

Научная статья

УДК 621.892.5

doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-22-30

Влияние микроорганизмов и геомодификатора трения на трибологические свойства консистентных смазочных материалов

Денис Викторович Зимин¹, аспирант

Александр Джалюльевич Бреки², д.т.н.

Николай Евгеньевич Стариков³, д.т.н.

Денис Олегович Селифонтов⁴, аспирант

Сергей Александрович Семенов⁵, д.т.н.

Елена Борисовна Седакова⁶, д.т.н.

^{1, 2} Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

^{2, 6} Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

^{3, 4} Тульский государственный университет, Тула, Россия

⁵ ФГБУ ЦНИИ ВВС МО РФ, Люберцы, Россия

¹ tkvaug@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² albreki@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

³ starikov_tai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ denis-selifontov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁵ semenov1954@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁶ elenasedakova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8259-2606>

Аннотация. Процессы изнашивания деталей всегда сопровождают работу машин и механизмов. Важной задачей является минимизация потерь энергии на трение, для чего используются смазочные материалы, которые, в свою очередь, могут содержать различные дисперсные компоненты. Эти компоненты подразделяются на три группы: образующиеся в процессе трения, попадающие в узел трения извне и целенаправленно добавляемые. В работе подробно изучается влияние таких дисперсных компонентов, как микроорганизмы (микроскопические плесневые грибы) и целенаправленно добавляемые наполнители, в частности, серпентинит, на процессы трения и изнашивания. Рассмотрены условия возникновения и механизм биоповреждений, а также токсины, выделяемые микроорганизмами. Приведена структура и принцип действия серпентинита. Для выполнения испытаний применялись консистентные смазочные материалы четырёх разных марок (Лита, ЦИАТИМ-201, ГОИ-54п и МС-70), а также образцы зараженных плесневыми грибами консистентных смазочных материалов в чашках Петри и мелкодисперсный порошок серпентинита. Трибологические испытания проводились на машине Bosch PBD-40, а диаметры пятен износа шариков, находящихся в узле трения, измерялись при помощи цифрового микроскопа DigiMicro 2.0. В результате проведенных испытаний было найдено, что при использовании в узле трения зараженных микроорганизмами консистентных смазочных материалов чаще всего наблюдалось ухудшение таких триботехнических характеристик, как средняя сила трения и средний диаметр пятна износа, по сравнению с базовыми смазками. А при использовании смазочной композиции, состоящей из зараженного смазочного материала и серпентинита, всегда наблюдалось улучшение данных триботехнических показателей по сравнению с зараженными консистентными смазками, не содержащими серпентинит, что указывает на эффективность добавления наполнителя.

Ключевые слова: консистентный смазочный материал, дисперсные компоненты, микроорганизмы, серпентинит

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FFNF-2024-0002 «Механика и термодинамика материалов с микро- и наноструктурой, претерпевающих фазовые и химические превращения при механических и физико-химических воздействиях».

Для цитирования: Зимин Д.В., Бреки А.Д., Стариков Н.Е., Селифонтов Д.О., Семенов С.А., Седакова Е.Б. Влияние микроорганизмов и геомодификатора трения на трибологические свойства консистентных смазочных материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

Microorganisms effect and friction geomodifier influence on the tribological properties of grease lubricants

Denis V. Zimin¹, PhD student

Alexander D. Breki², D. Eng.

Nikolai E. Starikov³, D. Eng.

Denis O. Selifontov⁴, PhD student

Sergey A. Semenov⁵, D. Eng.

Elena B. Sedakova⁶, D. Eng.

