



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук**

Межведомственный научный совет по трибологии

Ассоциация Инженеров-Трибологов России

при информационной поддержке журналов

*«Трение и износ», «Проблемы машиностроения и надежности машин»,
«Сборка в машиностроении, приборостроении»*

ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ

XIII Международная научно-техническая конференция

Сборник трудов конференции

*Proceedings of XIII International scientific conference
“Tribology for Mechanical Engineering”*

**14-16 октября 2020 года
Москва**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук**

Межведомственный научный совет по трибологии

Ассоциация Инженеров-Трибологов России

при информационной поддержке журналов

*«Трение и износ», «Проблемы машиностроения и надежности машин»,
«Сборка в машиностроении, приборостроении»*

ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ

XIII Международная научно-техническая конференция

Сборник трудов конференции

*Proceedings of XIII International scientific conference
“Tribology for Mechanical Engineering”*

Москва, 14 - 16 октября 2020 года

УДК 531.43/.46(063)

ББК 34.413.1я431

Т 67

Редакционная коллегия: Буяновский И.А., Прожега М.В., Рециков Е.О., Самусенко В.Д., Стрельникова С.С., Цуканов И.Ю.

Т 67 Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – 376 с.

ISBN 978-5-904282-10-3

В сборнике приведены результаты новых исследований в областях как теоретической, так и прикладной трибологии, которые выполнены в 2019-2020 гг. отечественными и зарубежными специалистами, которые были представлены в качестве докладов на XIII международной научно-технической конференции «Трибология-машиностроению 2020».

Приведённые исследования посвящены развитию фундаментальных основ трибологии и совершенствованию методов трибологических испытаний, а также изучению механизма смазочного действия, разработке новых высокоэффективных смазочных материалов и методов повышения эффективности противоизносного и антифрикционного действия существующих смазочных материалов – жидких, пластичных и твёрдых. А также созданию новых высокоэффективных триботехнических материалов и покрытий, включая разработку методов оптимизации этих материалов и изучение механизма их действия. Значительный интерес также представляет группа докладов, в которых приведены результаты исследования работоспособности ответственных узлов трения различных конструкций (зубчатых передач, подшипников качения и скольжения, уплотнений, плунжерных пар, механических демпферов и т.д.), функционирующих при самых различных условиях – от космических агрегатов до буровых скважин. Некоторые доклады посвящены трибологическим проблемам обработки различных материалов и методам их оптимизации – в частности за счёт применения новых высокоэффективных технологических жидкостей.

Сборник рассчитан на научных работников и специалистов, конструкторов и технологов, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией машин, оборудования и приборов. Доклады в сборнике размещены в алфавитном порядке фамилий первого из авторов.

ББК 34.413.1я431
УДК531.43/.46(063)

Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

ISBN 978-5-904282-10-3

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

- [4] Holste C. Cyclic plasticity of nickel, from single crystals to submicrocrystalline polycrystals / C. Holste // Philosophical Magazine. – 2004. – Vol. 84, № 3-5. – P. 299-315.
- [5] Moser B. Cyclic strain hardening of nanocrystalline nickel / B. Moser, T. Hanlon, K.S. Kumar // Scri. Mater. – 2006. – V. 54, № 6. – P. 1151-1155.
- [6] Структурно-масштабные уровни деформации поверхностного слоя никеля / С.В. Короткевич, В.В. Свиридова // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 2. – С. 1-6.
- [7] Multiscaling of Lattice Curvature on Friction Surfaces of Metallic Materials as a Basis of Their Wear Mechanism / V.E. Panin, V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich, S.V. Panin // Physical Mesomechanics. – Vol. 20, № 1. – 2017. – P. 69-77.

- [8] Ландау Л.Д. Теоретическая физика в десяти томах. Т. 1 Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука. – 1988. – 215 с.
- [9] Пинчук, В.Г. Кинетика микроструктуры и селективный механизм разрушения поверхностного слоя металла при трении / В.Г. Пинчук, И.А. Буяновский, С.В. Короткевич // Материаловедение. – 2015. – № 3. – С. 36-43.
- [10] Пинчук В.Г. Влияние физико-химической природы среды закалки и режимов трения на структуру и кинетику упрочнения и разрушения поверхностного слоя никеля / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич, Е.А. Ковалёв // Материаловедение. – 2018. – № 2. – С. 8-12.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ

¹Костылев А.Г., ¹Голубев А.П., ¹Смирнов Г.В., ¹Тишечкин А.В.

