DOI: 10.18411/vntr2024-175-2

УДК621.891

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ДОБАВОК НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПАР ТРЕНИЯ «СТАЛЬ-МЕДНЫЙ СПЛАВ»

[1] Лидия Ивановна Куксенова[1], Екатерина Михайловна Кулешова[2], Сергей Андреевич Поляков[2,1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

lkukc@mail.ru, kuleshova.em@mail.ru, serpol50z@rambler.ru

***Аннотация**: Описан механизм формирования износостойкости материалов пар трения «сталь-медный сплав» при использовании наномодифицированных смазочных сред на основе результатов триботехнических испытаний на машине трения АЕ-5 по схеме (диск-три пальца). Показана взаимосвязь между ростом эффективной пристеночной вязкости пленки и ростом концентрации мицелл, возникающем в результате роста нагрузки на сопряжение. Показано, что процесс пленкообразования позволяет расширить область допустимых контактных давлений для сопряжений скольжения сталь-медный сплав.*

***Ключевые слова:** сопряжение скольжения, наномодифицированные смазочные материалы, пленкообразование, износостойкость, червячные передачи.*

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF NANOMODIFIED ADDITIVES ON THE WEAR RESISTANCE OF MATERIALS OF FRICTION PAIRS "STEEL-COPPER ALLOY"

L.I. Kuksenova[1], E.M. Kuleshova[2], S.A. Polyakov[2]

[1]Federal State Budgetary Scientific Institution A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[2]N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru, kuleshova.em@mail.ru, serpol50z@rambler.ru

***Abstract.** The mechanism of wear resistance formation of materials of friction pairs "steel-copper alloy" using nanomodified lubricating media is described based on the results of tribological tests on the friction machine AE-5 according to the scheme (disk-three fingers). The relationship between the growth of the effective near-wall viscosity of the film and the growth of the concentration of micelles, which occurs as a result of the growth of the load on the conjugation, is shown. It is shown that the process of film formation allows to expand the range of permissible contact pressures for sliding conjugations steel-copper alloy.*

***Keywords:** sliding coupling, nanomodified lubricants, film formation, wear resistance, worm gears.*

Введение. Как показывает анализ литературных данных, одной из главных причин выхода из строя различных сопряжений скольжения является разрушение поверхностного слоя (изнашивание). Существуют различные подходы для повышения износостойкости материалов пар трения. Традиционные методы, такие как повышение твердости деталей, усовершенствование технологии изготовления и др., являются весьма дорогостоящими, и не дают значимого эффекта. В то же время, как показывает ряд исследований, смазочные материалы (СМ), в состав которых входят добавки солей жирных кислот, являются весьма эффективными для повышения КПД и нагрузочной способности некоторых тяжелонагруженных сопряжений скольжения [1, 2]. Расширение ассортимента конструкций, конструкционных материалов и способов обработки поверхности трения требует проведение трибологических испытаний и исследований, направленных на выбор состава добавок к смазочному материалу. При этом опыт триботехнических испытаний показывает, что взаимодействие солей жирных кислот с наноразмерными частицами (использование наномодифицированных добавок) может стать перспективным направлением в области повышения работоспособности различных пар трения [3]. Средством обоснования эффективности предлагаемых составов смазочных материалов служат результаты исследования механизма формирования износостойкости материалов сопряжений скольжения при использования подобных добавок к СМ. Это направление работ особо актуально для решения задачи повышения триботехнической эффективности материалов червячных передач.

Червячные передачи широко используются в машиностроении благодаря своей компактности, высокой кинематической точности, бесшумности и плавности работы, а также возможности получения самотормозящей передачи, позволяющей выполнить механизм без тормозного устройства, препятствующего обратному вращению колеса. Червячные передачи используются в тяжелонагруженных ответственных механизмах, например, таких как лифты и эскалаторы. Основной причиной выхода из строя большинства изделий машиностроения является изнашивание. Изнашивание зубьев червячного колеса происходит в связи с тем, что вектор скорости скольжения и касательная линии контакта на отдельных участках контактирования колеса с червяком составляют угол в несколько градусов, что неблагоприятно для формирования смазочной пленки, и способствует развитию процесса изнашивания [4].

