

## Триботехнические свойства смазочных композиций с добавками МТМС аэрогеля и серпентинита для балансира лесозаготовительного трактора

Ю.А. Карасёв<sup>1a</sup>, В.А. Марков<sup>2b</sup>, А.Д. Бреки<sup>3, 4c</sup>, Д.В. Зимин<sup>3d</sup>,  
А.А. Колмакова<sup>5e</sup>, В.К. Иванов<sup>5f</sup>, А.Г. Колмаков<sup>6g</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, 18, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Институт проблем машиноведения РАН, Большой пр. Васильевского острова, 61, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, пр. Ленинский, 31, Москва, Россия

<sup>6</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, пр. Ленинский, 49, Москва, Россия

<sup>a</sup> kya1105@mail.ru, <sup>b</sup> mactor85@mail.ru, <sup>c, d</sup> albreki@yandex.ru,

<sup>e</sup> drakonessa3@bk.ru, <sup>f</sup> van@igic.ras.ru, <sup>g</sup> imetranlab10@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0009-9080-2974>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0009-3435-9904>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0952-6549>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2343-2140>,

<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>

Статья поступила 05.09.2024, принята 25 09 2024

*Одним из способов увеличения долговечности подвижных соединений трактора, в том числе деталей балансира, является использование противоизносных и антифрикционных дисперсных добавок в смазочное масло. Для снижения энергетических потерь на трение в подшипниках, смазываемых маслами, наряду с жидкими присадками используются высокодисперсные добавки твердых смазочных веществ. В работе представлены результаты исследования триботехнических свойств смазочных композиций с дисперсными добавками серпентинита и полиметилсилсесквиоксанового аэрогеля для балансира лесозаготовительного трактора. В качестве базового смазочного материала при исследованиях использовали масло марки ТСп-10, применяемое для смазки балансира гусеничного трактора. Исследование в условиях трения скольжения по четырехшариковой схеме осуществляли на машине трения ПБД-40. Установлено, что аэрогель при его концентрации в смазочном слое около 2,5 % способствует снижению силы трения на 33 %. При концентрации около 2,67 % аэрогеля реализуется снижение износа на 35,5 %. Выявлено, что серпентинит при его концентрации в смазочном слое около 2,1 % способствует снижению силы трения на 13 %. При концентрации серпентинита около 2,63 % реализуется снижение износа на 46 %. На основе анализа химических реакций окисления и разложения аэрогеля и серпентинита предложено описание механизма антифрикционного и противоизносного действия данных дисперсных добавок. Из приведенных в работе уравнений реакций видно, что как в случае серпентина, так и в случае аэрогеля имеет место образование диоксида кремния, образующего противоизносные защитные пленки на поверхностях и способствующего снижению трения и износа.*

**Ключевые слова:** трение; износ; смазочная композиция; сталь ШХ-15; порошкообразная добавка; аэрогель; серпентинит.

## Tribological properties of lubricant compositions with polymethylsilsesquioxane airgel and serpentinite additives for the balancer of a forestry tractor

Yu.A. Karasev<sup>1a</sup>, V.A. Markov<sup>2b</sup>, A.D. Breki<sup>3, 4c</sup>, D.V. Zimin<sup>3d</sup>,  
A.A. Kolmakova<sup>5e</sup>, V.K. Ivanov<sup>5f</sup>, A.G. Kolmakov<sup>6g</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 18, Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Institute of Mechanical Science Problems of the Russian Academy of Sciences; 61, Bolshoi Prospect of Vasilievsky Island, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup> Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences; 31, Leninsky Pros., Moscow, Russia

<sup>6</sup> Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences; 49, Leninsky Pros., Moscow, Russia

<sup>a</sup> kya1105@mail.ru, <sup>b</sup> mactor85@mail.ru, <sup>c, d</sup> albreki@yandex.ru,

<sup>e</sup> drakonessa3@bk.ru, <sup>f</sup> van@igic.ras.ru, <sup>g</sup> imetranlab10@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0009-9080-2974>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0009-3435-9904>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0952-6549>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2343-2140>,

<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4907-951X>

Received 05.09.2024, accepted 25.09.2024

*One of the ways to increase the durability of tractor moving joints, including the parts of the balancer, is the use of anti-wear and antifriction dispersed additives in lubricating oil. To reduce friction energy losses in bearings lubricated with oils, highly dispersed additives of solid lubricants are used along with liquid additives. The paper presents the results of a study of the tribotechnical properties of lubricating compositions with dispersed additives of serpentinite and polymethylsilsesquioxane airgel for the balancer of a logging tractor. As a base lubricant, during the research, TSp-10 brand oil is used to lubricate the balance beam of a tracked tractor. The study under sliding friction conditions according to a four-ball scheme is carried out on a PBD-40 friction machine. It is found that airgel, at its concentration in the lubricating layer of about 2.5%, reduces the friction force by 33%. With an airgel concentration of about 2.67%, a 35.5% reduction in wear is realized. It is found that serpentinite, at its concentration in the lubricating layer of about 2.1%, helps to reduce the friction force by 13%. At a serpentinite concentration of about 2.63%, a 46% reduction in wear is realized. Based on the analysis of chemical reactions of oxidation and decomposition of airgel and serpentinite, a description of the mechanism of antifriction and anti-wear action of these dispersed additives is proposed. From the equations of reactions given in the work, it can be seen that both in the case of serpentine and in the case of airgel, silicon dioxide is formed, which provides anti-wear protective films on surfaces and helps to reduce friction and wear.*