*E-mail: apgolubev@mail.ru

¹Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Россия.

В данной статье рассматриваются вопросы контроля качества модификации поверхностных слоев лопаток газотурбинных двигателей. Установлены основные параметры контроля качества. Рассмотрены методы определения толщины покрытия, шероховатости модифицированной поверхности и распределение легирующих элементов по толщине поверхностного слоя.

Ключевые слова: *качество, модификация, поверхностный слой, ионно-плазменное имплантирование.*

Современный уровень развития машиностроения и ряда других отраслей отечественной промышленности обусловлен применением различных технологий, позволяющих защитить поверхностные слои деталей от агрессивного воздействия внешней среды и от повышенных нагрузок на различные части изделий [1-6]. Данный эффект достигается за счет изменения структуры материала на молекулярном и атомном уровне.

Несмотря на интенсивное развитие технологии получения полимерных материалов и материалов на

QUALITY CONTROL OF MODIFICATION OF SURFACE LAYERS OF PARTS

Kostylev A.G., Golubev A.P., Smirnov G.V. Tishechkin A.V.

This article discusses the issues of quality control of modification of surface layers of gas turbine engine blades. The main quality control parameters are set. Methods for determining the thickness of the coating, the roughness of the modified surface and the distribution of alloying elements over the thickness of the surface layer are considered.

Keywords: *quality, modification, surface layer, ion-plasma implantation.*

неметаллической основе большой практический интерес продолжают вызывать металлы. Многие отрасли машиностроения по-прежнему используют для изготовления ответственных и особо нагруженных деталей традиционные металлы и сплавы.

Это обусловлено теми уникальными свойствами, которые присуще только материалам на металлической основе. Однако, с интенсивным развитием машиностроительного производства, традиционные материалы становятся неспособны удовлетворить предъявляемым прочностным

требованиям. Одним из основных сдерживающих факторов применения металлических материалов является их высокая плотность и, как следствие, значительный удельный вес конечного изделия.

Существенным толчком в дальнейшем развитии применения материалов на металлической основе, соответствующих предъявляемым перспективным нормам, стал переход от обычных металлов и сплавов к материалам со сложной кристаллической структурой, обладающих высокой величиной межатомных связей.

Одним из представителей таких материалов являются интерметаллиды — химические соединения, состоящие из двух или нескольких металлов. Эти соединения в основном характеризуются металлическим типом химической связи, присущей чистым металлам. Интерметаллидные соединения обладают комплексом уникальных физико-механических свойств: низкой плотностью; высокой износостойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью [1]. Единственным недостатком, ограничивающим применение этих материалов, является их хрупкость.

Очевидно, что воздействие всей совокупности негативных факторов в первую очередь сказывается на поверхностных слоях самой конструкции и ее элементов. Это обуславливает особое внимание специалистов к нахождению, исследованию и применению новых перспективных способов упрочнения поверхностного слоя деталей.

Реальные условия эксплуатации основных конструктивных элементов изделий ракетно-космической техники характеризуются экстремально тяжелыми режимами работы. Это обуславливает повышенные требования к таким параметрам как жаропрочность, жаростойкость, коррозионная стойкость и т.п. Увеличение показателей данных параметров следует проводить при условии сохранения низкой плотности основного материала. Это позволяет сохранить минимальный удельный вес отдельных деталей и всей конструкции в целом. Одним из перспективных решений этих задач является поверхностное упрочнение деталей и нанесение на них защитных покрытий.

Одним из наиболее эффективных современных методов обработки поверхностных слоев изделий, применяемых в ответственной машиностроении, является метод поверхностного легирования путем имплантации ионов [1].

Так как любой метод обработки материала подразумевает изменение поверхностного слоя детали, существуют различные способы повышения качественных характеристик физико-механических свойств поверхностей в зависимости от назначения той или иной детали. Наряду с широко используемыми методами механического упрочнения поверхностного слоя деталей (дробеструйная обработка, наклепывание, чеканка, обкатывание, иглофрезерование и пр.) часто прибегают к химико-термическим способам обработки. Например, для создания микротвердости и повышения предела выносливости используется азотирование и цементирование, для повышения жаропрочности и коррозионной стойкости — алитирование и борирование, и т.д. Однако, в последнее время все более широкое применение получают плазменные, магнетронные и ионные методы нанесения покрытий.

