

ЭПИЛАМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ В УСЛОВИЯХ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

О.П. Прошина¹, А.Н. Иванкин²✉

¹ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, стр. 2

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

aivankin@inbox.ru

Рассмотрены проблемы инновационных технологий модификации поверхностей трения, в частности ободурования, материалов, трущихся деталей и узлов с помощью смазочных масел на основе перфторированных олигомеров и масел растительного происхождения. Изучено влияние многофункциональных смазочных композиций на основе фторсодержащего полипропиленоксидного продукта марки 6СФК-180-05 и экспериментального эпилама «Трибоконтрата» на трибологические характеристики работы смазочной системы на основе рапсового и таллового масел. Исследовано влияние концентрации эпилама, величины механической нагрузки и времени на противоизносные свойства композиции растительного масла и фторированной добавки. Показано, что наибольшими противоизносными свойствами обладают масляные композиции на основе рапсового масла в присутствии 2–3 % перфторированного эпилама. Показано, что интенсивность износа, оцениваемая в процессе испытаний на четырех шариковой машине трения с силовой нагрузкой в 50–350 Н в присутствии эпиламирующих композиций, была приемлемой для обеспечения работоспособности механического устройства, а противоизносные свойства масляных композиций на основе растительного сырья, зависели как от свойств применяемого эпиламирующего состава, так и от характера распределения величин механических нагрузок в процессе испытаний двух марок эпиламов. Отмечено, что положительным фактором использования технологии применения фторсодержащих эпиламов в составе смазочных смесей является наблюдавшееся увеличение вязкости рабочей композиции по сравнению с исходными маслами. Полученные результаты представляют интерес для разработки методологии длительной эксплуатации механических устройств и повышения их износостойкости в условиях механохимических воздействий.

Ключевые слова: эпиламирование, эпилам, рапсовое масло, талловое масло, эксплуатационные свойства, износостойкость, трибологические характеристики

Ссылка для цитирования: Прошина О.П., Иванкин А.Н. Эпиламирование механических устройств для повышения износостойкости в условиях механохимического воздействия // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 1. С. 130–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-130-138

Процесс трения при работе механических устройств обуславливает их износ, вызывающий постепенное срабатывание конструкционного материала. При длительном воздействии это приводит механическую систему в состояние непригодности. Для увеличения срока службы деталей машин и механизмов используют различные подходы, связанные с изменением размеров, формы, массы испытывающих трение деталей, а также осуществляют модификацию поверхности [1, 2].

Основным процессом, приводящим к выходу из строя машин и механизмов при эксплуатации, является трение. Для уменьшения износа трущихся деталей применяются разнообразные смазочные композиции. Введение минерального масла и разнообразных присадок в определенных концентрациях позволяет существенно изменять условия работы механической системы, а дол-

говечность сохранения смазки на поверхностях трущихся деталей дает возможность увеличивать срок службы механической системы. В современном машиностроении применяют различные смазочные масла, в которые добавляют в качестве противоизносных компонентов порошки диспергированных металлов, оксидов, графита, сульфидов металлов переменной валентности и полимерные частицы [3–5].

Граничное трение возникает на поверхности контактирующих деталей при толщине слоя смазки менее 0,1 мкм. В этом случае сила трения зависит от природы и состояния трущихся поверхностей. Наличие граничного слоя приводит к уменьшению сил трения при внесении смазочного материала более чем в 10 раз и уменьшает износ механизма в сотни раз. Граничное трение вариабельно и определяет предел работоспособности механического узла. В таком режиме поверхности трения, как правило, не разделены

полностью слоем смазки, и непосредственный контакт рабочих элементов узла приводит к резкому росту энергоемкости и ускоренному изнашиванию трущихся поверхностей [6–8].

Альтернативой широко применяемому сегодня способу снижения граничного трения за счет наличия минеральных масел является использование термостойких полимерных материалов на основе фторсодержащих соединений.

Одним из таких инновационных направлений развития трибологических технологий для модификации поверхностей является эпиламирование. Эпиламированием называют процесс нанесения защитной многофункциональной пленки на основе фторсодержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые наносятся на изделия, оборудование, материалы, любые трущиеся детали и узлы машин и механизмов. При этом на них образуется тончайшая наноразмерная пленка толщиной в 40...100 нм. Технологии эпиламирования относятся к области нанотехнологий в машиностроении.

Растворы фторсодержащих ПАВ называют эпиламами. При нанесении фторированных ПАВ, а также некоторых других природных полимеров на поверхности трущихся деталей образуются классические пленки по типу Ленгмюра — Блоджетт [9, 10].

Эпиламирование — один из наиболее эффективных способов комплексной защиты поверхностного слоя деталей машин и улучшения таких характеристик поверхностей, как сопротивление усталости, антифрикционность, адгезионная стойкость, износостойкость, коррозионная стойкость. Особый интерес может представлять развитие данного направления в условиях использования биомасел и различных видов моторного топлива, получаемого из природного сырья [11–13].

Эпиламирование применяют к различным материалам и изделиям, прежде всего к трущимся деталям машин и инструментов — подшипникам, валам, полотнам пил в машинах лесного комплекса, деталям прецизионных узлов трения в точных приборах. Эпиламами обрабатывают как металлические, так и неметаллические поверхности [6, 10]. Эпиламирование позволяет существенно улучшить динамические показатели различных трибологических систем, в частности подшипников станков и режущего инструмента.