**Keywords:** friction; wear; lubricant composition; ShKh-15 steel; powder additive; airgel; serpentinite.

**Введение.** Механизм балансира гусеничного трактора Онежского тракторного завода (ОТЗ) состоит из рычага, оси каретки и двух осей катка. Отказы данного узла происходят из-за износа и последующего абразивного трения в соединениях «ось – подшипник». Когда зазор в подвижном соединении становится значительным, из него уходят смазочные материалы, а также происходит воздействие загрязняющих абразивных элементов и влаги на поверхности трения [1]. Исходя из общей теории трения в подвижных соединениях, любой процесс износа можно разделить на три основные фазы: приработка, нормальный износ и критический износ [2]. Для каждого конкретного подвижного соединения критическое значение износа и, соответственно, зазора определяется индивидуально. Одним из способов увеличения долговечности балансира гусеничного трактора является использование противоизносных и антифрикционных дисперсных добавок в смазочное масло. Для снижения энергетических потерь, возникающих из-за трения в подвижных соединениях, применяются жидкие смазки и их комбинации в определенных пропорциях с различными добавками (присадками). Такими присадками могут быть графит, дисульфид молибдена, тетраборат натрия, серпентинит и др. [3; 4].

Присадочные материалы могут быть разными, со своими физико-механическими свойствами, например, возможно их применение как в виде растворов и суспензий, так и в порошковом состоянии. Представленные материалы могут наделять базовые смазочные материалы различными свойствами, такими как антифрикционность, препятствование возникновению задиров на поверхностях трения и т. д. [5; 6].

Наряду с перечисленными, перспективными дисперсными добавками являются также такие модификаторы трения, как полиметилсилсесквиоксан (МТМС) [7–9]  $(\text{SiO}_{1,5}\text{CH}_3)_n$ , в том числе в форме

аэрогеля, и серпентинит [10; 11]  $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ . В частности, добавление частиц гидросиликата магния в жидкие и пластичные смазки заметно улучшало триботехнические свойства при трении скольжения пар «сталь – сталь» и «сталь – бронза» [12–14]. Применение серпентинита более предпочтительно для смазки балансира гусеничного трактора, чем аэрогеля, в связи с его большей научной популярностью и исследованностью триботехнических свойств. К преимуществам полиметилсилсесквиоксанового аэрогеля можно отнести высокие показатели пористости (около 88 %), эластичности и гидрофобности, а также устойчивость к кислотам и органическим растворителям и очень высокие сорбционные свойства по отношению к смазочным маслам и нефтепродуктам [15–19]. В связи с этим частицы аэрогеля МТМС при добавке в смазочные среды могут служить эффективными накопителями жидкой смазки и при высоких давлениях между трущимися поверхностями, когда смазочная жидкая среда выдавливается из зазора, разрушаясь, способны выделять значительное количество смазки. Кроме того, частицы аэрогеля состоят из множества сфероидов диаметром 0,5...3 мкм [19], что при разрушении частиц порошка будет приводить к своеобразному эффекту «микрошарикоподшипника».

**Материалы и методики исследования.** В качестве базового смазочного материала использовали масло марки ТСп-10, применяемое для смазки балансира гусеничного трактора.

В качестве дисперсных добавок использовали:

1) порошкообразный аэрогель  $(\text{SiO}_{1,5}\text{CH}_3)_n$  [19] с размерами частиц  $\approx 10$  мкм;

2) порошкообразный серпентинит  $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$  со средним размером частиц 0,6 мкм.

При проведении исследований изменялась концентрация присадочных добавок в базовом масле в пределах 0–4 %.

Исследование в условиях трения скольжения по четырехшариковой схеме осуществляли на машине

трения ПБД-40 (рис. 1, а) в соответствии с ГОСТ 9490–75 [20].