^{1, 2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

^{2, 6} Institute for Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

^{3, 4} Tula State University, Tula, Russia

⁵ FSBI Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Lyubertsy, Russia

¹ tkvaug@mail.ru

² albreki@yandex.ru

³ starikov_taii@mail.ru

⁴ denis-selifontov@mail.ru

⁵ semenov1954@mail.ru

⁶ elenasedakova@gmail.com

Abstract. Parts wear process always associates with the operation of machines and mechanisms. An important task is to minimize friction energy losses, and it is lubricants that are used for that, which, in turn, can contain various dispersed components. These components are divided into three groups: being formed during the friction process, some entering friction units from the outside and others, being purposefully added. The paper studies in detail the influence of such dispersed components as microorganisms (microscopic mold fungi) and purposefully added fillers, in particular, serpentinite, on the processes of friction and wear. The conditions of occurrence and mechanism of biological damage, as well as toxins released by microorganisms are viewed. The structure and principle of action of serpentinite are given. To perform the tests, four different brands of greases were used (Lita, TSIATIM-201, GOI-54p and MS-70), as well as samples of lubricants with mycotic molds lesion in Petri dishes and fine serpentinite powder. Tribological tests were carried out on a Bosch PBD-40 machine, and the diameters of wear spots of the balls located in the friction unit were measured using a DigiMicro 2.0 digital microscope. As a result of conducted tests, it was found that in case of using greases with mold fungi in the friction unit, deterioration of tribotechnical characteristics such as average friction force and mean diameter of the wear spot was most often observed as compared to basic lubricants. And when using a lubricant composition consisting of contaminated lubricant and serpentinite, there has always been an improvement in these tribotechnical indicators as compared to contaminated greases without serpentinite, so it proves the effectiveness of filler addition.

Keywords: grease, dispersed components, microorganisms, serpentinite

Acknowledgements: the work is performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FFNF-2024-0002 «Mechanics and thermodynamics of materials with micro- and nanostructure undergoing phase and chemical transformations under mechanical and physico-chemical impacts».

For citation: Zimin D.V., Breki A.D., Starikov N.E., Selifontov D.O., Semenov S.A., Sedakova E.B. Microorganisms effect and friction geomodifier influence on the tribological properties of grease lubricants / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

Введение

Развитие современных машин сопровождается увеличением количества трибосопряжений, элементы которых изнашиваются, что способствует увеличению потерь энергии на трение, а также снижению надёжности и долговечности машин. Дополнительным фактором, обуславливающим повышение износа пар трения, является рост нагрузок и скоростей. В связи с этим актуальной трибологической задачей является снижение потерь на трение.

С целью решения этой задачи применяются консистентные смазочные материалы (КСМ) – полутвёрдый продукт, состоящий из масла и загустителя. Используемое масло может быть минеральным или синтетическим, а в качестве загустителя чаще всего используются мыла. Масло является главной составляющей КСМ (70...90 %), а введённый в него загуститель (10...25 %) формирует так называемый «пространственный скелет». В ячейках этого «скелета» находится масло, подобно мёду в сотах [1]. При наличии внешнего воздействия смазка течёт в результате пластической деформации. После окончания воздействия смазка со временем приходит в исходное состояние, возвращаясь к первоначальной структуре.

Во время работы узла трения в смазочном материале образуются различные

дисперсные компоненты, классификация которых представлена на схеме (рис. 1). Их можно разделить на три большие группы: дисперсные компоненты, образующиеся в процессе трения (продукты износа и окисления); дисперсные компоненты, попадающие в узел трения извне (пыль, песок, микроорганизмы); дисперсные компоненты, целенаправленно добавляемые в узел трения (порошки твёрдых смазочных материалов, сульфидов и т. д.) [2].

Рассмотрим подробнее микроорганизмы и целенаправленно добавляемые наполнители. Изучение воздействия биофактора на смазочные материалы актуально, потому что его влияние изучено куда меньше, чем воздействие иных факторов, таких как температура и агрессивные среды [3].

Биологическое повреждение объекта – это постепенное разрушение изделия, происходящее под воздействием микроорганизмов. Существует ряд условий, выполнение которых повышает вероятность биоповреждений смазочных масел. К таким условиям можно отнести комфортную температуру, высокую влажность и присутствие загрязнений. Установлено, что микроскопические грибы и бактерии могут усваивать углеводороды, т. к. при увеличении количества исследуемого масла увеличивалось также и число бактерий [4].