Суть эпиламирования заключается в обработке твердых трущихся поверхностей различными ПАВ. Фторсодержащие соединения, известные своей термостойкостью, являются в этом отношении достаточно перспективными объектами [14, 15].

Процесс эпиламирования относится к физико-химическим методам повышения износостойкости и имеет некоторые преимущества по срав-

нению с другими технологиями. Препараты для эпиламирования изначально были предназначены для использования в космической и специальной технике, но со временем стали применяться и в других отраслях [16, 17].

Важным преимуществом эпиламирования является сохранение структуры обрабатываемой твердой поверхности без изменений в условиях ее простой модификации с приданием поверхностям антифрикционных, гидрофобных, защитных и других полезных свойств [10, 13].

Практически неизменными остаются геометрические размеры обрабатываемых деталей, поскольку толщина защитного слоя обычно не превышает 100 нм. В машиностроении применяются многофункциональные тонкопленочные покрытия на основе фторсодержащих полимеров и олигомеров. Олигомерные покрытия получают из растворов фторсодержащих соединений. Выпускаемые промышленностью составы «Эпилам», «Фолеокс» применяют в качестве антиадгезионных сред, триботехнических покрытий, гидрофобных слоев в парах трения различных конструкторских решений [5].

Эпиламы представляют собой многокомпонентные системы, содержащие фторорганические ПАВ в различных растворителях и регулирующие добавки. В настоящее время отечественная промышленность производит эпиламы различных составов. В частности, известен специальный противозносный препарат марки «Forum», содержащий поверхностно-активный олигомер со структурой, аналогичной полимеру фторопласт-4 с химической формулой $(C_2F_4)_n(COF)_2$, где $n = 100...1000$. Препарат был разработан в Институте химии ДВО РАН. К достоинствам данного препарата можно отнести его невысокую стоимость по сравнению с западными аналогами.

Используются также препараты «Аспект-модификатор» на основе перфторпропиленоксида молекулярной массы 2500...9000, формулы: $CF_3CF_2O[CF(CF_3)CF_2O]_nCF(CF_3)OCF_2CF_3$, где $n = 15...55$.

Для повышения параметров триботехнических характеристик используют фторсодержащие олигомерные составы «Фолеокс», «Эпилам», полимер-олигомерные продукты термогазодинамического синтеза (ТГД-синтеза) политетрафторэтилена (ПТФЭ), выпускаемые под торговой маркой «Forum». ПТФЭ является одним из наиболее термохимически стойких полимерных материалов.

Олигомеры «Фолеокс» («Эпилам») представляют собой 1–2%-ю суспензию активного макрокомплекса во фреоне с молекулярной массой 2200...5000, условной формулой $R_f - R_1$, где R_f — фторсодержащий радикал, R_1 — функциональная группа типа: $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$, $-CF_3$.

Такие препараты обычно применяют в виде 2–10%-й эмульсии с минеральными маслами. Значительное улучшение свойств поверхности обеспечивается при толщине пленки в 50...100 нм. При этом способность покрытия удерживать на обработанной поверхности смазку исключает «сухое» трение и снижает износ металлических и неметаллических контактирующих поверхностей в парах трения. После закрепления на поверхности эта пленка обладает высокими гидрофобными свойствами, хорошей химической стабильностью, высокой термической стойкостью и другими положительными качествами, в том числе способностью защитить контактирующие поверхности от окисления и истирания. Поверхность детали, модифицированная фторированным ПАВ, удерживает масло в узле сопряжения и препятствует его стеканию. При этом практически полностью прекращается испарение масла после прекращения его подачи при остановке механизма. Это — так называемый эффект «молекулярного ворса».

Технология нанесения покрытия имеет большие перспективы на производстве и может применяться практически повсеместно. Несомненный интерес представляет эпиламирование поверхностей трения пильных аппаратов лесозаготовительной техники [10]. Здесь детали работают в условиях граничного трения, испытывая масляное «голодание».

Простота технологии нанесения фторсодержащих полимерных покрытий на поверхность трения деталей позволяет осуществлять эпиламирование в условиях лесозаготовительных предприятий. Сохранение антифрикционного покрытия на поверхностях может быть дополнительно обеспечено за счет присадок, вводимых в смазочное масло.

В настоящее время ужесточаются экологические требования к топливу и смазочным материалам, используемым в сельском хозяйстве и лесном комплексе. В связи с этим ведутся разработки по получению топлива из возобновляемых источников и проводятся работы по замене видов топлива и смазок, полученных из нефтепродуктов, на материалы растительного происхождения, в качестве которых можно использовать химически модифицированное рапсовое, талловое или кукурузное масла и смазки [6, 12].

Применение таллового масла может дополнительно улучшать бактерицидные свойства смазочных составов [12, 25–28].

Для усиления эффекта смазки в системы вводят нанодиспергированные частицы с высокими адгезионными свойствами [18–20, 29, 30].

Учитывая современные тенденции сбережения природы, определенные усилия следует направлять на использование в качестве смазочных ма-

териалов вещества возобновляемого природного происхождения. Так, использование машинного масла для эффективной работы пилорезущего инструмента в лесном хозяйстве неизбежно приводит к излишнему загрязнению почвы нефтепродуктами.