В настоящее время проводятся широкомасштабные исследовательские и практические работы, связанные с модификацией поверхностного слоя изделий из интерметаллидных сплавов путем воздействия низкотемпературной плазмы. Данный способ обработки приводит к появлению ионно-имплантированных слоев в приповерхностной части обрабатываемого изделия. Низкотемпературная плазменная обработка поверхностных слоев относится к технологии имплантационной металлургии и является весьма перспективным методом повышения показателей качества изделий [1].

Так как любой метод обработки материала подразумевает изменение поверхностного слоя детали, существуют различные способы повышения качественных характеристик физико-механических свойств поверхностей в зависимости от назначения той или иной детали. Наряду с широко используемыми методами механического упрочнения поверхностного слоя деталей (дробеструйная обработка, наклепывание, чеканка, обкатывание, иглофрезерование и пр.) часто прибегают к химико-термическим способам обработки. Например, для создания микротвердости и повышения предела выносливости используется азотирование и цементирование, для повышения жаропрочности и коррозионной стойкости — алитирование и борирование, и т.д. Однако, в последнее время все более широкое применение получают плазменные, магнетронные и ионные методы нанесения покрытий.

В настоящее время проводятся широкомасштабные исследовательские и

практические работы, связанные с модификацией поверхностного слоя изделий из интерметаллидных сплавов путем воздействия низкотемпературной плазмы. Данный способ обработки приводит к появлению ионно-имплантированных слоев в приповерхностной части обрабатываемого изделия. Низкотемпературная плазменная обработка поверхностных слоев относится к технологии имплантационной металлургии и является весьма перспективным методом повышения показателей качества изделий [1].

На сегодняшний день существует большое количество методов, которые позволяют упрочнить поверхностный слой изделия [7-9]. Все эти методы условно разделяются на две группы: с изменением структуры поверхностного слоя без изменения его химического состава и с изменением структуры поверхностного слоя с одновременным изменением его химического состава.

В первом случае упрочнение достигается методом поверхностного пластического деформирования или поверхностной закалкой. Во втором — путем применения технологии химико-термической обработки и нанесения поверхностных защитных слоев.

Необходимо учитывать, что при применении технологии химико-термической обработки изменяется адгезионная прочность, что не всегда играет положительную роль. Именно поэтому технологами разрабатываются методы, позволяющие изменить структуру материала. Одним из таких методов является технология ионно-плазменного имплантирования [1,8].

Ее суть заключается в том, что легирующие элементы попадают в основной материал не путем сплавления или диффузионного взаимодействия, а проникают в кристаллическую решетку основного материала. Это позволяет полностью изменить структуру, физико-механические и физико-химические свойства поверхностных слоев и в конечном итоге получить материал с уникальными свойствами.

Одной из актуальных задач при применении современных технологических процессов является контроль качества проведения модификации поверхностных слоев лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) с целью повышения их износостойкости и эксплуатационных свойств.

Руководствуясь имеющимися теоретическими сведениями о процессе ионно-плазменного имплантирования и требованиями, предъявляемыми к поверхностным слоям рабочих лопаток ГТД,

установлены основные параметры контроля качества модификации поверхностей:

- толщина покрытия;
- шероховатость модифицированной поверхности;
- распределение легирующих элементов по толщине поверхностного слоя.

Методы определения толщины модифицированного поверхностного слоя рабочих лопаток ГТД обобщены и разделены на две группы: разрушающие методы контроля (гравиметрический, аналитический, профилометрический, кулонометрический, капельный) и неразрушающие методы (вихревоотоковые, радиационные, оптические). Выбор метода контроля покрытия во многом зависит от толщины подвергаемого обработке слоя и основного материала, используемого при изготовлении изделий.

Гравиметрический метод, или как его еще называют, весовой метод, основан на определении массы покрытия путем взвешивания детали до и после нанесения покрытия на аналитических весах, или до и после растворения основного материала или покрытия. Данный метод в основном применяют для определения толщины однослойных покрытий с известной плотностью. Относительная погрешность метода составляет 10 %.