Целью данной работы является анализ влияния наномодифицированных добавок к смазочному материалу на работоспособность сопряжений скольжения сталь-медный сплав для разработки рекомендаций по повышению срока службы червячных передач, что позволит расширить параметрические границы их применения за счет сформированной на поверхности трения вторичной пленки со структурой, обеспечивающей существенное улучшение динамических и адаптационных свойств червячной передачи.

Материалы и методики исследования. Для оценки влияния наномодифицированных добавок на различные параметры сопряжений скольжения были проведены триботехнические испытания на машине трения АЕ–5 по схеме диск – три пальца (диск – сталь, пальцы – латунь). Эта машина часто используется для исследования свойств антифрикционных материалов и сочетаний конструкционных и смазочных материалов, характерных для смазываемых опор скольжения. Испытания заключались в проведении приработки в режиме “на грани заедания” по ГОСТ 23.215–84 и проводились при использовании чистого индустриального масла, того же масла с добавкой нанодисперсной

суспензии серпентина (СС) и нанодисперсной суспензии серпентина с добавлением солей жирных кислот (СС + СЖК) (добавка «Стрибойл») [4]. Наномодифицированные смазочные материалы на основе нанодисперсной суспензии серпентина, в состав которой входят наноразмерные частицы (с размерами 50 –100 нм) были разработаны с использованием солей жирных кислот мягких металлов, образующих периферию мицелл с ядрами из наночастиц. Образующуюся на поверхностях трения пленку исследовали методами профилографирования по ГОСТ 23. 224-86, рентгеноструктурного анализа по методике [5] и стандартного микрозондового анализа.

Результаты и их обсуждение. Полученная зависимость коэффициента трения от контактного давления по результатам испытаний индустриального масла с нанодисперсной минеральной добавкой и солями жирных кислот приведена на рис. 1.

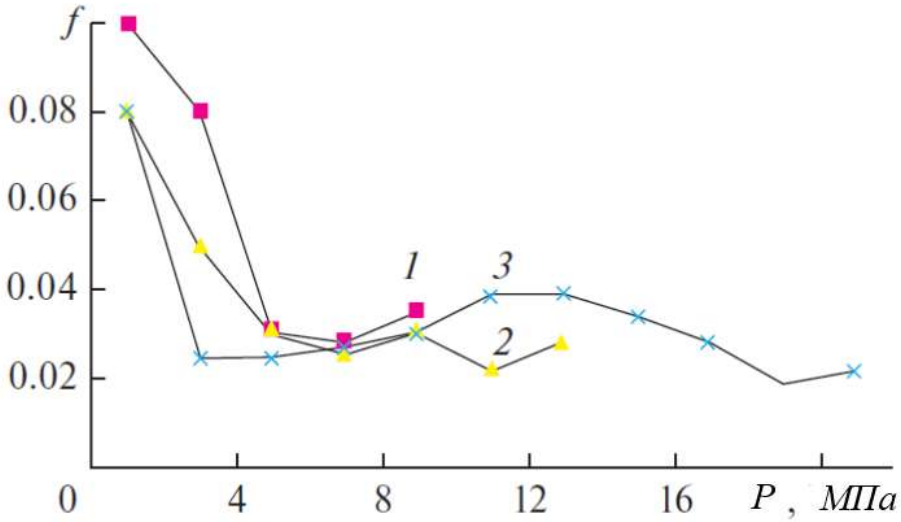


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от контактного давления при использовании различных СМ: №1 – И20А; №2 – И20+СС; №3 – И20А + СС + СЖК

Можно видеть, что на зависимостях коэффициента трения от контактного давления появляется так называемый “второй” минимум коэффициента трения. Этот минимум не соответствует минимуму коэффициента трения на диаграмме Герси-Штрибека, физический смысл которого состоит в переходе от гидродинамического режима смазывания к смешанному. Получаемый минимум является “вторым” по отношению к диаграмме Герси-Штрибека, т.к. он целиком находится в области граничной смазки. Необходимым условием для появления “второго минимума” является наличие наномодифицированных добавок в смазочном материале. В результате профилографирования была обнаружена интересная закономерность: происходило не уменьшение размера изнашиваемой детали, как это всегда наблюдается при испытаниях на износ, а наоборот – наращивание материала, то есть пленкообразование, рис.2.