Цель работы

Цель работы — оценка возможности практического применения и трибологических характеристик фторсодержащих эпиламов в составе биомасляной композиции на основе растительных масел.

Материалы и методы

В работе использовали смазочные многофункциональные композиции на основе перфторполипропиленоксида типа продукта с торговой маркой 6СФК-180-05 и экспериментальный трибоконтрат, представляющий собой суспензию фторсодержащего ПАВ в растворителе перфторметилциклогексане. Содержание фторидных ионов составляло 0,003 и 0,005 мг/г полимера соответственно.

В качестве рабочей смазки использовали рапсовое (ГОСТ 31759–2012) и талловое масло (ГОСТ 14845–79).

Для определения противозадирных и противозносных свойств масел и исследования трибологических характеристик смазочных композиций, испытания проводили на четырехшариковой машине трения типа машины Тимкена — Айшингера (рис. 1) по стандартной методике. Фиксировали размерность отпечатка повреждения и коэффициент трения [21, 31].

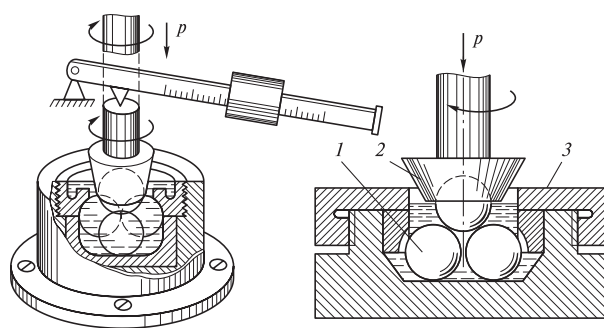


Рис. 1. Установка для исследования трибологических характеристик: 1–3 — узлы трения; p — усилие трения
Fig. 1. Installation for the study of tribological characteristics: 1–3 — friction units; p — friction force

Физико-механические характеристики сырья и материалов определяли по стандартным методикам, изложенным в ГОСТ для соответствующего вида измерений.

Статистическую обработку результатов эксперимента проводили стандартными методами.

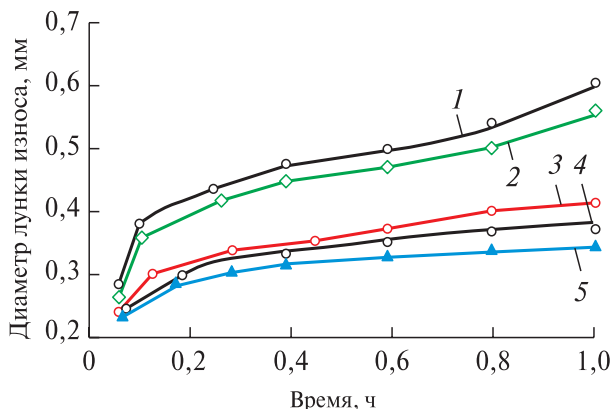


Рис. 2. Кинетические кривые противоизносных свойств масляных композиций: 1 — талловое масло; 2 — неэпиламированное рапсовое масло; 3 — эпилам трибоконцентрат в рапсовом масле; 4 — эпилам 6СФК-180-05 в талловом масле; 5 — эпилам 6СФК-180-05 в рапсовом масле

Fig. 2. Kinetic curves of antiwear properties of oil compositions: 1 — tall oil; 2 — rapeseed oil; 3 — epilam Triboconcentrate in rapeseed oil; 4 — epilam 6SFK-180-05 in tall oil; 5 — epilam 6SFK-180-05 in rapeseed oil

Результаты и обсуждение

Использование растительных масел в качестве компонентов смазочных композиций позволило оценить эффект влияния добавок эпиламов на характер механического износа в режиме механохимического воздействия. Дешевое рапсовое масло широко используется для производства биодизеля, а талловое масло является крупнотоннажным отходом целлюлозно-бумажной промышленности [22–24, 32, 33].

Результаты сравнительных испытаний смазочных свойств композиций, представленные в виде кинетических кривых износа (рис. 2), характеризуют высокие противоизносные свойства масел, модифицированных ПАВ по сравнению с базовым маслом. Как видно из рис. 2, наибольший эффект показала модификация масла эпиламом марки 6СФК-180-05.

Данные рис. 2 позволяют сопоставить эффект эпиламирования, достигаемый путем добавления 3%-го эпилама, для различных типов растительных масел. Как видно, наибольший защитный эффект наблюдается во всех случаях при наличии эпилама, что позволяет в 2–3 раза снизить разрушающий эффект при трении. Влияние эпиламирования при использовании таллового масла дало относительно меньший эффект, по-видимому, вследствие его большей механохимической активности, связанной с химическим составом таллового масла [25, 34, 35].