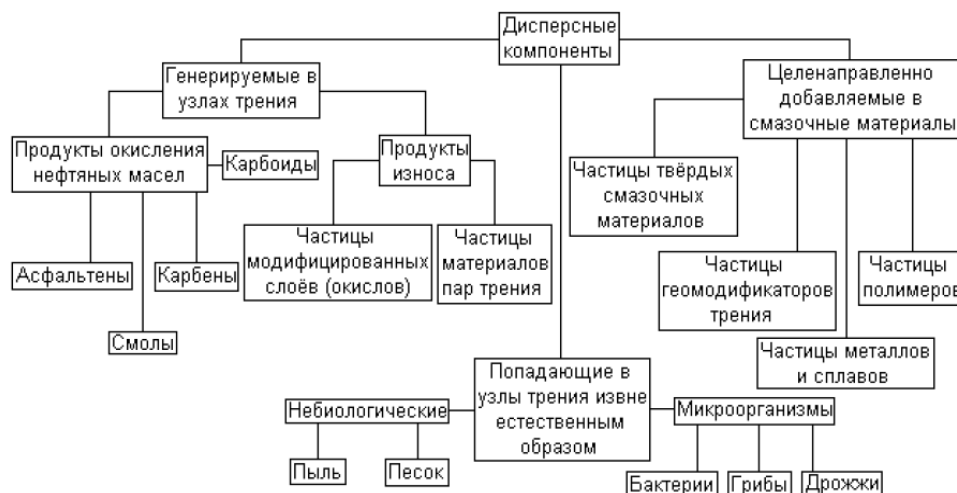


Рис. 1. Классификация дисперсных компонентов [2]

Fig. 1. Classification of dispersed components [2]

Возникновение микробиологического повреждения можно описать процессом, протекающим в несколько стадий. Сначала микроорганизмы попадают на поверхность материала и поглощаются им, затем происходит заметное увеличение их численности и химическое воздействие продуктов жизнедеятельности микроорганизмов на материал, наконец, развивается коррозионный процесс (биокоррозия) и происходит усиление биоповреждений из-за взаимодействия различных групп микроорганизмов [5].

Микробиологическая стойкость – это показатель неизменности свойств объекта под воздействием микроорганизмов с течением времени. Смазочный материал должен быть биостойким, потому что в ходе эксплуатации машины детали механизма могут быть подвержены биокоррозией вследствие попадания микроорганизмов. Но в ходе исследований [6, 7] было определено, что ни масло ружейное РЖ, ни КСМ «Лита» не являются грибостойкими. А для КСМ «Лита» было найдено, что введение грибов *Aspergillus niger* приводит к повышению неустойчивости трения [7]. Эти результаты указывают на необходимость проведения дополнительных трибологических испытаний смазочных материалов, содержащих микроскопические грибы.

Использование микроорганизмами составляющих смазочных масел в качестве источника питания и энергии, а также выделение ими продуктов жизнедеятельности, как правило, приводит к ухудшению состояния смазочных материалов.

Микроскопические плесневые грибы выделяют так называемые микотоксины, т. е. метаболиты, наиболее токсичными из которых являются афлатоксины и охратоксины. Эти микроорганизмы встречаются повсюду и адаптированы к условиям окружающей среды, но при низкой температуре и относительной влажности меньше 15 % наблюдается низкая активность ферментов и почти не

происходит размножение микромицетов. Микроскопические грибы в виде плесени часто можно обнаружить на поверхности зерна, овощей и других растений. В ходе сбора урожая они могут попасть, например, в зазоры пар трения зерноуборочного комбайна и оказать негативное влияние на смазочные материалы, содержащиеся в этих трибосопряжениях [8].