Из рис. 2 видна цветовая разница поверхностей, указывающая на образование пленки на поверхности трения, что также подтверждается данными профилографирования стального образца, испытанного в среде с наномодифицированной добавкой, рис. 3.



а *б*

Рис.2. Микрофотография поверхности трения стального образца после трения, в смазочных материалах: *а* - чистого индустриального масла; *б* - индустриального масла с наномодифицированной добавкой.

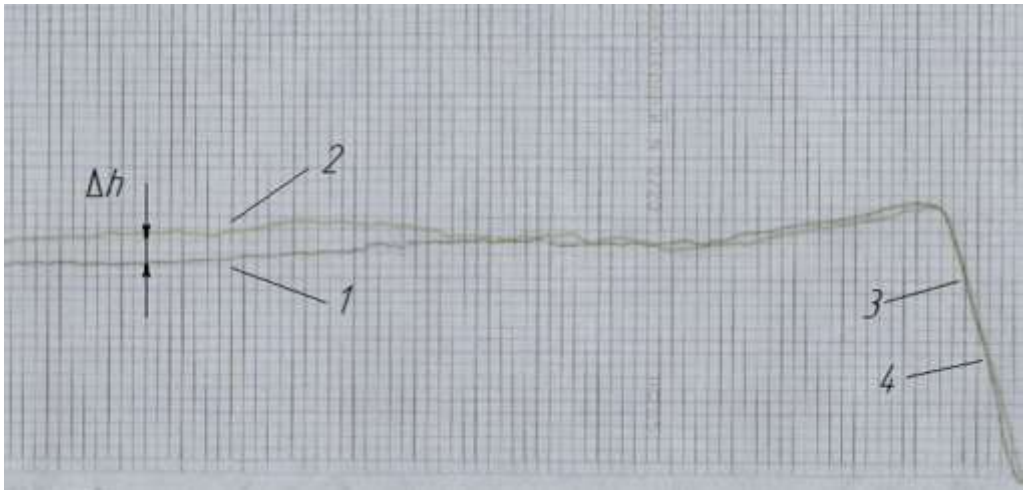


Рис. 3. Профилограммы поверхности стального образца: 1 — поверхность после проведения испытаний при давлении 5 МПа, 2 — поверхность после проведения испытаний при давлении 8,3 МПа, 3, 4 — метки на свободных от трения поверхностях образца, обеспечивающие воспроизводимость трассы профилографирования, Δ*h* – разница высот профиля до и после изнашивания (толщина изношенного слоя).

Анализ проводимости образующейся пленки, осуществленный с помощью сканирующего туннельного микроскопа, выявил высокую степень выглаживания поверхности трения. Кроме того, микрозондовый анализ химического состава приповерхностных слоев энерго-дисперсионным методом на электронном сканирующем микроскопе Genesis XM 4 System 30, укомплектованным Si детектором с ультратонким окном, показал, что в приповерхностных слоях латуни произошли существенные изменения состава, хорошо коррелирующие с данными рентгеноструктурного анализа [5] и данными, отраженными в [6]. Наиболее существенные изменения состоят в том, что легирующие элементы, содержащиеся в латуни, - цинк и алюминий, уходят из поверхностных слоев, что рентгеноструктурно выражается в заметном уменьшении периода решетки. Судя по тому, что плотность дислокаций по данным рентгеноструктурного анализа в приповерхностных слоях также уменьшается [5], в этих слоях происходит избирательное растворение и соответствующая ему релаксация

напряжений. Существенным изменением состава является также появление в приповерхностных слоях углерода и кислорода в достаточно больших количествах (до 12% углерода и до 3% кислорода – массовые проценты в пленке толщиной до 1 мкм). Заметим, что перед проведением микрозондового анализа образцы промывались бензином и ацетоном, что исключает возможность сохранения на поверхности адсорбированных молекул смазочного материала.