Влияние концентрации эпилама 6СФК-180-05 в базовом масле на противоизносные свойства смазочной композиции в зависимости от осевой

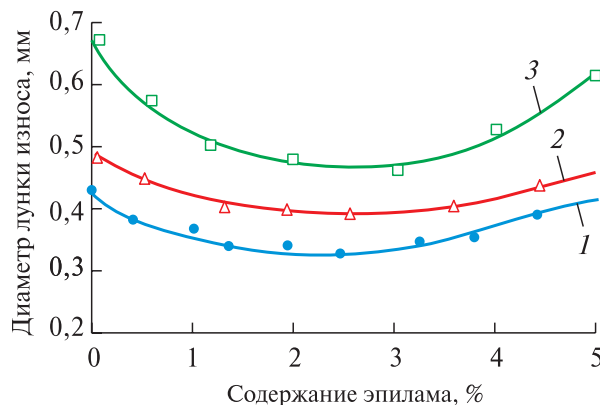


Рис. 3. Влияние концентрации эпилама на противоизносные свойства композиции на основе рапсового масла (эпилам марки 6СФК-180-05); продолжительность испытаний 60 мин: 1 — нагрузка 150 Н; 2 — 250 Н; 3 — 350 Н

Fig. 3. Effect of epilam concentration on the antiwear properties of a composition based on rapeseed oil; epilam brand 6SFK-180-05; test 60 min: 1 — load 150 N; 2 — 250 N; 3 — 350 N

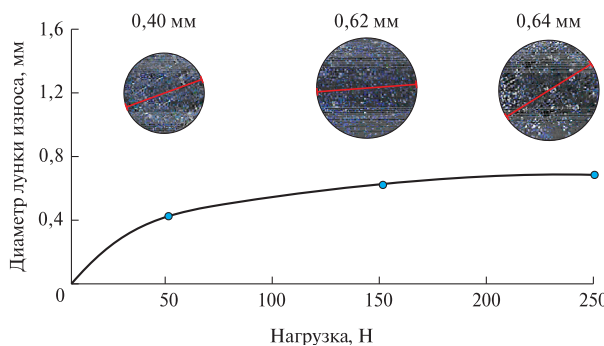


Рис. 4. Зависимость интенсивности износа от нагрузки и пятна износа шариков (эпилам марки 6СФК-180-05); продолжительность испытания 60 мин; концентрация эпилама в композиции 2 %

Fig. 4. Dependence of the wear rate on the load and wear spots of the balls; epilam brand 6SFK-180-05; test duration 60 min; the concentration of epilam in the composition is 2 %

нагрузки на шарики, полученные в испытании на четырех шариковой машине, представлено на рис. 3. Оптимальная концентрация эпилама в смазочной композиции практически не зависит от величины нагрузки и составляет порядка 2–3 %. Снижение концентрации эпилама существенно повлияло на интенсивность износа, особенно при увеличении тестовой нагрузки более 350 Н, что можно, по-видимому, объяснить уменьшением толщины антифрикционной пленки за счет разрушения молекулярного «ворса».

Зависимость интенсивности износа шариков от величины осевой нагрузки от 5 Н до 250 Н для смеси рапсового масла представлена на рис. 4. Интенсивный износ наблюдался в начальном

периоде испытаний при минимальной осевой нагрузке, что связано с высокими удельными нагрузками в пятне точечного контакта шариков, которые вызывают разрушение молекулярного слоя, и трение происходит в условиях «масляного голодания». По мере формирования пятна контакта и увеличения его активной площади уровень удельных нагрузок снижается, что приводит к изменению режима трения из области граничного трения в гидродинамическое. При этих режимах обычно наблюдается монотонное изнашивание фрикционных поверхностей [16, 19].

Наглядным подтверждением этого эффекта являются исследования по определению коэффициента трения и его зависимости от величины нагрузки. Результаты представлены на рис. 5. Коэффициент трения имел максимальное значение на начальном этапе испытаний и по мере увеличения антифрикционной пленки монотонно снижался до некоторого конечного значения.

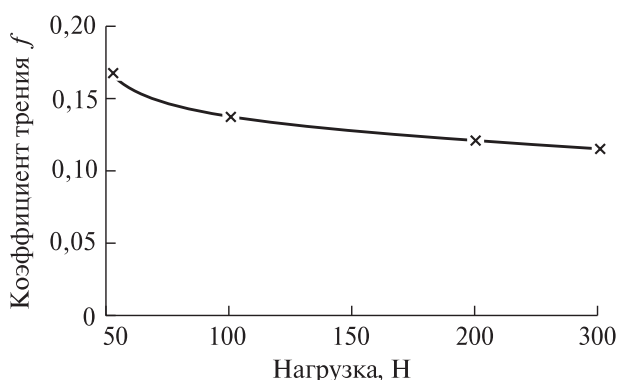


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от нагрузки (условия, см. рис. 4)

Fig. 5. Dependence of the friction coefficient on the load (conditions in Fig. 4)

По данным рис. 5 видно, что в случае эпиламирования смазки на основе рапсового масла значение безразмерного коэффициента трения монотонно снижается более чем в 1,5 раза при увеличении усиливающей нагрузки в 6 раз, что подтверждает целесообразность использования фторсодержащих эпиламов для повышения износостойкости работающих механизмов в условиях механохимических воздействий.

Проведенные испытания показали, что смазочная композиция, содержащая до 5 % эпилама, характеризовалась повышенной вязкостью, которая более чем в 1,3 раза превосходила вязкость исходного масла.

Выводы

На основании проведенных исследований противоизносных свойств масляных композиций на основе рапсового масла, талового масла и фторированных эпиламов, выполненных на четырехша-

риковой машине трения, было установлено, что противоизносные свойства масляной композиции на основе растительного сырья зависят как от свойств эпиламирующего состава, так и от деградирующих величин механических нагрузок, о чем свидетельствуют результаты сравнительных испытаний двух марок эпиламов.

