

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

*Посвящается 70-летию
со дня рождения
ответственного редактора сборника,
доктора технических наук,
профессора
Владимира Васильевича Измайлова*

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 12

Рецензируемое издание

Тверь 2019

УДК 621.891
ББК 22.37:34.41:31.264-04(082)

Рецензенты: зав. кафедрой общей физики ТвГУ, доктор хим. наук, профессор Орлов Ю.Д.; доцент кафедры общей физики ТвГУ кандидат физ.-мат. наук Новоселов А.Р.

Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 12. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. 112 с.

Включены статьи теоретического и прикладного характера, посвященные широкому кругу вопросов, касающихся физических, химических, механических процессов на поверхности и в контакте твердых тел, а также деталей технологических и энергетических машин и оборудования. Представлены работы, в которых рассматриваются способы повышения качества и надежности фрикционных узлов, физические аспекты процессов трения и изнашивания, триботехническое материаловедение, моделирование процессов трения и изнашивания.

Предназначен для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, студентов.

Подготовлен на кафедре прикладной физики Тверского государственного технического университета.

Электронная версия сборника размещена в сети Интернет:
<http://physics.tstu.tver.ru/sbornik>

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук профессор А.Н. Болотов;
доктор техн. наук профессор Г.Б. Бурдо;
академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор И.Г. Горячева;
доктор техн. наук профессор В.В. Измайлов (отв. редактор);
доктор техн. наук профессор В.В. Мешков;
канд. техн. наук доцент В.В. Новиков;
канд. техн. наук доцент М.В. Новоселова (отв. секретарь).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Тематика сборника отражает основные направления научных исследований сотрудников Тверского государственного технического университета, других образовательных и научных организаций в области механики и физики контактного взаимодействия деталей машин, трибологии, триботехники, триботехнического материаловедения, других смежных дисциплин.

Сборник включает широкий спектр статей фундаментального и прикладного плана, тематика которых отражает сложную и многостороннюю природу процессов контактного взаимодействия, трения и изнашивания. Аналитический подход к решению трибологических проблем сочетается в публикуемых статьях с применением моделирования процессов контактирования, а также с описанием результатов экспериментальных исследований процессов трения, изнашивания и контактного взаимодействия. В ряде статей рассмотрены конструкторские и технологические методы повышения надежности и эффективности трибологических систем, методики фрикционных испытаний и соответствующее испытательное оборудование.

Статьи в сборнике размещены в порядке их поступления в редакцию.

Материалы сборника отражаются в информационных базах научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и входят в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Публикуемые материалы предназначены для научных работников и специалистов в области проектирования и эксплуатации современного машиностроительного, энергетического, транспортного оборудования, а также для докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов машиностроительных, энергетических и приборостроительных специальностей.

УДК 531.43+621.03

В.В. Измайлов

Тверской государственной технической университет

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ:
ИЗ XX ВЕКА В ВЕК XXI
(История одного сборника научных трудов)**

Рассматривается развитие теоретических и прикладных аспектов контактного взаимодействия деталей машин, трения, изнашивания и других смежных вопросов в публикациях межвузовского сборника научных трудов, который издается Тверским государственным техническим университетом на протяжении 45 лет. Приводятся некоторые наукометрические показатели издания, а также другие сведения об издании, характеризующие его тематическую направленность и географию участников.

Ключевые слова: трибология, публикации, наукометрия.

**MECHANICS AND PHYSICS OF CONTACT INTERACTION:
FROM XX CENTURY INTO CENTURY XXI
(The history of a collection of scientific papers)**

The evolution of theoretical and applied aspects of contact interaction of machine parts, friction, wear and other related questions in the collected papers published by the Tver State Technical University over a time of 45 years has been considered. Some scientometric publication indices are presented as well as other information describing the subject area of published works and participants geography.

Key words: tribology, published works, scientometrics.

Сорок пять лет назад вышел в свет первый выпуск межвузовского сборника научных статей, подготовленный на кафедре физики Калининского политехнического института (ныне Тверской государственной технической университет). Сборник назывался «Надежность и долговечность деталей машин» с подзаголовком «Механика и физика контактного взаимодействия», конкретизирующим его тематику в соответствии с основным направлением научных исследований кафедры. С тех пор сборник выходит ежегодно без перерывов на протяжении 45 лет. Менялись названия и объем выпусков, изменился состав редакционной коллегии, название кафедры (сейчас это кафедра прикладной физики) и вуза, неизменной оставалась основная тематика статей: теоретические и прикладные аспекты процессов в контакте твердых тел и деталей машин, в том числе трение, изнашивание, контактная проводимость и другие смежные вопросы.

Разумеется, 45 лет – не юбилей, но возраст достаточно солидный. Для человека это возраст творческой зрелости, когда накоплен житейский и профессиональный опыт и можно подвести некоторые итоги. В то же время есть еще силы и желание ставить новые цели и задачи и стремиться к новым рубежам. Подведем некоторые итоги, достигнутые за прошедшие с момента издания первого выпуска сборника годы.

Названия. Пусть читателя не удивляет тот факт, что данный выпуск сборника числится под номером 12. Именно 12 лет он выходит под названием, указанным сейчас на обложке. До этого названия сборника, как уже отмечалось, неоднократно менялись. Название первого выпуска (1974 год) приведено выше. Сборник имел два раздела: «Расчет контактного взаимодействия» и «Экспериментальные исследования контактного взаимодействия, трения и изнашивания».