С целью улучшения трибологических свойств смазочных материалов в них целенаправленно добавляются дисперсные компоненты. Например, актуальным является введение частиц такого природного слоистого геомодификатора трения, как серпентинит (рис. 2). Серпентинит (от лат. *Serpens* – змея) – горная порода, включающая в себя серпентин $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ в качестве базового элемента, составляющего не менее 50 % от общего объема породы, а также тальк и др. [9]. Тонкоплёночные покрытия, полученные с использованием частиц минералов слоистого строения, способствуют снижению потерь на трение за счёт разделения контактирующих поверхностей и сглаживания их микрорельефа [10].

Наряду с серпентинитом, существуют также и другие модификаторы трения в виде мелкодисперсных порошков. Это, например, графит, дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама, диселенид вольфрама и др. [11, 12]. Такие наполнители обладают слоистой структурой и анизотропией свойств. Они могут применяться как антифрикционные добавки, которые заменяют трение соприкасающихся деталей трением слоёв молекул наполнителя. Как показывают результаты исследований, введение дисульфида вольфрама снижает момент трения на 10...40 %, а диселенида вольфрама – на 20...50 %, что демонстрирует эффективность добавок, используемых для защиты деталей узлов трения [11, 12].



Рис. 2. Серпентинит

Fig. 2. Serpentinite

Согласно результатам испытаний, проведенных на четырехшариковой машине трения, при размере частиц серпентинита 1,0 мкм диаметр пятна износа меняется незначительно при низкой концентрации наполнителя, но заметно снижается при повышении концентрации наполнителя до 10 % масс. При использовании серпентинита с размером частиц 10 мкм диаметр пятна износа начинает уменьшаться даже при низкой концентрации и достигает наименьшего значения при концентрации наполнителя 7,0 % масс. [13].

Таким образом, был проведен обзор различных дисперсных компонентов, встречающихся в консистентных смазочных материалах, а также были подробно рассмотрены такие дисперсные компоненты, как микроорганизмы и целенаправленно добавляемые наполнители. Согласно проведенным исследованиям, смазочные материалы не грибостойки, а воздействие микроорганизмов на КСМ приводит к ухудшению стабильности такой важной трибологической характеристики, как сила трения. Соответственно, для выяснения того, окажет ли дисперсный наполнитель позитивное влияние на свойства КСМ, содержащих микроорганизмы, необходимо проведение соответствующих исследований.

Материалы и методы

Для выполнения испытаний использованы КСМ различных марок (Лита, ЦИАТИМ-201, ГОИ-54п и МС-70), а также образцы заражённых КСМ в чашках Петри и мелкодисперсный порошок серпентинита. Испытания выполнены на машине трения Bosch PBD-40. Схема применяемого узла трения приведена на рис. 3. Согласно рис. 3, в емкость закладываются нижние шарики из стали ШХ15 и смазочный материал. Взвешивание материалов производилось на аналитических весах Госметр ВЛ-324В-С. Испытания проводились при частоте вращения 200 об/мин и нагрузке 20 кгс. Регистрация значений силы трения происходит каждую секунду в течение часа при помощи подключенного через USB-кабель компьютера с программным обеспечением Owen Process Manager, после чего полученные данные можно сохранить в виде файла формата Excel. Диаметры пятен износа нижних шариков были изменены при помощи цифрового микроскопа DigiMicro 2.0.

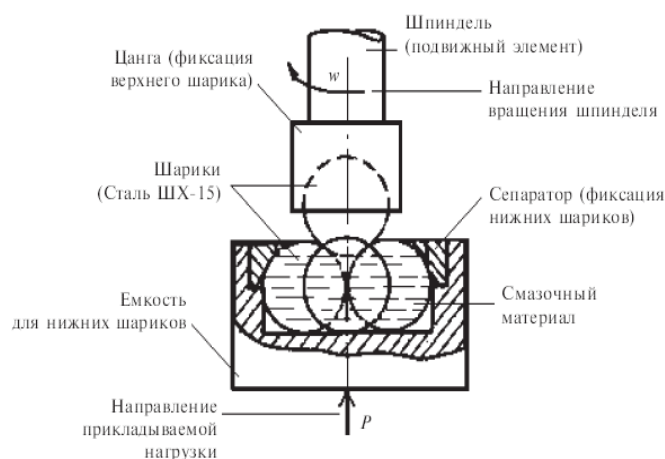


Рис. 3. Схема используемого узла трения [14]

Fig. 3. Scheme of the friction unit used [14]

Результаты и обсуждение

Сначала были проведены испытания базовых консистентных смазочных материалов

(КСМ) для определения трибологических характеристик, таких как средний диаметр пятна износа и средняя сила трения.