Интенсивность изнашивания фрикционных поверхностей в значительной степени зависит от удельных нагрузок сопрягаемых деталей в зоне контакта трение — скольжение, величина которых определяется условиями работы узлов трения, шероховатостью поверхностей деталей и режимами смазки.

Дополнительным положительным фактором, способствующим применению фторированных эпиламов, позволяющих существенно увеличивать срок службы механических устройств, является наблюдаемое увеличение вязкости смазки, что делает процесс эксплуатации более удобным.

Список литературы

- [1] Choi Y.H., Lee J., Yang J. Development of a service parts recommendation system using clustering and classification of machine learning // *Expert Systems with Applications*, 2022, v. 188, no. 2, p. 116084. doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116084
- [2] Nawrocki W., Stryjski R., Kostrzewski K., Woźniak W., Jachowicz T. Application of the vibro-acoustic signal to evaluate wear in the spindle bearings of machining centres. In-service diagnostics in the automotive industry // *J. of Manufacturing Processes*, 2023, v. 92, no. 4, pp. 165–178. doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.036
- [3] Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир, 1987. 584 с.
- [4] Гаркунов Д.И. Триботехника, конструирование, изготовление и эксплуатация машин. М.: Изд-во МСХА, 2002. 629 с.
- [5] Бутенко В.И. Научные основы нанотрибологии. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. 275 с.
- [6] Абрамузов В.В., Котенко В.Д. Моделирование процесса резания древесных композитов на минеральных вяжущих // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2005. № 6. С. 58–62.
- [7] Taylor R.I., Sherrington I.A. A simplified approach to the prediction of mixed and boundary friction // *Tribology International*, 2022, v. 175, no. 11, 107836. doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107836
- [8] Atzor M., Mallor F., Pozuelo P., Fukagata K., Vinuesa R., Schlatter P. A new perspective on skin-friction contributions in adverse-pressure-gradient turbulent boundary layers // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2023, v. 101, no. 5, 109117. doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109117
- [9] Danusso F., Levi M., Gianotti G., Turri S. Some physical properties of two homologous series of perfluoro-polyoxy-alkylene oligomers // *European Polymer Journal*, 1994, v. 30, no. 5, pp. 647–651. doi.org/10.1016/0014-3057(94)90075-2
- [10] Кононов Г.Н., Угрюмов С.А., Федотов А.А. Химическое взаимодействие древесных частиц со связующим на основе фуранового олигомера в структуре древесно-стружечных плит // *Энциклопедия инженера-химика*, 2014. № 1. С. 24–26.