Аналитический метод контроля основан на определении массы снятого покрытия в растворе. Данный метод осуществляется путем ряда обязательных операций, например механических испытаний, анализа химического состава, изменения температуры и т.д. Этот метод применяют для определения толщины однослойных металлических покрытий, площадь поверхности которых измерима. Относительная погрешность метода равна 10 %.

Профилометрический метод представляет собой измерение металлографическим микроскопом размера отступа полученного в процессе растворения участка покрытия. Этот метод применим только для покрытий имеющих один слой. Относительная погрешность метода 10 %.

Кулонометрическим методом определяется количество электричества, которое необходимо для анодного растворения покрытия на определенном участке под действием постоянного тока. Анодное растворение представляет собой электрическую обработку металлов, основанную на способности их растворения в результате оксидных реакций проходящих в среде электролита и под действием на него постоянного электрического тока. Толщину измеряют с помощью кулонометрических толщиномеров различных конструкций. Кулонометрический метод применим для

однослойных и многослойных покрытий. Относительная погрешность метода 10 %.

Капельный метод обусловлен растворением покрытия соответствующим раствором, наносимым на поверхностный слой каплями. Суть данного метода заключается в выдерживании раствора в течении определенного промежутка времени, затем его удаление и нанесение вновь до полного растворения поверхности. Этот метод аналогично предыдущим применим для однослойных и многослойных покрытий. Относительная погрешность метода 30 %.

Метод вихревых токов применяется для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов, контроля размеров и параметров вибрации, обнаружения электропроводящих объектов и других задач. Метод вихревых токов на сегодняшний день считается наиболее достоверным. Он основан на взаимодействии электромагнитного поля преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, которые наводятся преобразователем на деталь и зависят от электрофизических параметров проверяемого материала и модифицированного слоя. Вихретоковый контроль толщины покрытия проводится с помощью дефектоскопа, который позволяет определить толщину защитного покрытия, глубину поверхностных трещин и т.д. Относительная погрешность метода составляет 5 %.

Радиационные методы контроля основаны на анализе ионизирующего излучения контролируемого изделия после взаимодействия с источником ионизации. Основными направлениями радиационного метода принято считать рентгено- и гамма-дефектоскопию. Различие между ними заключается в источниках, используемых для ионизации. Однако, ввиду одинаковых целей испытания, они имеют общую технологию и методику проведения контроля.

Наиболее используемым видом радиационного контроля является рентгенофлуоресцентный метод. Его суть состоит в анализе рентгеновского излучения, возбужденного с помощью радиоизотопного источника. Этот метод используется для контроля параметров поверхностного слоя металла при нанесении как неметаллических, так и металлических покрытий. Рентгенофлуоресцентные анализаторы (РФА спектрометры) – приборы для определения концентрации химических элементов в монолитных и многослойных образцах методом рентгеновской флуоресценции. Относительная погрешность метода ± 10 %.

Оптический метод контроля основан на визуальном осмотре изделия с помощью оптических средств или невооруженным взглядом, а также на анализе взаимодействия объекта контроля с оптическим излучением. Этот метод применим для изделий с коэффициентом отражения не менее 0,3. При его использовании можно выявить следующие дефекты: расслоения, трещины, пустоты, изменение структуры материала и его физико-химических свойств. Относительная погрешность метода 5 %.

Таким образом, проводя анализ представленных выше методов определения толщины легированного слоя, можно сделать вывод, что наиболее применимым является метод вихревых токов. Погрешность данного метода принимает минимальное значение, что позволяет осуществить наиболее достоверный контроль качества выполненной работы.

Контроль распределения ионов легирующего вещества может быть осуществлен с помощью одного из самых эффективных способов качественной идентификации веществ в поверхностных слоях рабочих лопаток ГТД - масс-спектральным анализом [7].

Шероховатость модифицированных поверхностей измеряется различными методами, предусматривающими применение специальных инструментов. Для рабочих лопаток ГТД, например, целесообразнее применять профилограф с алмазной иглой радиусом 2 мм и цифровым преобразователем.

[1] А.В. Колубаев, А.В. Белый, И.А. Буяновский, Е.А. Колубаев, В.А. Кукапенко, О.В. Сизова, М.М. Хрущев. Структура и механизмы деформирования и разрушения твердых покрытий в условиях фрикционного взаимодействия. Известия высших учебных заведений. Физика. Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск) 2019, Т.62, №8, С. 52-83.