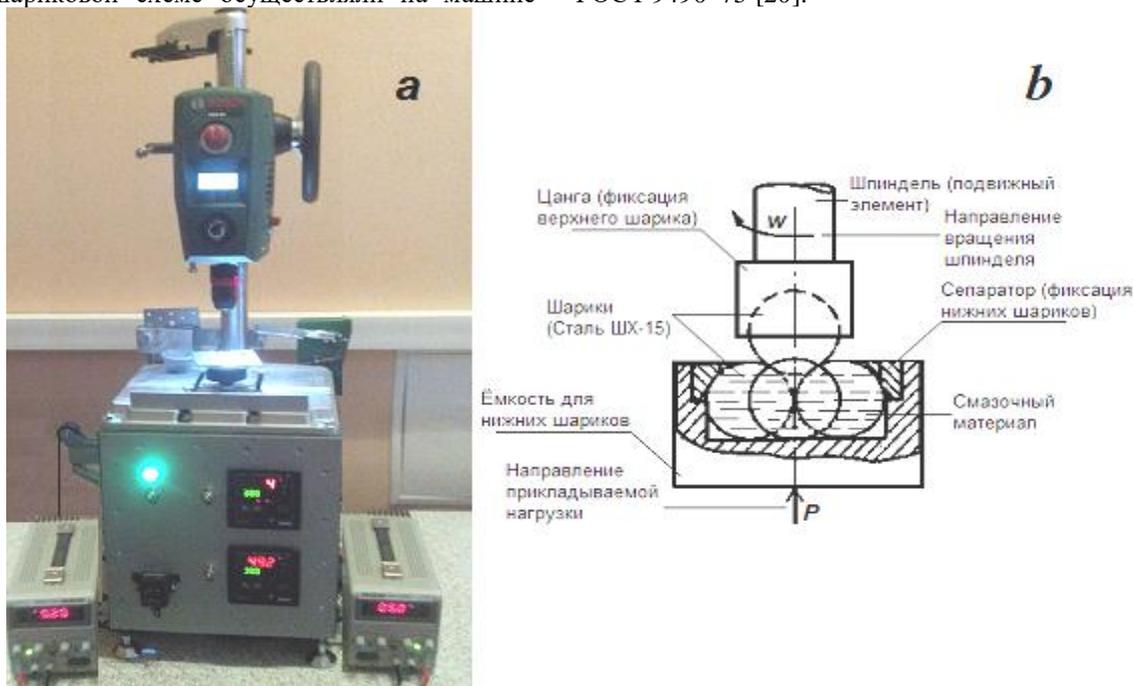


Рис. 1. Испытательное оборудование: а — машина трения ПБД-40; б — схема испытаний

Данная лабораторная установка предназначена для оценки способности смазочных материалов снижать износ трущихся деталей и уменьшать энергопотери на трение. В этой установке используется стандартный шарик из стали ШХ-15 диаметром 12,7 мм, который зажат в шпинделе машины. Испытания проводятся при частоте вращения шпинделя в 1 500 об./мин. К этому вращающемуся шару под заданной нагрузкой 40 кгс прижимаются три неподвижных шарика (рис. 1, б), расположенные в плоскости, перпендикулярной оси вращения, образуя треугольник. Все эти шарики погружены в чашу с испытуемым смазочным материалом [21].

При вращении центрального шарика на поверхностях контактирующих с ним неподвижных шаров образуются пятна износа [21]. По средней величине этих пятен судят о влиянии смазочного материала на износ шаров при данной нагрузке. Продолжительность испытания — 60 мин. Каждый смазочный материал испытывали шестикратно. В каждом опыте замерялась сила трения.

**Результаты и их обсуждение.** Полученные зависимости силы трения от времени для масла ТСП-10 без добавок представлены на рис. 2.

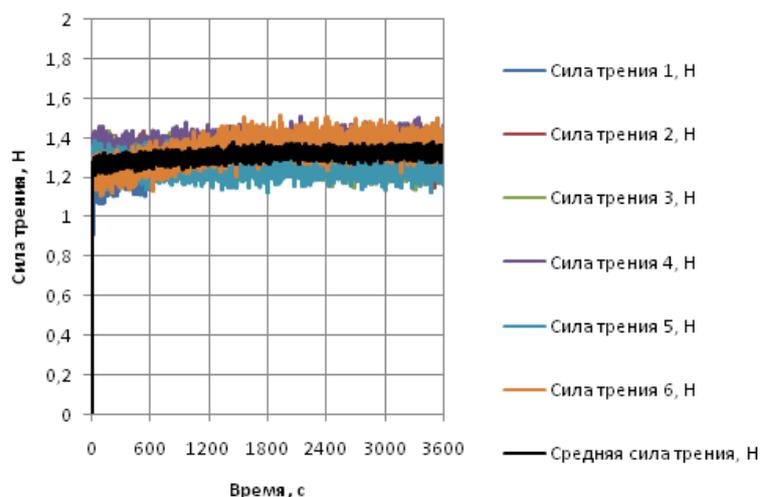
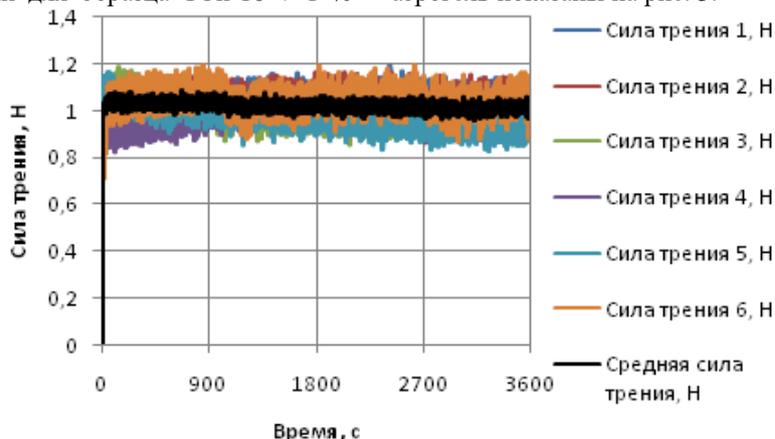


Рис. 2. Зависимость силы трения от времени для базового смазочного масла ТСП-10

На рис. 2 показана также зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения по полученному массиву средних

значений дает величину 1,3 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для базового смазочного масла составило 0,0036 Н<sup>2</sup>.

Результаты испытаний для образца ТСП-10 + 1 % аэрогель показаны на рис. 3.

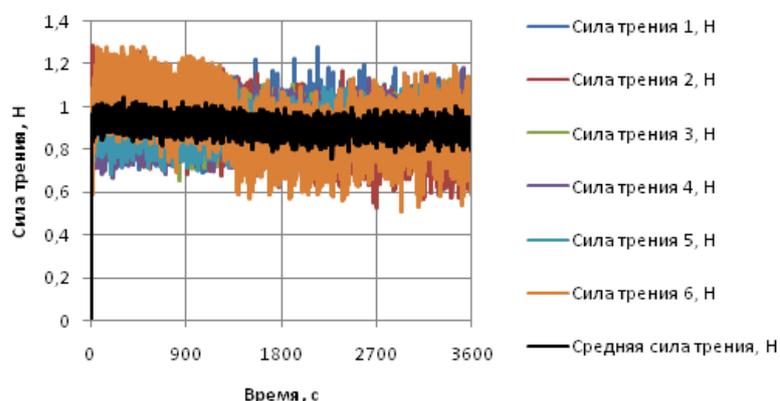


**Рис. 3.** Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10 + 1 % аэрогель

На рис. 3 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения дает значение 1,02 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для

смазочного материала ТСП-10 + 1 % аэрогель составило 0,0035 Н<sup>2</sup>.

Результаты испытаний для образца ТСП-10 + 2 % аэрогель показаны на рис. 4.

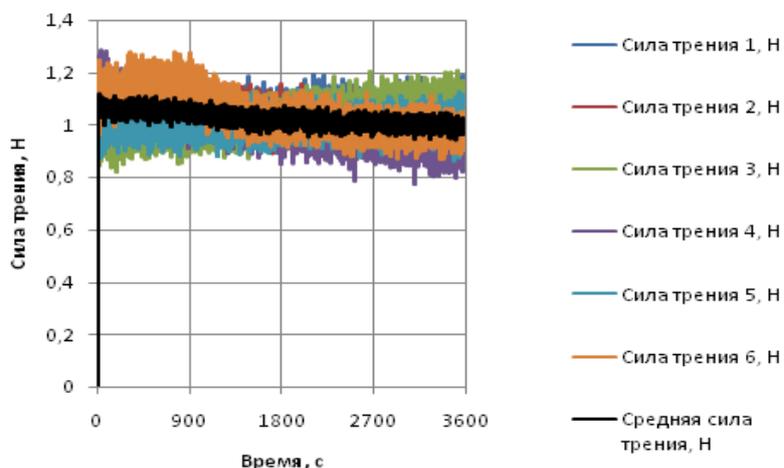


**Рис. 4.** Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10 + 2 % аэрогель

На рис. 4 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения дает значение 0,9 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для

смазочного материала ТСП-10 + 2 % аэрогель составило 0,0097 Н<sup>2</sup>.

Результаты испытаний для образца ТСП-10 + 4 % аэрогель показаны на рис. 5.



**Рис. 5.** Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10 + 4 % аэрогель

На рис. 5 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения дает значение 1,02 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10 + 4 % аэрогель составило 0,0044 Н<sup>2</sup>.

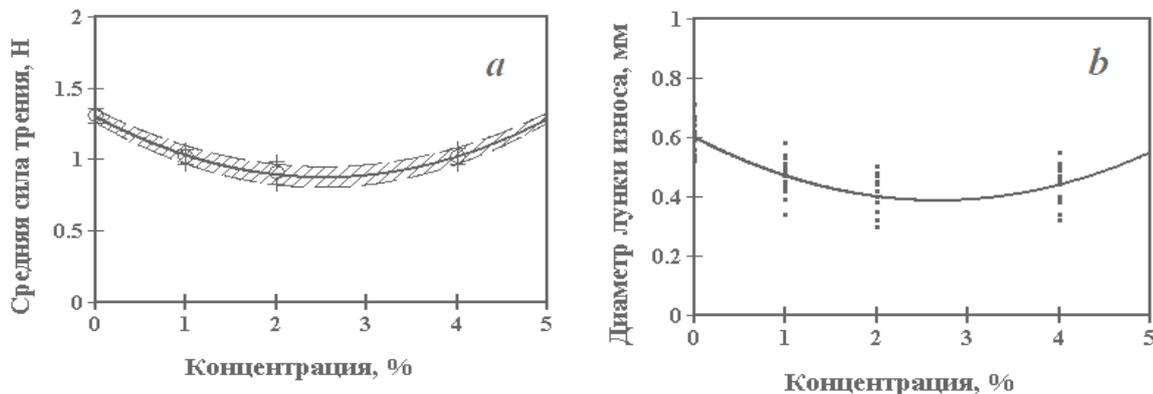


Рис. 6. Графики зависимости от концентрации аэрогеля: *a* — средней силы трения; *b* — среднего диаметра лунки износа

На рис. 6, *a* пунктирными линиями показаны границы доверительного интервала. Зависимость средней силы трения от концентрации аэрогеля имеет следующий вид:

$$F_f(C) = 0.067C^2 - 0.338C + 1.3. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации для (1) равен  $R^2 = 0,996$ .