- [11] Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A. Design of double layer protective coatings: Finite element modeling and machine learning approximations // *Acta Astronautica*, 2023, v. 204, no. 3, pp. 869–877. doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.007
- [12] Марков В.А., Иванкин А.Н., Са Бовэнь, Доронин Д.Ю. Талловое масло как сырье для производства биодизельного топлива // *Двигателестроение*, 2022. Т. 288. № 2. С. 72–83. DOI: 10.18698/jec.2022.2.72-83
- [13] Monaca A., Murray J., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A. Surface integrity in metal machining. Part II: Functional performance // *International J. of Machine Tools and Manufacture*, 2021, v. 164, no. 5, p. 103718. doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718
- [14] Rodrigues S.P., Evaristo M., Carvalho S., Cavaleiro A. Fluorine-carbon doping of WS-based coatings deposited by reactive magnetron sputtering for low friction purposes // *Applied Surface Science*, 2018, v. 445, no. 7, pp. 575–585. doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.113
- [15] Zhang T., Zhang W., Liu H., Wang G., Zhong Y., Zhou M., Zhu Q., Li H. Synthesis and characterization of a novel fluorine-containing triblock copolymer as a potential binder // *European Polymer J.*, 2021, v. 159, no. 10, 110760. doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110760
- [16] Баранов А.В., Вигдорович Е.Н. Эпиламирующие покрытия инструмента // *Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Сер. Приборостроение и информационные технологии*, 2014. № 53. С. 108–115.
- [17] Ищенко С.А., Фисенко П.П., Иншаков С.В., Балабанов В.И. Экономическая эффективность от внедрения эпиламирования куттерных ножей // *Мясная индустрия*, 2014. № 4. С. 44–45.
- [18] Быков В.В., Балабанов В.И., Голубев И.Г., Голубев М.И., Окладников Л.В. Нанотехнологии и наноматериалы в лесном машиностроении и техническом сервисе. М.: Изд-во МГУЛ, 2013. 74 с.
- [19] Yang L., Huang H., Zeng H., Zhao X. Biomimetic chitosan nanoparticles with simultaneous water lubricant and anti-inflammatory // *Carbohydrate Polymers*, 2023, v. 304, no. 3, p. 120503. doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120503
- [20] Zulhanafi P., Syahrullail S., Faizin Z.N. Tribological performance of trimethylolpropane ester bio-lubricant enhanced by graphene oxide nanoparticles and oleic acid as a surfactant // *Tribology International*, 2023, v. 183, no. 5, 108398. doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108398
- [21] Колесников В.И. Лабораторные работы по дисциплине «Физика трения». Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского государственного университета путей сообщения, 2010. 40 с.
- [22] Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д., Горбунова Н.А., Бабурина М.И., Горохов Д.Г. Биотопливо из возобновляемого сырья: перспективы производства и потребления // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2008. № 6. С. 91–95.
- [23] Иванкин А.Н., Болдырев В.С., Жилин Ю.Н., Олиференко Г.Л., Бабурина М.И., Куликовский А.В. МакрокINETическая трансформация природных липидов для получения моторного топлива // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*, 2017. № 5 (74). С. 95–108.
- [24] Yahya M., Dutta A., Bouri E., Wadström C., Uddin C.S. Dependence structure between the international crude oil market and the European markets of biodiesel and rapeseed oil // *Renewable Energy*, 2022, v. 197, no. 9, pp. 594–605. doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.112
- [25] Шаталов К.В., Горюнова А.К., Лихтерова Н.М., Иванкин А.Н., Бабурина М.И., Куликовский А.В. Применение продуктов сульфатцеллюлозного производства в качестве присадок к топливам реактивных двигателей // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2016. Т. 20. № 6. С. 107–115.
- [26] Neklyudov A.D., Fedotov G.N., Ivankin A.N. Intensification of composting processes by aerobic microorganisms // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2008, v. 44, no. 1, pp. 6–18.
- [27] Alkhalaf M.I., Churchill G.C., Mirghani M.E.S. Chemical composition and antioxidant/antibacterial depictions of zahidi date palm (*Phoenix dactylifera*) kernel oil // *J. of King Saud University – Science*, 2023, v. 35, no. 7, 102817. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102817
- [28] Idowu D.O., Aiyelaagbe O.O., Idowu P.A. Chemical composition and biological activities of volatile oil of the stem of *Dombeya buettneri* K. Schum. (Sterculiaceae) // *Scientific African*, 2023, v. 20, e01624. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01624
- [29] Pesetskii S.S., Bogdanovich S.P., Myshkin N.K. Chapter 5 – Tribological behavior of polymer nanocomposites produced by dispersion of nanofillers in molten thermoplastics // *Tribology of Polymeric Nanocomposite. Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*, 2013, pp. 119–162. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59455-6.00005-2
- [30] Slobodyan M., Pesterev E., Markov A. Recent advances and outstanding challenges for implementation of high entropy alloys as structural materials // *Materials Today Communications*, 2023, v. 36, 106422. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106422
- [31] Torres A., Amini C., Cuadrado N., Travieso-Rodriguez J.A., Llumà J., Vilaseca M. Experimental validation of ball burnishing numerical simulation on ball-end milled martensitic stainless-steel considering friction and the initial surface topography // *J. of Materials Research and Technology*, 2023, v. 22, no. 1-2, pp. 3352–3361. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.100
- [32] Del Rio D.D.F., Sovacool B.K., Griffiths S., Bazilian M., Kim J., Foley A.M., Rooney D. Decarbonizing the pulp and paper industry // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, v. 167, no. 10, 112706. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706
- [33] Aro T., Fatehi P. Tall oil production from black liquor: Challenges and opportunities // *Separation and Purification Technology*, 2017, v. 175, no. 3, pp. 469–480. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.027
- [34] Collins A.M. Chapter 4 – Chemical Techniques. *Nanotechnology Cookbook*. N.Y.: Elsevier Science, 2012, pp. 35–204. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097172-8.00004-7
- [35] Hanus M.J., Harris A.T. Nanotechnology innovations for the construction industry // *Progress in Materials Science*, 2013, v. 58, no. 7, pp. 1056–1102. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.04.001

Сведения об авторах

Прошина Ольга Петровна — канд. хим. наук., доцент кафедры общей и специальной химии ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», proshina-olga@inbox.ru

Иванкин Андрей Николаевич [✉] — д-р хим. наук, академик МАН ВШ, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), aivankin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023.

Одобрено после рецензирования 02.10.2023.

Принята к публикации 15.12.2023.

EPILAMIZATION OF MECHANICAL DEVICES TO INCREASE WEAR RESISTANCE UNDER MECHANOCHEMICAL IMPACT

O.P. Proshina¹, A.N. Ivankin² [✉]

¹Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 4, build. 2, Boris Galushkin st., 129366, Moscow, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

aivankin@inbox.ru

The innovative technologies to modify friction surfaces are considered. It is shown that epilamization, as a process of applying a protective multifunctional film on equipment, materials, friction parts and products components, includes the effective use of not only traditional lubricating oils based on petroleum products, but also compositions based on perfluorinated oligomers and oils of vegetable origin. The effect of multifunctional lubricating compositions based on a fluorine-containing polypropylene oxide product of the brand 6SFK-180-05 and experimental epilam Triboconcentrate on the tribological characteristics of the lubrication system based on rapeseed and tall oil has been studied. The effect of epilam concentration, mechanical load and time on the antiwear properties of the vegetable oil composition and the fluorinated additive was studied. It has been shown that oil compositions based on rapeseed oil in the presence of 2–3 % perfluorinated epilam have the highest antiwear properties. The intensity of wear, estimated during testing on a four-ball friction machine with a force load of 50–350 N in the presence of epilaminating compositions, was acceptable for the performance of a mechanical device. The antiwear properties of oil compositions based on vegetable raw materials depended both on the properties of the applied epilamy composition and on the nature of the distribution of mechanical load values during the testing of two brands of epilams. A positive factor in the use of technology for the use of fluorine-containing epilames in lubricating mixtures is an increase in the viscosity of the working composition compared to the original oils. The results obtained are of interest for developing a methodology for the long-term operation of mechanical devices and increasing their wear resistance under mechanochemical impacts.