Таким образом, значительная доля в составе пленки принадлежит металлическим компонентам, которые являются продуктами избирательного растворения и, частично, изнашивания металлических материалов, входящих в поверхностный деформированный слой. Важно отметить, что в составе пленки появляется кремний, как основная составляющая часть наночастиц серпентина, образующих тиксотропную структуру пленки. Кроме того, значительная доля углерода и кислорода в пленке подтверждает высказанную ранее гипотезу о возможности полимеризации продуктов деструкции смазочного материала под воздействием солей жирных кислот и практически полностью перешедшего в смазочный материал алюминия. Отметим также, что аналогичные по составу деталей и смазочных материалов эксперименты проводились при возвратно – поступательном движении образцов на машине трения МТ-8 по методике ГОСТ 23. 224-86, где также профилографически фиксировалась остаточная пленка значительной толщины (от 100 нм и более, рис.3), которая существенно усиливает приработочные эффекты и несущую способность поверхности [7].

Есть основания полагать, что твердые наноразмерные частицы, содержащиеся в присадке к маслу, в процессе механического взаимодействия с поверхностями трения, повышают свою химическую активность (механохимический эффект), которая увеличивается по мере роста нагрузки на сопряжение. Рост химической активности наночастиц приводит к их взаимодействию с жирными кислотами, содержащимися в добавке, и поверхностями трения (т.е. к образованию мицелл). В процессе роста нагрузки и уменьшения зазора между этими поверхностями увеличивается концентрация мицелл в зазоре и интенсивность их взаимодействия с поверхностями трения. В результате данный коллоидный раствор формирует пленку, а интенсивность ее формирования будет увеличиваться по мере механоактивации наночастиц, т.е. с ростом нагрузки. Кроме того, увеличение концентрации мицелл в зазоре будет приводить к росту эффективной пристеночной вязкости, которую можно оценить по известным зависимостям.

Введение в дисперсионную среду с вязкостью η_0 твердых частиц дисперсной фазы (малой концентрации, т.е. в отсутствие их взаимодействия между собой) приводит за счет сил трения при сдвиге к дополнительному вращательному движению частиц и, следовательно, к диссипации энергии, в результате чего вязкость дисперсной системы η возрастает пропорционально объемной доле дисперсной фазы φ [6]

$$\eta = \eta_0(1 + k\varphi),$$

где η – вязкость дисперсной системы, η_0 – вязкость чистой дисперсионной среды; k – фактор формы частиц (для сферических 2,5), φ – объемная концентрация дисперсной фазы. Таким образом, в отсутствие взаимодействия частиц дисперсная система является ньютоновской жидкостью, но с повышенной по сравнению с дисперсионной средой вязкостью [6].

Очевидно, что рост эффективной пристеночной вязкости пленки приводит к росту толщины смазочной пленки. Таким образом, с ростом толщины смазочной пленки должно происходить снижение интенсивности изнашивания, аналогично снижению коэффициента трения как это происходит при гидродинамическом режиме смазки [8].

На рис. 4. показано перестроенное в виде диаграммы Герси – Штрибека изменение коэффициента трения при использовании упомянутых ранее СМ по результатам проведенных испытаний [9].