Для того чтобы узнать, как влияют микроорганизмы на эти характеристики, были проведены испытания заражённых КСМ. Согласно полученным данным (рис. 4), наименьшим средним диаметром пятна износа, и соответственно, наилучшими противоизносными свойствами обладает КСМ ЦИАТИМ-201, а наименьшей средней силой трения, и соответственно, наилучшими антифрикционными свойствами – ГОИ-54п.

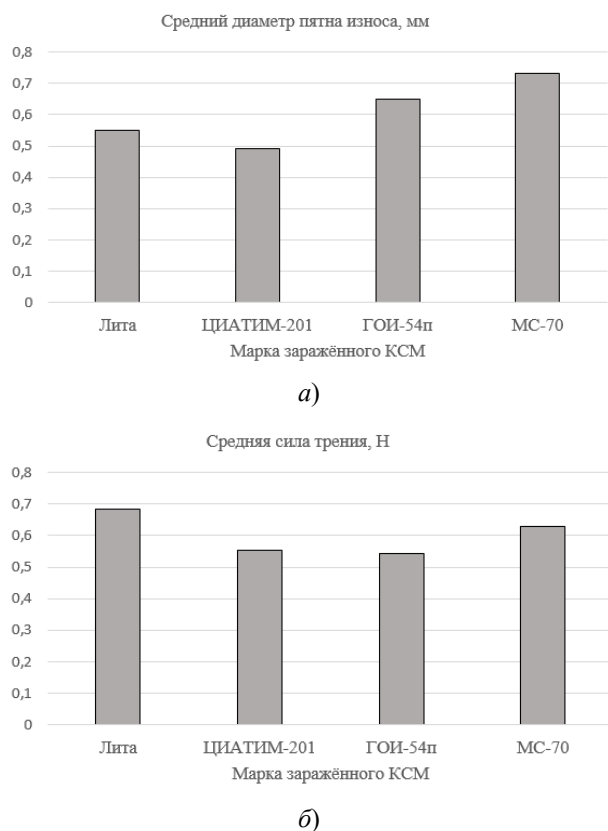


Рис. 4. Средний диаметр пятна износа (а) и сила трения (б) при использовании разных марок зараженных КСМ

Fig. 4. Average diameter of the wear spot (a) and friction force (b) when using different brands of contaminated fuels and lubricant

С целью нивелировать негативное воздействие микроорганизмов (микроскопических грибов и бактерий) в заражённые КСМ был добавлен дисперсный наполнитель –

серпентинит. Для выявления оптимальной концентрации наполнителя был проведен ряд испытаний со смазочными композициями (СК), каждая из которых состояла из определённого базового КСМ и серпентинита с концентрацией 1,0 %, 2,0 % или 4,0 %.

Путем аппроксимации экспериментальных данных полиномом второй степени были получены графики зависимости таких трибологических характеристик, как средний диаметр пятна износа и средняя сила трения, от концентрации серпентинита.

С помощью этих графиков были подобраны оптимальные концентрации наполнителя: 2,0 % для КСМ Лита; 3,0 % для ГОИ-54п; 2,5 % для МС-70. Для КСМ ЦИАТИМ-201 было решено не проводить испытания СК, содержащей заражённый КСМ ЦИАТИМ-201 и серпентинит, т. к. данная добавка либо увеличивает средний диаметр пятна износа, либо никак не влияет на среднюю силу трения.

Результаты проведённых испытаний представлены на диаграммах (рис. 5).