Keywords: epilamization, epilam, vehicle parts, operational properties, wear resistance, tribological characteristics

Suggested citation: Proshina O.P., Ivankin A.N. *Epilamirovanie mekhanicheskikh ustroystv dlya povysheniya iznosostoykosti v usloviyakh mekhanokhimicheskogo vozdeystviya* [Epilamization of mechanical devices to increase wear resistance under mechanochemical impact]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 1, pp. 130–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-130-138

References

- [1] Choi Y.H., Lee J., Yang J. Development of a service parts recommendation system using clustering and classification of machine learning. *Expert Systems with Applications*, 2022, v. 188, no. 2, p. 116084. doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116084
- [2] Nawrocki W., Stryjski R., Kostrzewski K., Wozniak W., Jachowicz T. Application of the vibro-acoustic signal to evaluate wear in the spindle bearings of machining centres. In-service diagnostics in the automotive industry. *J. of Manufacturing Processes*, 2023, v. 92, no. 4, pp. 165–178. doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.036
- [3] Heinicke G. *Tribochemistry*. Berlin: Akademie-Verlag edition, 1987, 495 p.
- [4] Garkunov D.I. *Tribotekhnika, konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin* [Tribology, design, manufacture and operation of machines]. Moscow: Moscow Academy of Agriculture Publ., 2002, 629 p.
- [5] Butenko V.I. *Nauchnye osnovy nanotribologii* [Scientific foundations of nanotribology]. Taganrog: Taganrog Institute of Technology Publ., 2012, 275 p.
- [6] Abrazumov V.V., Kotenko V.D. *Modelirovaniye protsessa rezaniya drevesnykh kompozitov na mineral'nykh vyazhushchikh* [Modeling the process of cutting wood composites on mineral binders]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2005, no. 6, pp. 58–62.
- [7] Taylor R.I., Sherrington I. A simplified approach to the prediction of mixed and boundary friction. *Tribology International*, 2022, v. 175, no. 11, p. 107836. doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107836