[2] Голубев А.П., Корнеев А.А. Исследование возможности формирования многофункциональных покрытий газодинамическим способом. Информационно-технологический вестник. 2017. № 4 (14). С. 191-199.

[3] Голубев А.П., Корнеев А.А. Разработка и применение перспективных методов инженерии поверхностей деталей машин с использованием информационных технологий. Сборник научных трудов 3-й межвузовской научно-технической конференции с международным участием «Эволюционные процессы информационных технологий». Научград Королев, ООО "Научный консультант", Москва, 2018, С. 104-108.

[4] Голубев А.П., Мащнев Н.П., Прокопенко А.К. Формирование поверхностных слоев деталей с улучшенными характеристиками. Сборник научных статей VIII Международной научно-технической конференции. «Инновации и перспективы сервиса». Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО "Уфимская государственная академия экономики и сервиса". 2011. С. 268-271.

[5] Голубев А.П., Прокопенко А.К., Беляев В.И. Теоретические основы повышения ресурса оборудования и режущего

инструмента предприятий легкой промышленности плакирующими нанотехнологиями. Москва, 2014, 97 с.

[6] Корнеев А.А., Прокопенко А.К., Голубев А.П., Терешкин С.А. Финишная антифрикционная обработка деталей узлов трения машин. Москва, 2015, 98 с.

[7] Смирнов Г.В., Курочкина А.Р., Евсеева А.Н. Новые технологии повышения качества поверхностных слоев деталей — Сборник трудов XVIII Ежегодной научной конференции студентов Технологического университета «Ресурсам области — эффективное использование», Королев, 2018, С 154-158.

[8] Костылев А.Г., Смирнов Г.В., Курочкина А.Р. // Ионно-плазменное имплантирование, как метод создания интерметаллидов — Сборник трудов конференции XII Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению - 2018», Москва, 2018, С 250-252.

[9] Т.Ю. Степанова. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин — Учебное пособие Иванова, 2009, 64 с.

АНТИФРИКЦИОННОСТЬ И САМОСМАЗЫВАЕМОСТЬ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРОВ

Краснов А.П. *, Буяев Д.И., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Наумкин А.В.,
Соловьева В.А., Любимова А.С., Шарикова Н.О.

*E-mail: krasnov@ineos.ac.ru

ФГБУН Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской Академии Наук,
Москва, Россия.

Работа посвящена современному представлению об «антифрикционности» и «самосмазываемости». Проведено изучение процесса трения наполненных полимерных систем на основе твердой смазки (гексагональный нитрид бора h-BN) и термостойких термопластов.

Ключевые слова: трение, антифрикционность, самосмазываемость, термопласты, нитрид бора

ANTI-FRICTIONALITY AND SELF-LUBRICATION HEAT RESISTANT POLYMERS
Krasnov A.P., Buyaev D.I., Shaposhnikova V.V., Salazkin S.N., Naumkin A.V., Soloveva V.A., Lyubimova A.S., Sharikova N.O.

The work is devoted to modern approaches to the concept of the terms "anti-frictionality" and "self-lubrication" and to the study of the friction process of filled polymer systems based on solid lubricants (hexagonal boron nitride h-BN) and heat-resistant thermoplastics.

Keywords: friction, anti-frictionality, self-lubrication, thermoplastic, boron nitride

Введение

Согласно теории профессора Крагельского И.В. основным свойством антифрикционной пары трения (при этом рассматриваются пары трения и взаимодействия её со смазкой) является обеспечение положительного градиента механических свойств по глубине фрикционных связей) в сочетании с упругим деформированием, приводящим к минимальной работе объемного деформирования, а при пластическом деформировании — способности к многократному передоформированию, не приводящему к охрупчиванию материала. [1]

В работе М.М. Хрущова [2] антифрикционности в условиях трения при граничной смазке соответствуют следующие свойства материала подшипника, которые:

- обеспечивают более низкую температуру на поверхности трения, предохраняющую граничный смазочный слой от разрушения.

- способствуют образованию более прочного пограничного слоя смазки, который обеспечивает быстрое восстановление граничного смазочного слоя в тех местах, где он почему-либо был разрушен.

- после местного разрушения граничного смазочного слоя и при местном трении без смазки

ИНВАРИАНТЫ В ТРИБОЛОГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ Короткевич С.В., Буяновский И.А.	131
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ Костылев А.Г., Голубев А.П., Смирнов Г.В., Тишечкин А.В.	135
АНТИФРИКЦИОННОСТЬ И САМОСМАЗЫВАЕМОСТЬ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРОВ Краснов А.П., Буяев Д.И., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Наумкин А.В., Соловьева В.А., Любимова А.С., Шарикова Н.О.	139
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ШТАМПА В ФУНКЦИОНАЛЬНО- ГРАДИЕНТНЫЙ СЛОЙ С МОНОТОННО ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МОДУЛЕМ ЮНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАКОНА ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ Кренив Л.И., Айзикович С.М.	143
МЕТОДИКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СПЕЧЕННОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ В ДИСКОВОМ ТОРМОЗЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ ИНЕРЦИОННОМ СТЕНДЕ Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.	147
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОРМОЗНЫХ ЛЕНТ ДЛЯ ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН Кулаков О.И.	151
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛУБРИКАЦИИ В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО-РЕЛЬС» Лужнов Ю.М., Романова А.Т., Гусева А.И., Бабан С.М.	156
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК Любинин И.А.	161
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ Марков Д.П.	165
ПРОТИВОИЗНОСНАЯ ПРИСАДКА К ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВАМ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ Матвеева А.И., Антонов С.А., Бартко Р.В., Погуляйко В.А., Данилов А.М.	171
ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР ПАРЫ ТРЕНИЯ «КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД - ТОКОСЪЁМНЫЕ ВСТАВКИ» В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ Мельник М.А.	175
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ СОСТАВА МЕДЬ-ЦИНК Москвитин Г.В., Архипов В.Е., Пугачев М.С.	179
ТРЕНИЕ И СМАЗКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ Мышкин Н.К., Григорьев А.Я., Кончиц В.В.	183
ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ 4-Н-АЛКИЛОКСИКОРИЧНЫХ КИСЛОТ С ПРОИЗВОДНЫМИ ПИРИДИНА Новиков В.В., Сырбу С.А., Федоров М.С.	187
ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СПЛЮЩИВАНИИ СФЕРИЧЕСКИХ НЕРОВНОСТЕЙ Огар П.М., Угрюмова Е.В.	190

ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДИДОДЕКАНТИОЛАТА ЖЕЛЕЗА НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ДОБАВОК Павелко Г.Ф.	197
ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ ПРОФИЛИРОВАННОГО РОЛИКА С УЧЁТОМ ОДИНОЧНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ Пановко М.Я.	200
ОСОБЕННОСТИ СМАЗОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИСАДОК В ПРИСУТСТВИИ ЧАСТИЦ АБРАЗИВА В ЖИДКОМ СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ Парфенов А.С., Березин И.В., Годлевский В.А.	206
ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА И ТРЕНИЯ В ТИТАНЕ Пахомов М.А., Горлов Д.С., Столяров В.В.	210
О ПЕРСПЕКТИВАХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ И СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНЫХ МАШИН Побегайло П.А., Гадолина И.В., Густов Ю.И.	214
ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Подрабинник П.А., Миронов А.Е., Гершман И.С., Кузнецова Е.В.	219
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И РЕСУРС ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ Поляков С.А., Кулешова Е.М., Куксенова Л.И., Медовщиков А.В.	225
АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭВОЛЬВЕНТНОМ ЗУБЧАТОМ ЗАЦЕПЛЕНИИ И ОЦЕНКА ЕГО ВЛИЯНИЯ НА РЕСУРС ПЕРЕДАЧИ Поляков С.А., Медовщиков А.В., Куксенова Л.И., Кулешова Е.М.	228
КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН Ромашко А.М., До С.Т.	232
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОГИДРОДИНАМИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ АНТИФРИКЦИОННОГО СЛОЯ Рыбкин Н.Н., Зернин М.В., Матюхин А.В.	237
ТОНКИЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ СО СТРУКТУРОЙ ta-C И ИХ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ Самусенко В.Д., Завидовский И.А., Стрелецкий О.А., Буяновский И.А., Хрущов М.М., Щербаков Ю.И.	243
ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ МИНЕРАЛОВ Сказочкин А.В.	248
СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИТОВ Al-Fe-Sn Скоренцев А.Л., Русин Н.М., Коваль И.С.	253
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СПЕКАНИЯ И ГОРЯЧЕЙ ДОПРЕССОВКИ НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ (Al-9Si)-Sn Скоренцев А.Л., Русин Н.М., Хорошилова Н.И.	259