Сначала рассмотрим изменение среднего диаметра пятна износа. При использовании заражённого КСМ Лита он возрастает на 49 % по сравнению с базовым КСМ Лита, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ Лита и серпентинита, снижается на 7,0 % по сравнению с заражённым КСМ Лита. При применении заражённого КСМ ЦИАТИМ-201 средний диаметр возрастает на 36 % по сравнению с базовым КСМ ЦИАТИМ-201. При использовании заражённого КСМ ГОИ-54п он снижается на 7,0 % по сравнению с базовым КСМ ГОИ-54п, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ, ГОИ-54п и серпентинита, снижается на 28 % по сравнению с заражённым КСМ ГОИ-54п. При применении заражённого КСМ МС-70 средний диаметр снижается на 9,0 % по сравнению с базовым КСМ МС-70, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ МС-70 и серпентинита, снижается на 29 % по сравнению с заражённым КСМ МС-70.

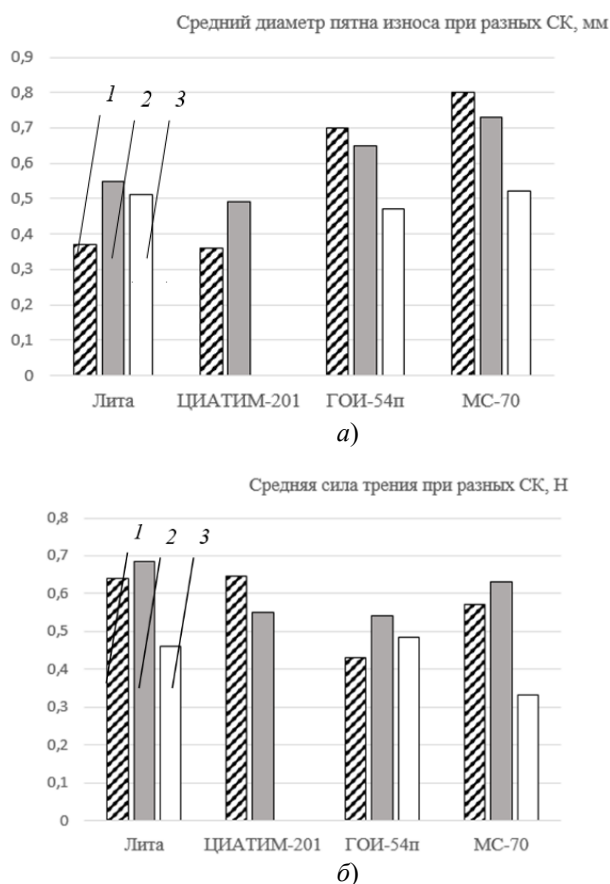


Рис. 5. Средний диаметр пятна износа (а) и сила трения (б) при использовании разных СК:
1 – базовые КСМ; 2 – заражённые КСМ; 3 – заражённые КСМ с серпентинитом

Fig. 5. Average diameter of the wear spot (a) and the friction force (b) when using different LC:
1 – basic grease; 2 – mold-infected grease; 3 – mold-infected grease with serpentine

Сначала рассмотрим изменение среднего диаметра пятна износа. При использовании заражённого КСМ Лита он возрастает на 49 % по сравнению с базовым КСМ Лита, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ Лита и серпентинита, снижается на 7,0 % по сравнению с заражённым КСМ Лита. При применении заражённого КСМ ЦИАТИМ-201 средний диаметр возрастает на 36 % по сравнению с базовым КСМ ЦИАТИМ-201. При использовании заражённого КСМ ГОИ-54п он снижается на 7,0 % по сравнению с базовым КСМ ГОИ-54п, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ, ГОИ-54п и серпентинита, снижается на 28 % по сравнению с заражённым

КСМ ГОИ-54п. При применении заражённого КСМ МС-70 средний диаметр снижается на 9,0 % по сравнению с базовым КСМ МС-70, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ МС-70 и серпентинита, снижается на 29 % по сравнению с заражённым КСМ МС-70.

Затем рассмотрим изменение средней силы трения. При использовании заражённого КСМ Лита она возрастает на 7,0 % по сравнению с базовым КСМ Лита, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ Лита и серпентинита, снижается на 33 % по сравнению с заражённым КСМ Лита. При применении заражённого КСМ ЦИАТИМ-201 средняя сила трения снижается на 15 % по сравнению с базовым КСМ ЦИАТИМ-201. При использовании заражённого КСМ ГОИ-54п она возрастает на 25 % по сравнению с базовым КСМ ГОИ-54п, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ, ГОИ-54п и серпентинита, снижается на 10 % по сравнению с заражённым КСМ ГОИ-54п. При применении заражённого КСМ МС-70 средняя сила трения возрастает на 10 % по сравнению с базовым КСМ МС-70, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ МС-70 и серпентинита, снижается на 47 % по сравнению с заражённым КСМ МС-70.

Заключение

По результатам исследований было выяснено, что при использовании заражённых КСМ чаще всего происходит ухудшение трибологических свойств по сравнению с базовыми КСМ. В свою очередь, заражённые КСМ, содержащие оптимальные концентрации серпентинита, продемонстрировали улучшение трибологических характеристик по сравнению с заражёнными КСМ, не содержащими серпентинита. Это указывает на эффективность добавления наполнителя, и, следовательно, на то, что проведение дальнейших исследований с другими наполнителями целесообразно и перспективно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хебда М. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Хебда М., Чичинадзе А.В. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.
2. Бреки А.Д., Толочко О.В., Васильева Е.С. и др. Состояние нефтяных смазочных композиционных материалов в подшипниковых узлах в процессе тепло-массообмена // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып.12. Ч. 1. С. 117–124. EDN: TKIWCX
3. Добрынина Т.В., Иванов Я.В. Системное биоповреждение авиационной техники // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. С. 194–196.
4. Ферзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Алиева К.И. и др. Биоповреждение смазочных масел в условиях хранения // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. С. 24–28.
5. Варченко Е.А. Особенности оценки биоповреждений и биокоррозии материалов в природных средах [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 104 (10). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/135.pdf> Дата обращения: 01.09.2022. EDN: TFWSCD
6. Лаврушин А.В., Стариков Н.Е., Семенов С.А. и др. Оценка грибостойкости смазочных материалов, применяемых для защиты изделий машиностроения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 307–314. EDN: OUZRNS
7. Бреки А.Д., Семенов С.А., Стариков Н.Е. и др. Влияние микроскопических грибов *Aspergillus niger* на триботехнические свойства пластичного смазочного материала марки «Лита» // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 7. С. 108–117. EDN: YAGHWH
8. Ефимочкина Н.Р., Седова И.Б., Шевелева С.А. и др. Токсигенные свойства микроскопических грибов // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 45. С. 6–33. DOI: 10.17223/19988591/45/1 EDN: HZPKXC
9. Власенко В.П., Осипов А.В., Костенко В.В. Состав и свойства горной породы серпентинит и возможности использования ее в качестве мелиоранта почв // Агрохимический вестник. 2019. № 4. С. 28–31. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10054 EDN: TFOQDK
10. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Погодаев А.В. Повышение надежности втулок цилиндров судовых дизелей (обзор) // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 3 (36). DOI: 10.5281/zenodo.1408233 EDN: UZCOUI
11. Бреки А.Д., Медведева В.В., Фадин Ю.А. и др. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в

подшипниках качения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 11. Ч. 1. С. 78–86. EDN: VLQLKF

12. Бреки А.Д., Медведева В.В., Фадин Ю.А. и др. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 11. Ч. 1. С. 171–180. EDN: VLQLPP

13. Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А. и др. Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала с наполнителем из дисперсных частиц слоистого модификатора трения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 4. С. 257–267. EDN: WDLKWB

14. Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Васильева Е.С. и др. Исследование модернизированных конструктивных смазочных материалов, содержащих мелкодисперсные частицы модификаторов трения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Машиностроение, 2010. 2-2 (100). С. 92–97. EDN: MUFPOST

REFERENCES

1. Hebda M. Tribotechnics data guide. In 3 vols. 2. Lubricants, lubrication technology, sliding and rolling bearings / Hebda M., Chichinadze A.V. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 416 p.
2. Breki A.D., Tolochko O.V., Vasilyeva E.S., et al. The condition of petroleum lubricating composite materials in bearing assemblies during heat and mass transfer // Izvestiya TulSU. Technical sciences, 2014, Issue 12, Part 1, pp. 117–124. EDN: TKIWCX
3. Dobrynina T.V., Ivanov Ya.V. Systemic biodegradation of aviation equipment // Modern technologies for ensuring civil defense and eliminating the consequences of emergency situations, 2015, pp. 194–196.
4. Ferzaliev V.M., Babaev E.R., Alieva K.I. et al. Biodamage of lubricating oils under storage conditions // Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials, 2016, pp. 24–28.
5. Varchenko E.A. Features of the assessment of biological damage and biocorrosion of materials in natural environments [Electronic resource] // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University, 2014, No. 104 (10). Access mode: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/135.pdf> Date of access: 09/01/2022. EDN: TFWSCD
6. Lavrushin A.V., Starikov N.E., Semenov S.A., et al. Evaluation of the fungus resistance of lubricants used for mechanical engineering products protection // Izvestia TulSU. Technical sciences, 2019, Issue 9, pp. 307–314. EDN: OUZRNS

7. Breki A.D., Semenov S.A., Starikov N.E., et al. The effect of branching mycelium of fungi of the *Aspergillus niger* species on the tribological properties of the plastic lubricant of the LITA brand. // *Izvestiya TulGU. Technical sciences*, 2018, Issue 7, pp. 108–117. EDN: YAGHWH

8. Efimochkina N.R., Sedova I.B., Sheveleva S.A., et al. Toxigenic properties of mycotoxin-producing fungi // *Bulletin of Tomsk State University. Biology*. 2019. No. 45. pp. 6–33. DOI: 10.17223/19988591/45/1 EDN: HZPKXC

9. Vlasenko V.P., Osipov A.V., Kostenko V.V. The composition and properties of the serpentinite rock and the possibility of using it as a meliorant of soils // *Agrokhimicheskiy Vestnik*, 2019, No. 4, pp. 28–31. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10054 EDN: TFOQDK

10. Leontiev L.B., Leontiev A.L., Pogodaev A.V. Improving the reliability of cylinder bushings of marine diesel engines (review) // *Bulletin of the engineering school of FEFU*, 2018, No. 3 (36). DOI: 10.5281/zenodo.1408233 EDN: UZCOUI

11. Breki A.D., Medvedeva V.V., Fadin Yu.A., et al. The effect of a lubricating composite material with tungsten disulfide nanoparticles on friction in quality bearings // *Izvestiya TulSU. Technical sciences*, 2015, Issue 11, Part 1, pp. 78–86. EDN: VLQLKF

12. Breki A.D., Medvedeva V.V., Fadin Yu.A., et al. The effect of a lubricating composite material with tungsten diselenide nanoparticles on friction in bearings // *Izvestiya TulGU. Technical sciences*, 2015, Issue 11, Part 1, pp. 171–180. EDN: VLQLPP

13. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., et al. Anti-wear properties of a grease-based lubricating composite material with a filler made of dispersed particles of a layered friction modifier // *Izvestia TulSU. Technical sciences*, 2016, Issue 4, pp. 257–267. EDN: WDLKWB

14. Breki A.D., Chulkin S.G., Vasilyeva E.S., et al. Investigation of upgraded structural lubricants containing fine particles of friction modifiers // *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University. Issue: Mechanical Engineering*, 2010, 2-2 (100). pp. 92–97. EDN: MUF PST

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.12.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 29.01.2024

The article was submitted 20.12.2023; approved after reviewing 09.01.2024; assepted for publication 29.01.2024