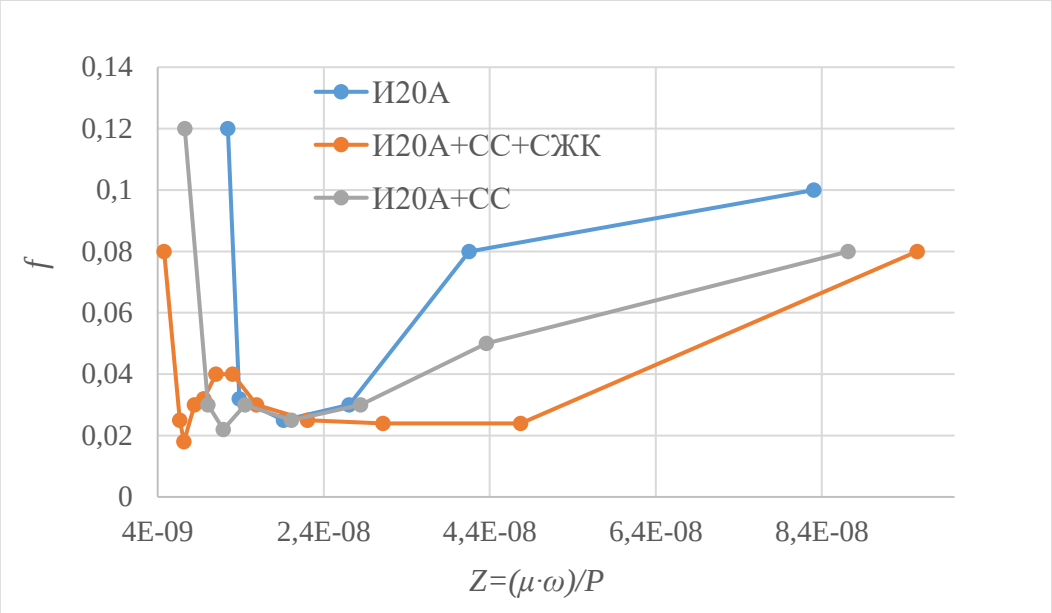


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от условной толщины смазочного слоя (Z, выраженный в условных единицах толщины) при использовании различных СМ: №1 – И20А; №2 – И20+СС; №3 – И20А + СС + СЖК

Из рис. 4. видно, что если для СМ №1 получается классическая форма диаграммы Герси – Штрибека, то добавление нанодисперсного компонента, особенно для СМ №3, четко формирует второй минимум коэффициента трения, который целиком находится в области граничной смазки. Для иллюстрации действия наномодифицированных смазочных материалов проводились испытания некоторых из них по описанной выше методике. Результаты испытаний на прирабатываемость по методике ГОСТ 23. 224-86 показаны в таблице 1.

Как показывают результаты испытаний, оптимизация режима приработки и подбор состава смазочного материала позволяют существенно повысить несущую способность рассматриваемого сопряжения. Прирост нагрузочной способности отражается показателем П (табл. 1), который представляет собой соотношение $(P_{мп} – P_{мн})/P_{мп}$, где $P_{мп}$ – максимальная нагрузка приработки по методики ГОСТ 23.224-86, $P_{мн}$ – максимальная нагрузка неприработанного сопряжения. Введение наномодифицированной добавки к основному смазочному материалу (И20А), существенно увеличивает значение П, - практически в два раза. При этом, за счет введения дополнительного показателя - скорости роста нагрузочной способности - оказывается возможным ранжировать действие смазочных материалов различного состава (в испытаниях добавлен еще вариант И20+СС+Ш, где Ш – шунгит).

Таблица 1

Рост несущей способности сопряжений торцевого типа в паре латунь - сталь45 при смазывании маслами И20+СС+СЖК, И20А+СС+Ш, И20А+СС, И20А.

Состав смазочного материала	Максимальная нагрузка не-приработанного сопряжения $P_{мн}$, МПа	Максимальная нагрузка приработанного сопряжения $P_{мп}$, МПа	Показатель прирабатываемости П	Показатель скорости роста нагрузочной способности, $P_{мп}/b$, МПа·с$^{-1}$
И20+СС+СЖК	10	30	0,66	0,15
И20А+СС+Ш	10	30	0,66	0,0625
И20А+СС	8	14	0,42	0,062
И20А	6	9	0,33	0,05

Высказанные выше представления о составе и структуре пленки позволяют заключить, что достигнутые высокие показатели несущей способности и антифрикционности объясняются особыми механическими свойствами пленки как коллоидной системы, склонной к легкому формоизменению под действием тангенциальных напряжений. Это свойство способствует выглаживанию поверхности трения и снижению сопротивления скольжению, а значит повышенной прирабатываемости, то есть адаптацией к действию нагрузки. Важно, что для подобных тиксотропных вязкопластических сред (типа Бингама [6]) это происходит без нарушения сплошности, то есть без разрушения, а размеры пленки поддерживаются за счет механизма регенерации, описанного в работе [9].

Полученные результаты испытаний показали не только снижение коэффициента трения, но и повышение износостойкости материалов сопряжения, что дает оценка интенсивности изнашивания, проведенная для пар в среде чистого индустриального масла И20-А и того же масла с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот – (И20+СС+СЖК). В таблице 2 показаны ее значения при нагрузке 6 МПа, также в таблице приведены значения вязкости СМ и эффективной пристеночной вязкости пленки, рассчитанные по выше приведенной формуле.

Таблица 2

Показатели износостойкости тяжелонагруженных сопряжений скольжения, а также значения вязкости для различных смазочных композиций

Состав смазочного материала	Интенсивность изнашивания J	Вязкость масла μ (Па·с)	Эффективная пристеночная вязкость пленки $\mu_э$ (Па·с)
И20А	$6{,}9\cdot10^{-9}$	0,026	0,026
И20А + СС + СЖК.	$1{,}29\cdot10^{-11}$	0,026	0,06

При применении масла с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот объемная концентрация частиц в пристеночном слое значительно увеличивается за счет того, что большая доля частиц оседает на поверхности. Толщина смазочной пленки, в рассматриваемом случае составляет 0,1 мкм, а диаметр нанодисперсных частиц составляет 0,05 мкм, таким образом объемная концентрация частиц в пристеночном слое составляет не менее 50%.
Из таблицы 2 можно увидеть, что с увеличением эффективной пристеночной вязкости пленки происходит снижение интенсивности изнашивания на два порядка, что согласуется с вышеизложенными заключениями.

Выводы

1. Показано, что применение смазочных материалов, в состав которых входят соли жирных кислот и наноразмерные частицы, обеспечивает высокую эффективность в повышении триботехнических свойств сопряжений скольжения. Механизм повышения износостойкости материалов пары трения сталь - медный сплав при применении наномодифицированных СМ заключается в повышении эффективной пристеночной вязкости в результате роста концентрации мицелл в пристеночном слое за счет роста нагрузки на сопряжение и уменьшения зазора между трущимися поверхностями.
2. При использовании наномодифицированного смазочного материала на поверхности трения образуется остаточная пленка толщиной не менее 100 нм. Вторичная остаточная пленка обладает гетерогенной структурой с включением наночастиц и особыми вязкопластическими свойствами, что позволяет добиться высокой антифрикционности в условиях, когда формирование гидродинамической пленки невозможно. Процесс пленкообразования при применении наномодифицированных смазочных материалов позволяет расширить область допустимых контактных давлений для сопряжений скольжения сталь - медный сплав.

Список литературы

1. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплакирущие смазочные материалы / В кн.: Долговечность трущихся деталей машин; под общ. ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1988. – Вып. 3. – С. 96-143.
2. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н, Третьяков Д.В. Влияние металлоплакирующих добавок к пластичным смазкам на работоспособность трибосопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – №1 – С.54-66.
3. Поляков С.А., Куксенова Л.И., Кулешова Е.М. Особенности формирования несущей способности сопряжений скольжения при использовании наномодифицированных смазочных материалов // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, №6. – С. 712-719.
4. Кулешова Е.М. Повышение износостойкости червячных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала. Автореф. Диссертации на соиск.уч.степени канд.техн.наук. - М.: БГТУ, 2024. - 23.с.
5. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
6. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. - М.: Высшая школа, 2006. - 444 с.
7. Кулешова Е.М. Определение зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки по результатам триботехнических испытаний при использовании пленкообразующих

смазочных материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 3. – С. 116–121.

8. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
9. Поляков С.А., Кулешова Е.М., Куксенова Л.И. Повышение несущей способности конструкционных материалов для опор скольжения формированием свойств их поверхностей с помощью пленкообразующих смазочных материалов // В сборнике: Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКом - 2018). Научные труды 4-ой Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. – 2018. – С. 219-221.

Дата поступления: 22 ноября 2024 г.