Трибологические исследования углеродных материалов уплотнений при криогенных температурах Смирнов Н.И., Прожега М.В., Смирнов Н.Н., Петров А.В., Черненко Д.Н.	264
Перспективы применения высокооборотных уэЛН для добычи нефти Смирнов Н.И., Скворцова Е.С.	267
Расчет кинетики роста / изнашивания твердо-смазочной пленки Солдатенков И.А.	272
Малослойные графеновые фрагменты и их азотсодержащие аналоги в качестве нанокремниевых присадок для смазочных материалов Столбов Д.Н., Смирнова А.И., Парфенов А.С., Березина Е.В., Максимов С.В., Савилов С.В., Усольцева Н.В.	276
Тенденции развития методов трибологических исследований Стрельникова С.С.	281
Структурные особенности и трибологическое поведение кремниевых покрытий, полученных реактивным магнетронным распылением в смеси $Ar-C_2H_2-N_2$ Суляндзига Д.А., Хрущов М.М., Авдюхина В.М., Левин И.С., Кашуркин Е.В.	286
Лабораторные триботехнические испытания твердосмазочных покрытий Сутягин О.В., Тихомиров В.А., Рачишкин А.А.	290
Имитационное моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей Тихомиров В.П., Измеров М.А.	295
Задача о контакте вязкоупругих тел при наличии слоя вязкой смазки Усов П.П.	301
К идеальному термодинамическому циклу трения на контакте качения колеса Федоров С.В.	306
Исследование влияния ундецилата меди на трибологические свойства очищенного отработанного масла Федосов С.В., Терентьев В.В., Маркелов А.В., Осадчий Ю.П., Соколов А.В.	312
Применение бемита в триботехнике Федотов А.В., Гвоздев А.А., Дунаев А.В.	315
Влияние концентрации нанокластеров диоксида кремния на особенности протекания процессов формирования/разрушения поверхностных структур при трении в среде вазелинового масла Фоминов Е.В., Шучев К.Г.	320
Использование в технике свободного движения тел Фридберг А.М.	324
Продольные колебания и крип в контакте колесо-рельс Фридберг А.М.	329
Механизм фреттинг-коррозии деталей из сплава с эффектом памяти формы Хасьянова Д.У.	333

ТЕРМОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ СЕЛЕНИДНЫХ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ НОРМАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ Хопин П.Н.	337
ОЦЕНКА АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПОСЛЕ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ Цуканов И.Ю., Муравьева Т.И., Шкалей И.В.	341
ДИАГНОСТИКА ДИССИПАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМПФЕРОВ ТРЕНИЯ Чернышёв С.Л., Колесников В.И., Вермель В.Д., Озябкин А.Л., Колесников И.В., Корякин А.Н.	346
МЕТАЛЛОПЛАКИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ В ЖИДКИХ СРЕДАХ Шаповалов В.В., Мигаль Ю.Ф., Озябкин А.Л., Буракова М.А., Фейзова В.А., Корниенко Р.А.	351
ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ Шолом А.В., Абрамов А.Н., Шолом В.Ю., Тюленев Д.Г.	355
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОРАСТВОРИМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА РВ-18, СОДЕРЖАЩЕГО ФРАКТАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ, С ДОБАВКАМИ НАНОКЛАСТЕРОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ Шульга Г.И., Колесниченко А.О., Скринников Е.В., Шульга Т.Г.	360
ОБОБЩЕНИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ В ПОДВИЖНЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСПОРЯЖЕНИЯХ Шустер Л.Ш., Емаев И.И.	365

Подписано в печать 09.11.2020 г.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.-печ. л. – 43,7. Тираж – 25 экз. Заказ №172.
Отпечатано в ИМАШ РАН.
119334 г. Москва, ул. Бардина, 4