- [8] Atzor M., Mallor F., Pozuelo P., Fukagata K., Vinuesa R., Schlatter P. A new perspective on skin-friction contributions in adverse-pressure-gradient turbulent boundary layers. *International J. of Heat and Fluid Flow*, 2023, v. 101, no. 5, p. 109117. doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109117
- [9] Danusso F., Levi M., Gianotti G., Turri S. Some physical properties of two homologous series of perfluoro-polyoxyalkylene oligomers. *European Polymer J.*, 1994, v. 30, no. 5, pp. 647–651. doi.org/10.1016/0014-3057(94)90075-2
- [10] Kononov G.N., Ugryumov S.A., Fedotov A.A. *Khimicheskoe vzaimodeystvie drevesnykh chastits so svyazuyushchim na osnovе furanovogo oligomera v strukture drevesno-struzhechnykh plit* [Chemical interaction of wood particles with a binder based on a furan oligomer in the structure of chipboards]. *Encyclopedia of Chemical Engineer*, 2014, no. 1, pp. 24–26.
- [11] Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A. Design of double layer protective coatings: Finite element modeling and machine learning approximations. *Acta Astronautica*, 2023, v. 204, no. 3, pp. 869–877. doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.007
- [12] Markov V.A., Ivankin A.N., Sa Boven', Doronin D.Yu. *Tallovое maslo kak syr'e dlya proizvodstva biodizel'nogo topliva* [Tall oil as a raw material for the production of biodiesel]. *Dvigatelistroyeniye*, 2022, v. 288, no. 2, pp. 72–83. DOI: 10.18698/jec.2022.2.72-83
- [13] Monaca A., Murray J., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A. Surface integrity in metal machining. Part II: Functional performance. *International J. of Machine Tools and Manufacture*, 2021, v. 164, no. 5, p. 103718. doi.org/10.1016/j.ijmactools.2021.103718
- [14] Rodrigues S.P., Evaristo M., Carvalho S., Cavaleiro A. Fluorine-carbon doping of WS-based coatings deposited by reactive magnetron sputtering for low friction purposes. *Applied Surface Science*, 2018, v. 445, no. 7, pp. 575–585. doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.113
- [15] Zhang T., Zhang W., Liu H., Wang G., Zhong Y., Zhou M., Zhu Q., Li H. Synthesis and characterization of a novel fluorine-containing triblock copolymer as a potential binder. *European Polymer J.*, 2021, v. 159, no. 10, 110760. doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110760
- [16] Baranov A.V., Vigdorovich E.N. *Epilamiruyushchie pokrytiya instrumenta* [Epilamizing tool coatings]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroeniya i informatiki. Ser. Priborostroenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics. Ser. Instrument making and information technologies], 2014, no. 53, pp. 108–115.
- [17] Ishchenko S.A., Fisenko P.P., Inshakov S.V., Balabanov V.I. *Ekonomicheskaya effektivnost' ot vnedreniya epilamirovaniya kutternykh nozhey* [Economic efficiency from the introduction of epilamination of cutter knives]. *Myasnaya industriya* [Meat Industry], 2014, no. 4, pp. 44–45.
- [18] Bykov V.V., Balabanov V.I., Golubev I.G., Golubev M.I., Okladnikov L.V. *Nanotekhnologii i nanomaterialy v lesnom mashinostroenii i tekhnicheskoy servise* [Nanotechnologies and nanomaterials in forest engineering and technical service]. Moscow: MSFU, 2013, 74 p.
- [19] Yang L., Huang H., Zeng H., Zhao X. Biomimetic chitosan nanoparticles with simultaneous water lubricant and anti-inflammatory. *Carbohydrate Polymers*, 2023, v. 304, no. 3, p. 120503. doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120503
- [20] Zulhanafi P., Syahrullail S., Faizin Z.N. Tribological performance of trimethylolpropane ester bio-lubricant enhanced by graphene oxide nanoparticles and oleic acid as a surfactant. *Tribology International*, 2023, v. 183, no. 5, p. 108398. doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108398
- [21] Kolesnikov V.I. *Laboratornyye raboty po distsipline «Fizika treniya»* [Laboratory work on the discipline «Physics of Friction»]. Rostov-on-Don: Rostov State University of Communications Publ., 2010, 40 p.
- [22] Ivankin A.N., Neklyudov A.D., Gorbunova N.A., Baburina M.I., Gorokhov D.G. *Bioplivo iz vozobnovlyаемого syr'ya: perspektivy proizvodstva i potrebleniya* [Biofuels from renewable raw materials: prospects for production and consumption]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2008, no. 6, pp. 91–95.
- [23] Ivankin A.N., Boldyrev V.S., Zhilin Yu.N., Oliferenko G.L., Baburina M.I., Kulikovskiy A.V. *Makrokineticheskaya transformatsiya prirodnykh lipidov dlya polucheniya motornogo topliva* [Macrokinetic transformation of natural lipids for obtaining motor fuel]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya Estestvennye nauki* [Bulletin of the N.E. Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural Sciences], 2017, no. 5 (74), pp. 95–108.
- [24] Yahya M., Dutta A., Bouri E., Wadström C., Uddin C.S. Dependence structure between the international crude oil market and the European markets of biodiesel and rapeseed oil. *Renewable Energy*, 2022, v. 197, no. 9, pp. 594–605. doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.112
- [25] Shatalov K.V., Goryunova A.K., Likhterova N.M., Ivankin A.N., Baburina M.I., Kulikovskiy A.V. *Primenenie produktov sul'fatsellyuloznogo proizvodstva v kachestve prisadok k toplivam reaktivnykh dvigateley* [The use of cellulose sulphate products as additives for jet fuels]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2016, v. 20, no. 6, pp. 107–115.
- [26] Neklyudov A.D., Fedotov G.N., Ivankin A.N. Intensification of composting processes by aerobic microorganisms. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2008, v. 44, no. 1, pp. 6–18.
- [27] Alkhalaf M.I., Churchill G.C., Mirghani M.E.S. Chemical composition and antioxidant/antibacterial depictions of zahidi date palm (*Phoenix dactylifera*) kernel oil. *J. of King Saud University – Science*, 2023, v. 35, no. 7, 102817. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102817
- [28] Idowu D.O., Aiyelaagbe O.O., Idowu P.A. Chemical composition and biological activities of volatile oil of the stem of *Dombeya buettneri* K. Schum. (Sterculiaceae). *Scientific African*, 2023, v. 20, e01624. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01624
- [29] Pesetskii S.S., Bogdanovich S.P., Myshkin N.K. Chapter 5 – Tribological behavior of polymer nanocomposites produced by dispersion of nanofillers in molten thermoplastics. *Tribology of Polymeric Nanocomposite. Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*, 2013, pp. 119–162. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59455-6.00005-2
- [30] Slobodyan M., Pesterev E., Markov A. Recent advances and outstanding challenges for implementation of high entropy alloys as structural materials. *Materials Today Communications*, 2023, v. 36, 106422. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106422
- [31] Torres A., Amini C., Cuadrado N., Travieso-Rodríguez J.A., Llumà J., Vilaseca M. Experimental validation of ball burnishing numerical simulation on ball-end milled martensitic stainless-steel considering friction and the initial surface topography. *J. of Materials Research and Technology*, 2023, v. 22, no. 1-2, pp. 3352–3361. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.100

- [32] Del Rio D.D.F., Sovacool B.K., Griffiths S., Bazilian M., Kim J., Foley A.M., Rooney D. Decarbonizing the pulp and paper industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, v. 167, no. 10, 112706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706>
- [33] Aro T., Fatehi P. Tall oil production from black liquor: Challenges and opportunities. *Separation and Purification Technology*, 2017, v. 175, no. 3, pp. 469–480. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.027>
- [34] Collins A.M. Chapter 4 – Chemical Techniques. *Nanotechnology Cookbook*. N.Y.: Elsevier Science, 2012, pp. 35–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097172-8.00004-7>
- [35] Hanus M.J., Harris A.T. Nanotechnology innovations for the construction industry. *Progress in Materials Science*, 2013, v. 58, no. 7, pp. 1056–1102. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.04.001>

Authors' information

Proshina Ol'ga Petrovna — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of General and Special Chemistry, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, proshina-olga@inbox.ru

Ivankin Andrey Nikolaevich ✉ — Dr. Sci. (Chem.), Member of The International Higher Education Academy Of Sciences (IHEAS), Professor of the Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Mytishchi branch), aivankin@inbox.ru

Received 17.04.2023.

Approved after review 02.10.2023.

Accepted for publication 15.12.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest