих его старение // Теоретические и практические аспекты развития научной мысли в современном мире : сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 13 ноября 2015 г. / Отв. ред. *А.А. Сукиасян*. Уфа : Омега Сайнс, 2015. С. 72–74.
7. *Тарасов М.И., Спичкин М.Ю.* Влияние угара моторного масла на его старение и изнашивание тронкового дизеля 524TS при использовании низкосортных топлив // Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады научно-практической конференции. 2017. Т. 1. С. 500–504.
8. *Кожинская А.В., Киселев И.А.* Влияние изменения показателей моторного масла на его старение // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 2(35). С. 147–149.
9. Влияние угара масла на его старение и изнашивание малоразмерного дизеля / *М.И. Тарасов, Л.А. Семенов, И.С. Ярин, Н.С. Молоков* // Молодежь. Наука. Инновации. 2021. Т. 1. С. 170–174.
10. *Храмцов Н.В., Королев А.Е.* Старение моторного масла // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 4. С. 134–138.
11. Изменение свойств работающего моторного масла, вызывающих его старение / *Е.М. Погребняк, Е.С. Косовец, С.П. Прокопов, Е.И. Мальцева* // Инновационные технологии в АПК как фактор развития науки в современных условиях : сборник VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Циринского, доцента, к.т.н. наук, завкафедрой начертательной геометрии Омского СХИ (1962–1989), 24 ноября 2022 г., Омск : Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2022. С. 158–163.
12. Высоконагруженные подшипники скольжения с профилированными поверхностями / *Ю.Н. Казаков, Ю. Хан, В. Джоу, Л.А. Савин* // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 2(358). С. 138–144. DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-138-144.

13. Порошок типа WC 10Co 4Cr // Горизонт покрытий : [сайт]. 2025. URL: <https://hcoatings.ru/services/powder-materials/carbides/gk-436521> (дата обращения: 16.05.2025).
14. Материал карбид вольфрама WC // Русплав : [сайт]. 2025. URL: <https://ruspлав.ru/material-karbid-volframa-wc> (дата обращения: 16.05.2025).
15. Микроскоп металлографический «Микромед ПОЛАР 1» // Микромед : [сайт]. 2025. URL: <https://mikromed-spb.ru/products/polyarizatsionnye-mikroskopy/Mikroskop-metallograficheskiy-Mikromed-POLAR-1/> (дата обращения: 18.04.2025).
16. Отчет об испытании 10W-40 // Oil-Club.ru. Выбор масла : [сайт]. 2025. URL: https://www.oil-club.ru/forum/uploads/monthly_12_2015/post-2-0-25759600-1450876371.jpg (дата обращения: 18.04.2025).
17. Гончаров П.Н., Коршунов В.Я. Методика проведения экспериментальных исследований износа образцов на машине трения МИ-1М // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 3. С. 67–69.
18. Изучение влияния добавки мелкодисперсного порошка карбида вольфрама на антифрикционные свойства смазочных материалов / Е.С. Губин, Д.А. Сибриков, С.В. Тутов [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. № 2(408). С. 169–176.
19. Определение продолжительности притирки стальных образцов пары ролик – колодка при проведении триботехнических испытаний / С.Н. Иванчик, Е.С. Губин, Д.А. Сибриков, Д.С. Тельцов // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и энергосберегающих технологий : сборник материалов II Всероссийской конференции, Казань, 09–10 декабря 2024 г. Казань : Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. С. 29–34.
4. Izzatulloev M.A. Experimental assessment of the influence of regular microgeometry on the tribological characteristics of a radial plain bearing // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. 2021. No. 1(53). P. 87–94 (in Russian).
5. Slepova A.Sh. Analysis of factors influencing bearing wear // Science, technology and education. 2017. No. 10(40). P. 28–33 (in Russian).
6. Markelova O.A., Markelov A.V. Changes in the properties of operating motor oil causing its aging // Theoretical and practical aspects of the development of scientific thought in the modern world: Collection of articles from the International scientific and practical conference, Ufa, November 13, 2015 / Editor-in-chief: A.A. Sukiasyan. Ufa : Omega Sciences, 2015. P. 72–74 (in Russian).
7. Tarasov M.I., Spichkin M.Yu. The influence of engine oil burn-off on its aging and wear of the trunk diesel engine 524TS when using low-grade fuels // Problems of transport of the Far East. Reports of the scientific and practical conference. 2017. Vol. 1. P. 500–504 (in Russian).
8. Kozhinskaya A.V., Kiselev I.A. The influence of changes in engine oil parameters on its aging // Technical regulation in transport construction. 2019. No. 2(35). P. 147–149 (in Russian).
9. The influence of oil burnout on its aging and wear of a small-sized diesel engine / M.I. Tarasov, L.A. Semenyuk, I.S. Yarin, N.S. Molokov // Youth. Science. Innovations. 2021. Vol. 1. P. 170–174 (in Russian).
10. Khrantsov N.V., Korolev A.E. Aging of motor oil // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2014. No. 4. P. 134–138 (in Russian).
11. Changes in the properties of working motor oil causing its aging / E.M. Pogrebnyak, E.S. Kosovets, S.P. Prokopov, E.I. Maltseva // Innovative technologies in the agro-industrial complex as a factor in the development of science in modern conditions: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of N.A. Tsirinsky, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Descriptive Geometry at Omsk Agricultural Institute (1962–1989), November 24, 2022. Omsk : Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2022. P. 158–163 (in Russian).
12. Highly loaded plain bearings with profiled surfaces / Yu.N. Kazakov, Yu. Han, W. Zhou, L.A. Savin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023. No. 2(358). P. 138–144. DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-138-144 (in Russian).
13. Powder Material WC 10Co 4Cr // Horizon of Coatings : [site]. 2025. URL: <https://hcoatings.ru/services/powder-materials/carbides/gk-436521> (Accessed: 16.05.2025) (in Russian).

References

1. Mathematical model of viscoplastic lubrication of plain bearings with a deformable support surface / K.S. Akhverdiev, I.V. Kolesnikov, M.A. Mukutadze, I.S. Semenko // Bulletin of the Don State Technical University. 2012. Vol. 12, No. 8(69). P. 18–22 (in Russian).
2. Effect of lubricating composite material with tungsten diselenide nanoparticles on friction in rolling bearings / A.D. Breki, V.V. Medvedeva, Yu.A. Fadin [et al.] // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2015. No. 11-1. P. 171–180 (in Russian).
3. Experimental study of the operation of plain bearings with liquid lubrication in abnormal conditions / Yu.A. Ravikovich, Yu.I. Ermilov, D.P. Kholobtsev [et al.] // Proceedings of MAI. 2011. No. 46. P. 20 (in Russian).

14. Tungsten Carbide // Rusplav : [site]. 2025. URL: <https://rusplav.ru/material-karbid-volframa-wc> (Accessed: 16.05.2025) (in Russian).
15. Microscope Mikromed POLAR 1 // Micromed : [site]. 2025. URL: <https://micromed-spb.ru/products/polyarizatsionnye-mikroskopy/Mikroskop-metallograficheskiy-Mikromed-POLAR-1/> (Accessed: 18.04.2025) (in Russian).
16. Test Report: 10W-40 // Oil-Club.ru Oil selection : [site]. 2025. URL: https://www.oil-club.ru/forum/uploads/monthly_12_2015/post-2-0-25759600-1450876371.jpg (Accessed: 18.04.2025) (in Russian).
17. *Goncharov P.N., Korshunov V.Ya.* Methodology for conducting experimental studies of wear of samples on the MI-1M friction machine // Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy. 2014. No. 3. P. 67–69 (in Russian).
18. Study of the influence of the addition of finely dispersed tungsten carbide powder on the antifriction properties of lubricants / *E.S. Gubin, D.A. Sibrikov, S.V. Titov* [et al.] // Transactions of the Krylov State Research Center. 2024. No. 2(408). P. 169–176 (in Russian).
19. Determination of the duration of grinding of steel samples of a roller-shoe pair during tribological tests / *S.N. Ivanchik, E.S. Gubin, D.A. Sibrikov, D.S. Teltsov* // II All-Russian conference Development of water transport energy, information and energy-saving technologies, Kazan, December 9–10, 2024. Compendium of papers. Kazan : Volga State University of Water Transport, 2024. P. 29–34 (in Russian).

Сведения об авторах

Иванчик Сергей Николаевич, старший преподаватель кафедры теории корабля, судостроения и техно-

логии материалов ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: ivan-ilija@yandex.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.

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.

About the authors

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.

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.

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.

Поступила / Received: 18.09.25

Принята в печать / Accepted: 14.11.25

© Иванчик С.Н., Сибриков Д.А., Губин Е.С., 2025