Исследование функции (1) показывает, что для базового смазочного масла средняя сила трения составляет 1,3 Н, а минимальное ее значение приблизительно равно 0,874 при концентрации аэрогеля около 2,5 %.

Зависимость среднего диаметра лунки износа от концентрации аэрогеля имеет следующий вид:

$$d_w(C) = 0.03C^2 - 0.16C + 0.6. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации для (2) равен  $R^2 = 0,61$ .

Исследование функции (2) показывает, что для базового смазочного масла средний диаметр лунки износа составляет 0,6 мм, а минимальное значение среднего диаметра приблизительно равно 0,387 при концентрации аэрогеля около 2,67 %.

Результаты испытаний для образца ТСП-10 + 1 % серпентинит показаны на рис. 7.

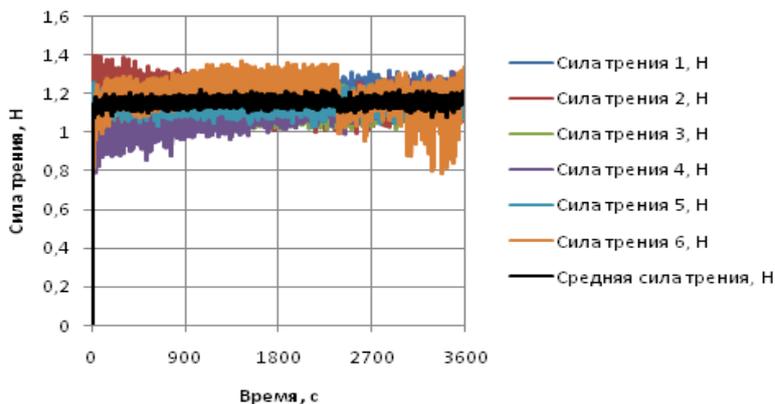


Рис. 7. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10 + 1 % серпентинит

На рис. 7 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения дает значение 1,156 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10 + 1 % серпентинит составило 0,0056 Н<sup>2</sup>.

Результаты испытаний для образца ТСП-10 + 2 % серпентинит показаны на рис. 8.

На рис. 8 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения дает значение 1,16 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10 + 2 % серпентинит составило 0,0097 Н<sup>2</sup>.

Результаты испытаний для образца ТСП-10 + 4 % серпентинит показаны на рис. 9.

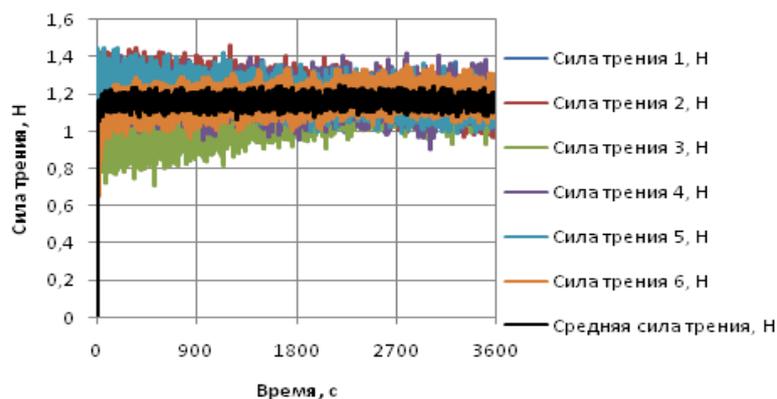


Рис. 8. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10 + 2 % серпентинит

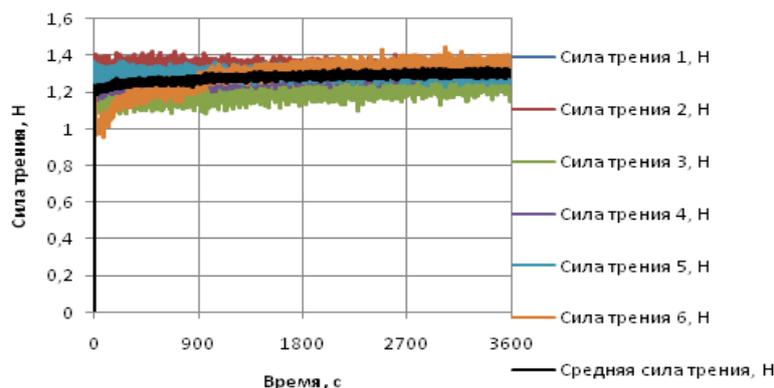


Рис. 9. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10 + 4 % серпентинит

На рис. 9 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения дает значение 1,28 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10 + 4 % серпентинит составило 0,0036 Н<sup>2</sup>.

Графики зависимости средней силы трения и среднего диаметра лунки износа в зависимости от концентрации серпентинита в базовом смазочном масле приведены на рис. 10.

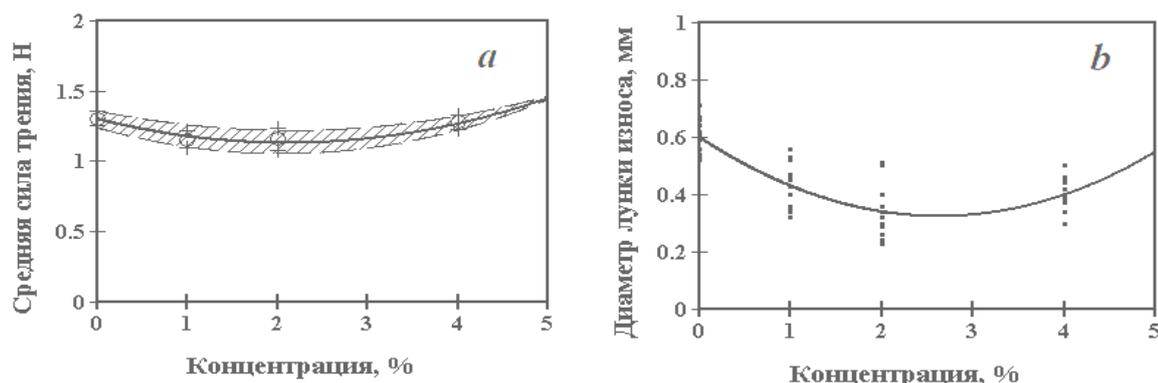


Рис. 10. График зависимости от концентрации серпентинита: *a* — средней силы трения; *b* — среднего диаметра лунки износа

На рис. 10, *a* пунктирными линиями показаны границы доверительного интервала. Зависимость средней силы трения от концентрации серпентинита имеет следующий вид:

$$F_f(C) = 0.038C^2 - 0.16C + 1.3. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации для (3) равен  $R^2 = 0,94$ .

Исследование функции (3) показывает, что для базового смазочного масла средняя сила трения составляет 1,3 Н, а минимальное ее значение

приблизительно равно 1,13 Н при концентрации серпентинита около 2,1 %.

Зависимость среднего диаметра лунки износа от концентрации серпентинита имеет следующий вид:

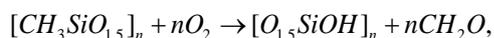
$$d_w(C) = 0.04C^2 - 0.21C + 0.6. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации для (4) равен  $R^2 = 0,69$ .

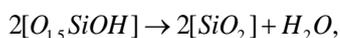
Исследование функции (4) показывает, что для базового смазочного масла средний диаметр лунки

износа составляет 0,6 мм, а минимальное значение среднего диаметра приблизительно равно 0,324 мм при концентрации серпентинита около 2,63 %.

Известно, что аэрогель МТМС в интервале температур 550–650 °С окисляется по схеме [6]:



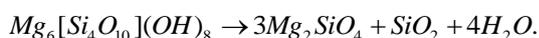
дополнительно имеют место следующие превращения [6]:



а при температуре 800 °С реализуется реакция [6]:



Серпентин, в интервале температур 400–600 °С разлагается следующим образом [21]:



Из приведенных уравнений реакций видно, что как в случае серпентинита, так и в случае аэрогеля имеет место образование диоксида кремния, образующего противоизносные защитные пленки на поверхностях и способствующего снижению трения и износа. Непрореагировавшая с поверхностями трения часть диоксида кремния оказывает на них абразивное воздействие, повышая трение и износ. В случае разложения серпентинита образуется также форстерит, воздействующий на поверхности трения в качестве абразива. Соответственно, как серпентинитом, так и аэрогелем на поверхностях трения инициируются конкурентные процессы защиты и разрушения, зависящие от их концентрации в смазочном слое.

#### Литература

- Марков В.А., Карасев Ю.А., Попова Д.А. Определение вероятности безотказной работы балансира гусеничного трактора // Сб. ст. по материалам науч.-технической конф. ин-та технологических машин и транспорта леса по итогам науч.-исследовательских работ 2022 года (6-10 февр. 2023 г.). СПб.: С.-Петербург. гос. лесотехнический ун-т им. С.М. Кирова, 2023. С. 190-195.
- Балихин В.В., Быков В.В., Иванов Н.Ю. Технология ремонта машин и оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 524 с.
- Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / пер. с англ. Г.И. Липкина. М.: Химия, 1988. 488 с.
- Бреки А.Д., Медведева В.В., Фадин Ю.А. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 171-180.
- Смазочные материалы; антифрикционные и противоизносные свойства; методы испытаний: справ. / под ред. Р.М. Матвеевского, В.Л. Лашки, И.А. Буяновского. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.
- Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г. Особенности процесса трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в условиях смазки Литол-24, модифицированной частицами MoS<sub>2</sub> // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 11. С. 34-40.
- Киреев В.В., Дьяченко Б.И., Рыбалко В.П. Строение и термоокислительные превращения полиметилсилесквиоксанов // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2008. Т. 50, № 4. С. 614-624.
- Рыбалко В.П., Дьяченко Б.И., Писаренко Е.И., Киреев В.В. Термоокислительная устойчивость полиметилсилесквиоксанов на основе олигомеров, синтезированных в присутствии хлоридов металлов // Пластические массы. 2010. № 4. С. 30-34.
- Постнова И.В., Щипунов Ю.А. Одностадийный синтез монолитного макропористого полиметилсилесквиоксана, абсорбирующего нефть // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77, № 2. С. 262.
- Смирнова О.А., Кривоногова А.В. Синтетический серпентинит // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 7-1. С. 31-33.
- Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: дис. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. СПб., 2011. 161 с.
- Паршукова Н.Ю. Возможность использования Литол-24 в качестве присадки к производственным маслам // Актуальные проблемы современной науки: сб. ст.

- Междунар. науч.-практической конф. В 4-х т. (13-14 дек. 2013 г.). Уфа: Башкирский гос. ун-т, 2013. Т. 4. С. 210-214.
13. Соколова В.А., Траоре Ж.Ф., Марков В.А., Иванов А.М. Разработка методов автоматизации контроля изделий из металла // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: сб. тр. науч.-технической конф., посвящ. памяти д-ра технических наук, проф. А.А. Рыжкина (20 янв. 2023 г.). Ростов н/Д.: Донской гос. технический ун-т, 2023. С. 297-301.
  14. Горшков Н.В., Задосенко Е.Г. Трибологические свойства смазки Литол-24 с модифицированными наночастицами феррита железа // XXXIII Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021): тр. конф. (30 нояб. - 2 дек. 2021 г.). М.: ФГБУ науки Ин-т машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, 2021. С. 221-227.
  15. Mahadik D.B., Lee Y.K., Chavan N.K., Mahadik S.A., Park H.H. Monolithic and shrinkage-free hydrophobic silica aerogels via new rapid supercritical extraction process // The Journal of Supercritical Fluids. 2016. V. 107. P. 84-91.
  16. Jia X., Shen B., Zhang L., Zheng W. Waterproof MXene-decorated wood-pulp fabrics for high-efficiency electromagnetic interference shielding and Joule heating // Composites Part B: Engineering. 2020. V. 198. P. 108250.
  17. Kavale M.S., Mahadik D.B., Parale V.G., Wagh P.B., Gupta S.C., Rao A.V., Barshilia H.C. Optically transparent, superhydrophobic methyltrimethoxysilane based silica coatings without silylating reagent // Applied Surface Science. 2011. V. 258, № 1. P. 158-162.
  18. Lermontov S.A., Buznik V.M., Sipyagina N.A., Bespalov A.S., Malkova A.N., Grashchenkov D.V., Baranchikov A.E. Hierarchical highly porous composite ceramic material modified by hydrophobic methyltrimethoxysilane-based aerogel // Journal of Porous Materials. 2021. V. 28, № 4. P. 1237-1244.
  19. Лермонтов С.А., Малкова А.Н., Колмакова А.А., Силягина Н.А., Котцов С.Ю., Баранчиков А.Е., Иванова О.С., Каплан М.А., Байкин А.С., Колмаков А.Г., Иванов В.К. Сравнительный анализ характеристик супергидрофобных эластичных полиметилсилесквиоксановых аэрогелей, полученных при атмосферном давлении и в сверхкритических условиях // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 8. С. 15-22.
  20. ГОСТ 9490-75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырёхшариковой машине. Введ. 01.01.1978. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 8 с.
  21. Бреки А.Д., Васильева Е.С., Толочко О.В. Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиимидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы дихалькогенидов вольфрама: моногр. Тула: Тульский гос. ун-т, 2015. 276 с.
  22. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надёжности трибосопряжений. СПб.: Акад. транспорта РФ, 2001. 304 с.
  - (6-10 fevr. 2023 g.). SPb.: S.-Peterb. gos. lesotekhnicheskij un-t im. S.M. Kirova, 2023. P. 190-195.
  2. Balihin V.V., Bykov V.V., Ivanov N.Yu. Technology of repair of machines and equipment. SPb.: SPbGLTA, 2006. 524 p.
  3. Klamann D. Lubricants and related products. Synthesis. Properties. Application. International standards / per. s angl. G.I. Lipkina. M.: Himiya, 1988. 488 p.
  4. Breki A.D., Medvedeva V.V., Fadin Yu.A. The influence of a lubricant composite material with tungsten diselenide nanoparticles on friction in rolling bearings // News of the Tula State University (Izvestija TulGU). Technical sciences. 2015. № 11-1. P. 171-180.
  5. Lubricants; antifriction and antiwear properties; Test methods: sprav. / pod red. R.M. Matveevskogo, V.L. Lashkhi, I.A. Buyanovskogo. M.: Mashinostroenie, 1989. 224 p.
  6. Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Features of the process of sliding friction of steel R6M5 on steel 45 under the conditions of Litol-24 lubricant modified with MoS<sub>2</sub> particles // Deformation and Fracture of Materials. 2021. № 11. P. 34-40.
  7. Kireev V.V., D'yachenko B.I., Rybalko V.P. Structure and thermal-oxidative transformations of polymethylsilsesquioxanes // Polymer Science. Ser. A. 2008. V. 50, № 4. P. 614-624.
  8. Rybalko V.P., D'yachenko B.I., Pisarenko E.I., Kireev V.V. Thermal-oxidative stability of polymethylsilsesquioxanes based on oligomers synthesized in the presence of metal chlorides // Plasticheskie massy. 2010. № 4. P. 30-34.
  9. Postnova I.V., Shchipunov Yu.A. One-stage synthesis of monolithic macroporous polymethylsilsesquioxane that absorbs oil // Colloid Journal. 2015. V. 77, № 2. P. 262.
  10. Smirnova O.A., Krivonogova A.V. Synthetic serpentinite // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii. 2016. № 7-1. P. 31-33.
  11. Breki A.D. Tribological properties of modified lubricating oils: dis. ... na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk. SPb., 2011. 161 p.
  12. Parshukova N.Yu. Possibility of using Litol-24 as an additive to industrial oils / N. Yu. Parshukova // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. V 4-h t. (13-14 dek. 2013 g.). Ufa: Bashkirkij gos. un-t, 2013. V. 4. P. 210-214.
  13. Sokolova V.A., Traore Zh.F., Markov V.A., Ivanov A.M. Development of automation methods for testing metal products // Sovremennye tendencii razvitiya instrumental'nyh sistem i metalloobrabatyvayushchih kompleksov: sb. tr. nauch.-tekhnicheskoy konf., posvyashch. pamyati d-ra tekhnicheskikh nauk, prof. A.A. Ryzhkina (20 yanv. 2023 g.). Ростов н/Д.: Donskoj gos. tekhnicheskij un-t, 2023. P. 297-301.
  14. Gorshkov N.V., Zadoshenko E.G. Tribological properties of Litol-24 lubricant with modified iron ferrite nanoparticles // XXXIII Mezhdunar. innovacionnaya konf. molodyh uchennyh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUС - 2021): tr. konf. (30 noyab. - 2 dek. 2021 g.). М.: FGBU nauki In-t mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN, 2021. P. 221-227.
  15. Mahadik D.B., Lee Y.K., Chavan N.K., Mahadik S.A., Park H.H. Monolithic and shrinkage-free hydrophobic silica aerogels via new rapid supercritical extraction process // The Journal of Supercritical Fluids. 2016. V. 107. P. 84-91.
  16. Jia X., Shen B., Zhang L., Zheng W. Waterproof MXene-decorated wood-pulp fabrics for high-efficiency electromagnetic interference shielding and Joule heating // Composites Part B: Engineering. 2020. V. 198. P. 108250.

#### References

1. Markov V.A., Karasev Yu.A., Popova D.A. Determination of the probability of failure-free operation of the balancer of a caterpillar tractor // Sb. st. po materialam nauch.-tekhnicheskoy konf. in-ta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauch.-issledovatel'skih rabot 2022 goda

17. Kavale M.S., Mahadik D.B., Parale V.G., Wagh P.B., Gupta S.C., Rao A.V., Barshilia H.C. Optically transparent, superhydrophobic methyltrimethoxysilane based silica coatings without silylating reagent // *Applied Surface Science*. 2011. V. 258, № 1. P. 158-162.
18. Lermontov S.A., Buznik V.M., Sipyagina N.A., Bespalov A.S., Malkova A.N., Grashchenkov D.V., Baranchikov A.E. Hierarchical highly porous composite ceramic material modified by hydrophobic methyltrimethoxysilane-based aerogel // *Journal of Porous Materials*. 2021. V. 28, № 4. P. 1237-1244.
19. Lermontov C.A., Malkova A.N., Kolmakova A.A., Sipyagina N.A., Kotcov S.Yu., Baranchikov A.E., Ivanova O.S., Kaplan M.A., Baikin A.S., Kolmakov A.G., Ivanov V.K. Comparative analysis of the characteristics of superhydrophobic elastic polymethylsilsesquioxane aerogels obtained at atmospheric pressure and under supercritical conditions // *Deformation and Fracture of Materials*. 2022. № 8. P. 15-22.
20. GOST 9490-75. Liquid and plastic lubricants. Method for determining tribological characteristics on a four-ball machine. Vved. 01.01.1978. M.: IPK Izd-vo standartov, 2002. 8 p.
21. Breki A.D., Vasil'eva E.S., Tolochko O.V. Tribotechnical characteristics of liquid lubricants and polyimide composite materials containing antifriction nanoparticles of tungsten dichalcogenides: monogr. Tula: Tul'skij gos. un-t, 2015. 276 p.
22. Pogodaev L.I., Kuz'min V.N., Dudko P.P. Increasing the reliability of tribocouplings. SPb.: Akad. transporta RF, 2001. 304 p.