С 1975-го по 1981 год сборник выходил под названием «Механика и физика контактного взаимодействия», затем название многократно менялось, иногда повторяясь спустя несколько лет. С 1998-го по 2003 год сборник выходил под названием «Механика и физика фрикционного контакта», в 2004 году он назывался «Механика и физика фрикционного контакта и граничных слоев», с 2005-го по 2007 год – «Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин». С 2008 года сборник выходит под нынешним названием, в этом году это уже 12-й выпуск.

Авторы. В числе авторов сборника, безусловно, преобладают сотрудники Тверского государственного технического университета (Калининского, затем Тверского политехнического института). Но поскольку сборник имеет статус межвузовского, в нем публиковались ученые из многих других вузов, академических и отраслевых научно-исследовательских организаций и представители производства. Среди авторов – многие известные авторитетные ученые в области трибологии и смежных областей знания из бывшего СССР и нынешней Российской Федерации, а также представители ближнего и дальнего зарубежья. В их числе С.Б. Айнбиндер, В.Ф. Безъязычный, В.Я. Берент, Э.Д. Браун, М. Браунович, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, Ю.Н. Васильев, И.С. Гершман, О.А. Горленко, И.Г. Горячева, В.В. Гриб, Д.Г. Громаковский, Н.Б. Демкин, Ю.А. Евдокимов, И.В. Крагельский, В.И. Максак, Р.М. Матвеевский, М.М. Матлин, М.Ш. Мигранов, Н.М. Михин, Н.К. Мышкин, Е.А. Памфилов, Э.В. Рыжов, Я.А. Рудзит, А.П. Семенов, А.Г. Суслов, А.В. Чичинадзе, Л.Ш. Шустер и др.

География. География авторов сборника охватывает территорию всех нынешних федеральных округов, за исключением Дальневосточного федерального округа, а также территории бывших союзных республик СССР (нынешнее ближнее зарубежье): Беларусь, Латвия, Украина. Распределение авторов по нынешним федеральным округам иллюстрируется рис. 1. В число авторов из Центрального федерального округа не включены авторы – сотрудники ТвГТУ.

Авторы публикаций в сборнике представляют ведущие вузы, академические и отраслевые научно-исследовательские организации, а также фирмы – производители технической продукции. Наиболее широко представлены университеты. Среди них Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Братский государственный

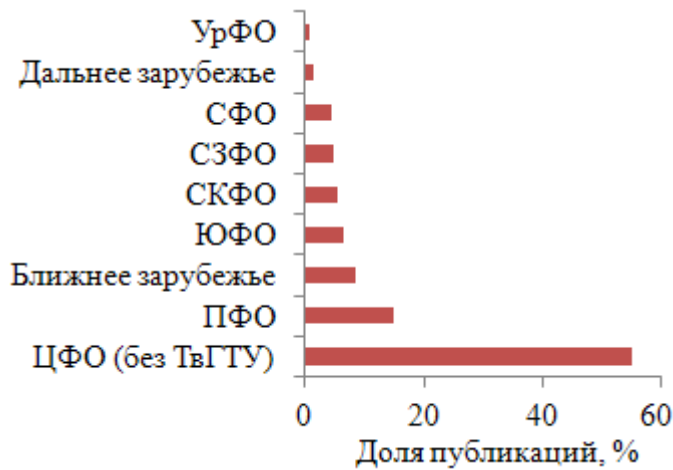


Рис. 1. Распределение авторов публикаций по федеральным округам

ни П.А. Соловьева, Самарский государственный технический университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Северо-Кавказский федеральный университет, Тульский государственный университет, Уфимский государственный авиационный технический университет. Из академических институтов следует отметить Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук; из отраслевых научно-производственных организаций – АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», АО «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», ООО «Нефтегазгеофизика».

Тематика статей. Тематика статей, опубликованных в сборнике за 45 лет, достаточно широка: от трибологических аспектов проектирования и эксплуатации космической техники до повышения надежности торфодобывающего и льноуборочного оборудования [1, 2]; от физики поверхности и нанотопографии до трибологических проблем токосъема на высокоскоростном железнодорожном электротранспорте [3, 4]; от создания и эксплуатации магнитных узлов трения до трения грунтов и сыпучих материалов [5, 6].

С достаточной долей условности тематику статей, опубликованных в сборнике в различные годы, можно разделить на направления:

1. Поверхность твердых тел и поверхностные явления (в том числе микро- и нанотопография технических поверхностей).
2. Контактное взаимодействие твердых тел и деталей машин.
3. Трение.
4. Изнашивание.
5. Смазка и смазочные материалы, в том числе магнитные.
6. Материаловедение, физико-механические свойства материалов.

университет, Брянский государственный технический университет, Волгоградский государственный технический университет, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Рыбинский государственный авиационный технический университет име-

7. Магнитные материалы в узлах трения.
8. Электрические контакты.
9. Контактный теплообмен.
10. Герметичность контактных соединений.
11. Проектирование, изготовление и эксплуатация технических систем.

Распределение публикаций по указанным выше направлениям в различные годы иллюстрируется рис. 2.

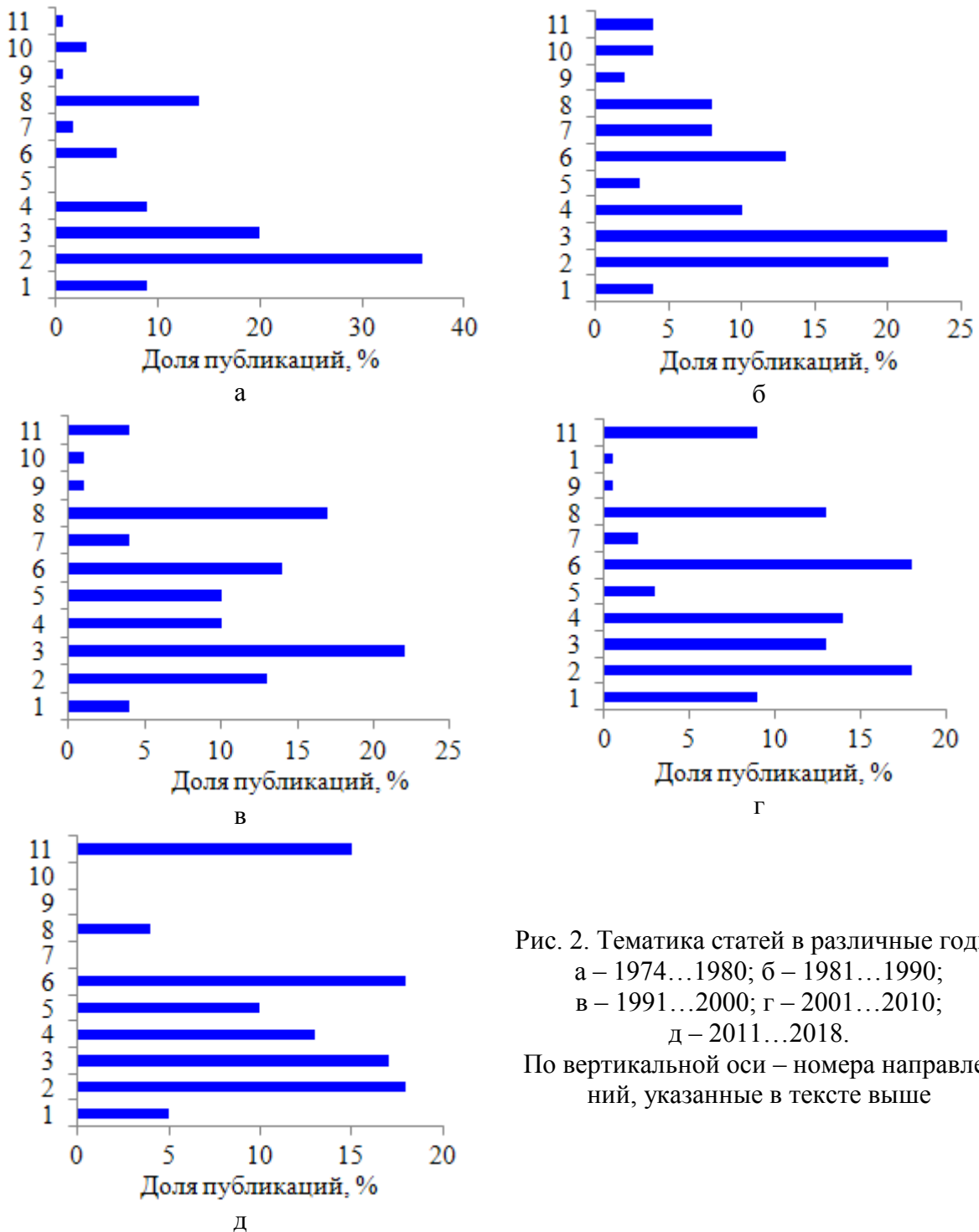


Рис. 2. Тематика статей в различные годы:
 а – 1974...1980; б – 1981...1990;
 в – 1991...2000; г – 2001...2010;
 д – 2011...2018.

По вертикальной оси – номера направлений, указанные в тексте выше

Как видно из рис. 2, несмотря на кардинальные перемены в стране в 90-е годы XX века, в принципе тематика статей не претерпела существенных изменений с момента выхода первого выпуска сборника. Традиционно большая доля статей посвящена микрогеометрии поверхностей и различным аспектам контактного взаимодействия, что соответствует научному направлению школы Н.Б. Демкина. На протяжении всех лет издания большое внимание уделялось процессам трения и изнашивания, а также контактной проводимости – электрической и тепловой, которые также входят в круг научных направлений Тверской трибологической школы.

Если анализировать тематику публикаций более детально, то за 45 лет определенные изменения, безусловно, произошли. Так, в последние годы исчезли публикации на космическую тематику, существенно уменьшилось или так же сошло на нет число публикаций, связанных с торфяной и сельскохозяйственной техникой. С другой стороны, в связи с общим прогрессом науки и техники появились публикации, отражающие новые направления исследований, например, связанные с наномасштабным уровнем процессов фрикционного взаимодействия, нанотехнологиями в материаловедении и т. п. Увеличилось число публикаций, связанных с математическим и компьютерным моделированием процессов на поверхности и в контакте твердых тел и технических поверхностей, а также с применением систем автоматического проектирования технических систем.

Разумеется, тематика публикаций в межвузовском сборнике научных статей и ее динамика – это не тот материал, на основании которого можно делать выводы об изменениях в экономике, науке и технике в масштабах страны. Хотя очевидно, что кардинальные перемены в стране на рубеже веков, общая экономическая ситуация и сокращение финансирования научных исследований в частности, уменьшение спроса на результаты научных исследований, падение престижа научной работы не могли не сказаться и на тематике, и на количестве и качестве научных публикаций, в том числе и обсуждаемого издания. Сказались также и перемены в издательской политике, увеличение количества изданий, в том числе электронных, увеличение престижа изданий, включенных в международные реферативные базы данных научных публикаций (типа *Web of Science* или *Scopus*), а также входящих в список изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Наукометрические показатели. С 2000 года все выпуски сборника полностью размещаются в Научной электронной библиотеке *eLIBRARY.RU*, что дает возможность использовать ее ресурсы для анализа публикационной активности издания.

Во-первых, по общему количеству публикаций сотрудников ТвГТУ, размещенных в Научной электронной библиотеке *eLIBRARY.RU*, сборник «Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел,

деталей технологического и энергетического оборудования» занимает второе место (354 публикации) после «Вестника Тверского государственного технического университета» (910 публикаций), опережая остальные издания университета и других издательств.

Во-вторых, мы сочли целесообразным дополнительно привести некоторые показатели, касающиеся межвузовского сборника, о котором идет речь в данной статье. Для сравнения мы решили привести показатели еще трех изданий (все они также размещены в *eLIBRARY.RU*, два из них входят в список ВАК):

1. «Вестник Тверского государственного технического университета». Обоснование выбора его для сравнения, думаем, излишне.

2. «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов»: межвузовский сборник научных трудов. Издается ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», входит в перечень ВАК, реферировается в *Chemical Abstracts*. В 2018 году вышел 10-й выпуск сборника.

3. Журнал «Сборка в машиностроении, приборостроении» выпускается издательством «Инновационное машиностроение». Выходит 12 раз в год. Входит в перечень ВАК. Несмотря на название, в журнале существует раздел «Трение и смазка в машинах и механизмах», в котором, после того как в 2016 году перестал выходить одноименный журнал, в среднем более 1/3 статей посвящено трибологической тематике.

Наукометрические показатели указанных изданий приведены в таблице. Данные актуальны на 2017 год, более свежие данные на сайте Научной электронной библиотеки *eLIBRARY.RU* пока не представлены.

Наукометрические показатели изданий

Показатель	Механика и физика процессов на поверхности и в контакте...	Вестник ТвГТУ	Физико-химические аспекты изучения кластеров...	Сборка в машиностроении, приборостроении
Пятилетний импакт-фактор	0,130	0,160	0,193	0,233
Десятилетний индекс Хирша	5	6	10	10
Средний индекс Хирша авторов статей	5	4,8	7,9	5
Пятилетний индекс Херфиндаля	2 850	4 456	3 269	1 203
Среднее число цитирований статей издания в расчете на одну публикацию	0,4	0,6	1,5	1,5
Пятилетний коэффициент самоцитирования, %	50	65,9	55,9	27,7
Средняя доля заимствованного неавторского текста в статьях журнала за год, %	10,5	7,9	7	Нет данных

В основном, как нам кажется, приведенные показатели не нуждаются в пояснениях, кроме индекса Херфиндаля. Смысл его на сайте *eLIBRARY* поясняется так: «Индекс Херфиндаля – Хиршмана рассчитывается как сумма квадратов процентных долей журналов, цитирующих данный, по отношению к общему количеству цитирований. При расчете учитываются ссылки из текущего года на предыдущие 5 лет, в том числе самоцитирования. Чем *больше* количество цитирующих журналов и чем равномернее распределены по ним ссылки на данный журнал, тем *меньше* величина этого показателя. Максимальное значение равно 10 000 и достигается, когда все ссылки сделаны из одного журнала».

Выводы из таблицы читатель может сделать сам. Мы считаем, что сборник выглядит на фоне сравниваемых изданий не худшим образом, хотя мы и понимаем, что нам есть к чему стремиться.

Библиографический список

1. Ярош, В.М. Трибологический эксперимент на орбите вокруг Луны / В.М. Ярош // Механика и физика фрикционного контакта: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2001. С. 116–119.

2. Самсонов, Л.Н. Вопросы трибологии в торфяном машиностроении и пути их решения / Л.Н. Самсонов, И.И. Беркович // Теоретические и прикладные вопросы контактного взаимодействия: сб. науч. тр. Калинин: КГУ, 1987. С. 98–110.

3. Измайлов, В.В. Исследование адгезионного взаимодействия стальных поверхностей с учетом субшероховатости / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 36–42.

4. Чичинадзе, А.В. Исследование электрофрикционных характеристик материалов для скоростного электрического контакта / А.В. Чичинадзе, Ю.М. Щерба // Механика и физика контактного взаимодействия: межвуз. сб. Калинин: КГУ, 1979. С. 97–103.

5. Болотов, А.Н. Фрикционные характеристики магниторазгруженного узла трения / А.Н. Болотов // Механика и физика контактного взаимодействия: межвуз. сб. Калинин: КГУ, 1981. С. 38–51.

6. Беркович, И.И. Исследование трения слабого грунта при высоких скоростях на маятниковом трибометре / И.И. Беркович [и др.] // Механика и физика контактного взаимодействия: межвуз. сб. Калинин: КГУ, 1976. С. 74–81.

УДК 621.316.35

А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова
Тверской государственной технической университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Описаны технология нанесения и преимущества электропроводного защитного покрытия на алюминиевые контакт-детали силовых электрических контактных соединений методом конденсации с ионной бомбардировкой. Приведены описание и результаты экспериментального исследования контактных соединений с нитридотитановым покрытием и покрытием из хромистой бронзы на соответствие техническим

требованиям к величине начального электрического сопротивления и его увеличению после ускоренного испытания в режиме циклического нагревания контактов номинальным током. Показано, что для ионно-плазменных покрытий из хромистой бронзы все нормируемые параметры контактного соединения соответствуют требованиям нормативных документов, что свидетельствует о возможности его применения для защиты неподвижных разборных алюминиевых силовых контактных соединений.

Ключевые слова: электрические контакты, алюминиевые контакт-детали, ионно-плазменное покрытие.

THE INVESTIGATION OF THE ION-PLASMA SPRAYED COATING FOR ELECTRICAL SEPARABLE CONNECTORS

The deposition technology and the advantages of the conducting protective coating on aluminum contact parts of high-current electrical connections by the method of condensation with ion bombardment are described. The procedure and the results of the experimental study of contact joints with the titanium nitride coating and with chromium copper coating in compliance with the technical requirements to initial values of electrical resistance and its growth after accelerated test under a cyclic heating of the contacts by nominal current are presented. It is shown that for the ion-plasma coatings of chromium bronze all the normalized parameters of the connection fit the standard requirements, which indicates the possibility of its application for the protection of fixed separable aluminum high-current connections.

Key words: electrical contacts, aluminum contact parts, ion-plasma coating.

В силовом электроаппаратостроении при длительной эксплуатации неподвижных разборных контактных соединений возникает проблема снижения и стабилизации переходного электрического сопротивления разнородных контактных поверхностей. Распространенным способом ее решения является нанесение на контактирующие поверхности защитных металлических покрытий, как правило, химическим или электрохимическим методами [1, 2].

Вместе с тем современные эффективные направления в области синтеза покрытий, в том числе многофункциональных, с заданными свойствами связаны с разработкой технологий физического осаждения многослойно-композиционных покрытий (ФОП) на основе как чистых химических элементов, так и их соединений. Технологии ФОП (в частности, конденсация с ионной бомбардировкой (КИБ)) позволяют управлять составом и структурой многокомпонентных покрытий в зависимости от состава распыляемого материала и режимов процесса формирования покрытия. Это дает возможность оптимизации эксплуатационных свойств изделия и позволяет эффективно решать целый ряд задач для широкой гаммы проблем машиностроения [3].

В методе КИБ формирование покрытий происходит осаждением ионов, формируемых с помощью генератора плазмы на основе вакуумной дуги, выполненного в основном в виде торцевого холловского ускорителя (установки серий «Пуск», «Булат», МАП-1). В одном технологическом цикле метода КИБ предусмотрены: предварительная ионная очистка ме-

таллической плазмой в среде вакуума или инертного газа, нагрев обрабатываемых деталей ионами металла, нанесение покрытий в среде вакуума или реактивного газа с проведением модификации покрытия. Кроме того, метод КИБ дает возможность модификации покрытия для направленного формирования его физико-механических свойств путем введения в него дополнительных легирующих элементов.

Изначально метод КИБ предназначался для напыления защитных нитридотитановых покрытий на кромки режущего инструмента с целью повышения их износостойкости, в том числе за счет антиадгезивных свойств [3]. Так как нитрид титана (TiN) является электропроводящим материалом с достаточно низким удельным электросопротивлением $(20...40) \cdot 10^{-8}$ Ом·м, нами были выполнены экспериментальные исследования возможности применения нитридотитановых покрытий для повышения надежности контактных соединений алюминиевых контакт-деталей. Испытаниям подвергались контактные соединения медных шин без покрытия с шинами или кабельными наконечниками из алюминиевого сплава, на рабочие поверхности которых было нанесено покрытие TiN толщиной 10 мкм (рисунок).



Кабельный наконечник и токоведущая шина из алюминиевого сплава

Ионное напыление покрытия проводили на серийной установке методом КИБ. Технология нанесения состояла из нескольких этапов. Первый этап – промывка и обезжиривание моющими растворами с последующей физической сушкой. Второй этап – обработка поверхности высокоэнергетическим ионно-плазменным потоком при потенциале смещения 1,3 кВ и остаточном давлении не ниже 10^{-3} Па. Под воздействием высокоэнергетического потока происходит не только очистка путем ионного травления, но и интенсивный нагрев обрабатываемой поверхности. Время второй стадии составляло 10 мин. Третий этап – формирование покрытия – имеет отличительную особенность: уменьшение энергии ионов в потоке за счет снижения потенциала смещения до 140 В. Ток дуги при этом составлял 90...100 А, давление реактивного газа – $8 \cdot 10^{-4}$ Па, время осаждения – 45 мин.

Электрические контактные соединения были подвергнуты стендовым испытаниям по стандартной методике ГОСТ 17441-84 «Соединения

контактные электрические. Приемка и методы испытаний». Целью испытаний была проверка контактных соединений с покрытиями на соответствие требованиям ГОСТ 10434-82 «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования» в части значения начального электрического сопротивления, его роста после ускоренного испытания в режиме циклического нагревания контактов номинальным током. Алюминиевые детали с покрытием соединялись с медными шинами сечением $4 \times 40 \text{ мм}^2$ без покрытия. Сборку соединений проводили на болтах М16 с моментом затяжки 60 Н·м. При этом алюминиевые наконечники предварительно опрессовывались на алюминиевой секторной жиле сечением 150 мм^2 . Перед сборкой поверхности контакт-деталей зачищали и обезжиривали бензином.

При испытаниях измеряли начальное электрическое сопротивление $R_{к \text{ нач}}$, сопротивление R_k после нагрева номинальным током 376 А, сопротивление $R_{к 500}$ при циклическом нагревании током 30 А в течение 500 циклов, а также температуру $T_{уст}$ контактного соединения после нагревания номинальным током 376 А. Согласно требованиям стандарта, контактные соединения считаются выдержавшими испытания, если начальное контактное сопротивление $R_{к \text{ нач}}$ не превышает сопротивления участка целой шины длиной, равной длине контактного соединения. Установившаяся температура $T_{уст}$ при испытании не должна превышать допустимой $T_{доп} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Среднее контактное сопротивление при циклическом нагревании $R_{к 500}$ не должно превышать $1,5R_k$. Испытания показали, что не все исследованные контактные соединения с нитридотитановым покрытием на алюминии обеспечили требуемое начальное электрическое сопротивление $R_{к \text{ нач}}$ и удовлетворяли требованиям по ограничению роста $R_{к 500}$.

Вследствие этого представляется интересным подобрать распыляемый материал, более полно отвечающий требованиям, предъявляемым к электрическим контактам, и соответственно изменить технологические режимы формирования покрытия, что дало бы возможность его конструирования с получением заданных эксплуатационных свойств. В качестве материала покрытия была выбрана хромистая бронза БрХ 0,5 как материал, имеющий высокую электропроводность, а также обладающий достаточной твердостью, коррозионной стойкостью и износостойкостью. Поскольку хромистая бронза по сравнению с титаном является менее тугоплавким материалом, то при распылении катода из нее использовали сниженные параметры технологического процесса: напряжение ионной очистки – 1 000...1 200 В, напряжение осаждения – 90...120 В при токе дуги 90...95 А, время осаждения порядка 30 мин. При этих условиях толщина получаемых покрытий составляла 3...4 мкм. Кроме того, так как стояла задача получения металлического, а не нитридного покрытия, напуск реактивного газа не проводили.

Испытания алюминиевых контактов с покрытием из хромистой бронзы БрХ 0,5 на соответствие требованиям стандарта проводили по вышеописанной методике. Результаты приведены в таблице.

Результаты испытаний контакт-деталей с покрытием хромистой бронзой

Наименование контакт-детали	№ образца	$R_{к\text{ нач}}$, мкОм	$T_{уст}$, °С	$R_{к}$, мкОм	$R_{к\text{ цикл}}$, мкОм					$\frac{R_{к\ 500}}{R_{к}}$
					100	200	300	400	500	
Шины алюминиевые сечением 4×40 мм с покрытием	1	10,3	60	10,0	10,7	11,0	11,0	11,0	11,0	
	2	9,0	59	8,7	9,0	9,0	8,5	8,8	9,2	
	3	9,5	60	9,3	9,7	9,3	9,7	9,7	9,7	
	4	10,0	60	9,7	10,7	10,7	10,8	10,8	10,7	
	5	9,5	60	9,5	10,0	10,0	10,3	10,5	10,3	
	6	10,3	60	10,3	11,7	11,7	12,0	12,0	11,8	
	Средн.	9,8	60	9,6	10,3	10,3	10,4	10,5	10,5	
Наконечники алюминиевые сечением 150 мм ² с покрытием	7	8,3	58	8,0	10,0	11,0	11,0	11,3	11,0	
	8	7,7	59	8,0	9,2	9,7	10,0	10,3	10,3	
	9	7,7	58	8,0	9,5	9,5	9,3	9,7	9,2	
	10	8,2	56	8,2	9,3	9,3	9,2	9,5	9,3	
	11	8,0	57	8,2	9,3	10,0	10,0	10,0	10,0	
	Средн.	7,9	58	8,1	9,5	9,9	9,9	10,2	10,0	

Результаты испытаний показали, что для всех исследованных образцов начальное электрическое сопротивление контактных соединений с ионно-плазменным покрытием хромистой бронзой $R_{к\text{ нач}}$ меньше, чем $R_{к\text{ цел}} = 12,3$ мкОм, где $R_{к\text{ цел}}$ – электрическое сопротивление участка целой алюминиевой шины 4×40 мм, равного длине контактного соединения. Установившееся значение температуры $T_{уст}$ контактных соединений при нагревании номинальным током меньше допустимого $T_{доп} = 95$ °С, а среднее электрическое сопротивление после циклического нагрева $R_{к\ 500} < 1,5R_{к}$. Таким образом, все нормируемые параметры контактного соединения соответствуют требованиям стандарта, что свидетельствует о возможности применения ионно-плазменных покрытий из хромистой бронзы для защиты алюминиевых неподвижных разборных контактных соединений.

Библиографический список

1. Бойченко, В.И. Контактные соединения токоведущих шин / В.И. Бойченко, Н.Н. Дзекцер. Л.: Энергия, 1978. 144 с.
2. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
3. Аксенов, И.И. Вакуумно-дуговые покрытия: технологии, материалы, структура, свойства / И.И. Аксенов [и др.]. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2015. 370 с.

УДК 620.178: 539.42

Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, Е.В. Маркова, Г.В. Сержантова
Тульский государственный университет

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 12Х2Н4А ПОСЛЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Проведено изучение поверхности разрушения стали 12Х2Н4А после цементации и нитроцементации. По всей толщине цементованного слоя наблюдали межзеренное разрушение, проходящее по границам крупного зерна. При микрофрактографическом исследовании поверхности изломов цементованных и нитроцементованных образцов выявлена определенная связь между строением их поверхности разрушения и ударной вязкостью.

Ключевые слова: цементация, нитроцементация, поверхность разрушения, скол, ударная вязкость.

THE STUDY OF THE MECHANISM OF 12X2H4A STEEL FRACTURE AFTER CHEMICOTHERMAL TREATMENT

The study of fracture surfaces of 12X2H4A steel after carburizing and nitrocarburizing was carried out. The intergranular destruction along the boundaries of large grains was observed all over the cemented layer thickness. The certain correlation between the structure of the fracture surfaces of cemented and nitrocementation samples and their impact toughness was revealed by means of microfractography of the fracture surfaces.

Key words: carburizing, nitrocarburizing, fracture surface, cleavage, impact toughness.

При исследовании структуры и прочностных свойств цементованной и нитроцементованной стали 12Х2Н4А были обнаружены различия в ее свойствах. Особенно это было заметно при определении ударной вязкости, значения которой различались в несколько раз.

Для выяснения причины подобной дисперсии свойств было проведено электронно-микроскопическое исследование поверхности разрушения ударных образцов стали 12Х2Н4А. Исследование проводили на сканирующем электронном микроскопе «JSM-35CF» при увеличениях от $\times 900$ до $\times 3\,000$. Ударную вязкость определяли на образцах размером $10 \times 10 \times 55$ мм без надреза при нормальной температуре после испытаний на маятниковом копре МК-30.

Исследование проводили на цементованных и нитроцементованных образцах, обработанных по режимам, приведенным в табл. 1. В этой же таблице приведены результаты исследования ударной вязкости α и сопротивления изгибу σ_n .

На рис. 1 показано строение излома поверхностной зоны цементованного слоя. На расстоянии $0,01 \dots 0,015$ мм от поверхности наблюдается разрушение по границам зерен (рис. 1а). Такой характер разрушения можно объяснить тем, что эта зона соответствует зоне внутреннего окисления [1, 2], где по границам зерен располагаются мелкодисперсные карбиды и оксиды, которые и вызывают их охрупчивание.

Таблица 1. Режимы насыщения и результаты механических испытаний образцов

Ре- жим	Химико- термическая обработка	Температура, °С		Общее время выдержки, ч	% NH ₃	α, Дж/см ²	σ _н , Н/мм ²
		Насыщения	Заковки				
1	Цементация	920	830	28	-	37	2 080
2			820	24	-	9	1 950
3	Нитро- цементация	880	870	14,25	0,8	80	2 400
4			870	12,7	0,9	51	2 150
5			860	10	2	37	2 100
6			850	10	1	9	1 870

Примечание. Промежуточное охлаждение (после насыщения перед закалкой) проводили при 500...600 °С.

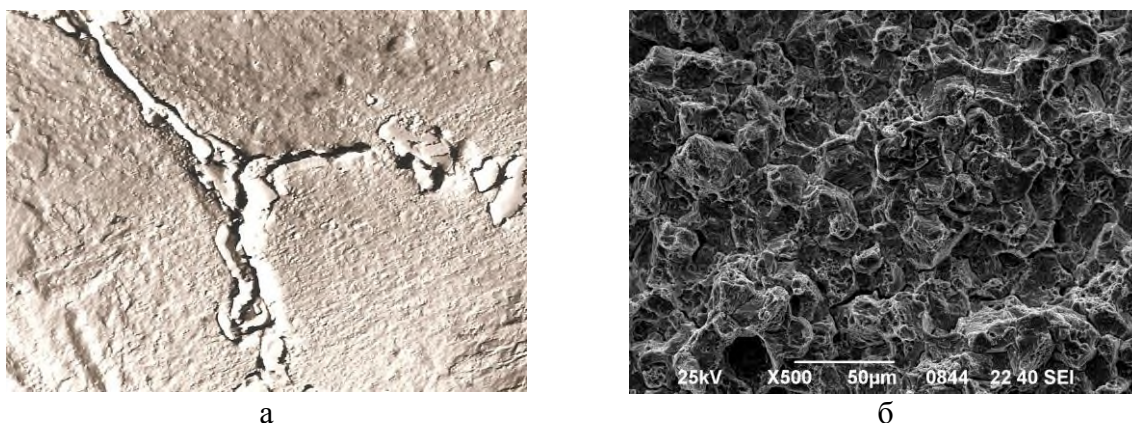


Рис. 1. Строение излома поверхностной зоны цементованного слоя:
а – разрушение по границам зерен; б – смешанный характер разрушения

На большем расстоянии от поверхности (см. рис. 1б) в цементованном слое наблюдается смешанный характер разрушения: на фоне вязкого «ямочного» излома встречаются участки межзеренного разрушения, вызванного выделением карбидной фазы по границам зерен. Сердцевина образца имеет вязкое «ямочное» строение.

На рис. 2а показано строение излома поверхностного слоя нитроцементованного образца с максимальной ударной вязкостью 80 Дж/см² (режим 3). В тонком поверхностном слое отсутствует дефектная зона, характерная для цементованного образца, и по всему слою наблюдается вязкий характер разрушения. Разрушение происходит по мелкодисперсным выделениям карбонитридной фазы, равномерно расположенным в вязком (ямочном) изломе (рис. 2б).

В нитроцементованных образцах с ударной вязкостью 51 Дж/см² (режим 4) вязкое разрушение наблюдается только в поверхностном слое. На расстоянии 0,3...0,4 мм от поверхности вязкое разрушение сменяется преимущественным разрушением по границам зерен. При уменьшении ударной вязкости до 37 Дж/см² (режим 5) в образцах увеличивается количество межзеренного разрушения.

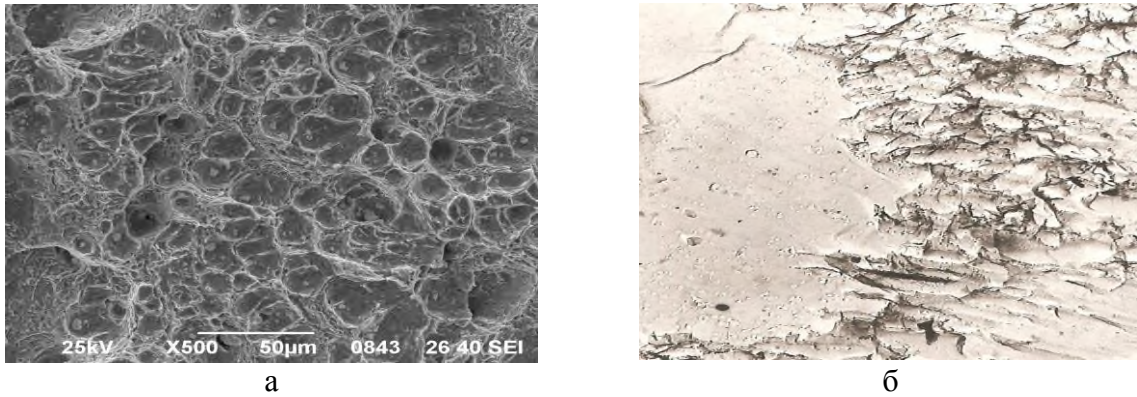


Рис. 2. Строение излома поверхностной зоны нитроцементованного слоя при различных увеличениях: а – $\times 500$; б – $\times 5\ 000$

В этом случае наряду с вязким разрушением в слое в большом количестве наблюдается разрушение по границам зерен, по которым происходит выделение карбонитридной фазы.

Из табл. 2 видно, что при уменьшении ударной вязкости α от 80 до 37 Дж/см² увеличивается степень дефектности нитроцементованного слоя. При ударной вязкости 80 Дж/см² дефектов в слое нет, при $\alpha = 51$ Дж/см² в слое появляется дефект в виде мелких темных включений (микропоры), при $\alpha = 37$ Дж/см² в поверхностном слое наблюдается дефект в виде темной составляющей. О степени дефектности нитроцементованного слоя можно судить по содержанию молекулярного азота, количество которого увеличивается от 0,15 до 0,46 % при снижении ударной вязкости от 80 до 37 Дж/см².

Сердцевина нитроцементованных образцов, обработанных по режимам 3...5, имеет вязкое «ямочное» строение.

Как при цементации, так и при нитроцементации наблюдаются образцы с очень низкой ударной вязкостью (режимы 2 и 6). Результаты микрофрактографического исследования показали, что изломы этих образцов имеют одинаковое строение. По всей толщине цементованного слоя наблюдается межзеренное разрушение, проходящее по границам крупного зерна. На гранях зерен заметно большое количество выделений карбидной фазы. Сердцевина образцов имеет хрупкое строение.

Для объяснения причины подобного вида разрушения было проведено металлографическое исследование, которое показало, что в поверхностном слое цементованных и нитроцементованных образцов имеется дефект в виде трооститной сетки по границам зерен, распространяющейся на всю толщину упрочненного слоя. Образование этого дефекта можно объяснить тем, что при данных условиях закалки в поверхностном слое по границам зерен при охлаждении образуется мелкодисперсная карбидная фаза, что приводит к снижению прокаливаемости этих зон слоя вследствие уменьшения легированности твердого раствора и появления в них продуктов немартенситного превращения [3].

Таблица 2. Параметры упрочненных цементацией и нитроцементацией поверхностных слоев

Режим	Микроструктура слоя	Наличие дефектов в слое	Толщина слоя, мм	A _{ост} , %	% N ₂	Микроструктура сердцевины	Микротвердость сердцевины <i>H</i>
1	Мелкоигольчатый мартенсит + + остаточный аустенит + + мелкодисперсные карбиды	Участки троостита на расстоянии 0,02 мм от поверхности	1,1...1,2	32	-	Троостит	380...390
2	Мелкоигольчатый мартенсит + + остаточный аустенит + + мелкодисперсные карбиды	Трооститная сетка по границам зерен по всему слою	0,9...1,0	19	-	Троостосорбит с участками перлита по границам зерен	360...380 280...320
3	Мартенсит + + остаточный аустенит + + мелкодисперсные нитриды	-	0,8	73	0,15	Троостит	380...390
4	Мартенсит + + остаточный аустенит + + мелкодисперсные нитриды	Мелкие темные включения в слое	0,9	75	0,29	Троостит	380
5	Мартенсит + + остаточный аустенит + + мелкодисперсные нитриды	Темная составляющая на глубине 0,07 мм, мелкие темные включения в слое	0,85	70	0,46	Троостосорбит	350
6	Мелкоигольчатый мартенсит + + остаточный аустенит + + мелкодисперсные нитриды	Трооститная сетка по границам зерен	0,5	30	-	Троостит с участками перлита по границам зерен	390...400 280...320

При этом содержание остаточного аустенита $A_{ост}$ в цементованных образцах понижается от 32 до 19 %, а в нитроцементованных – от 70...75 до 30 %. Сердцевина этих образцов имеет неоднородное строение. Наряду с участками троостосорбита и троостита с микротвердостью H 360...400 (при нагрузке 0,05 Н) наблюдаются участки с перлитной структурой с микротвердостью H 260...300. Причем участки с пониженной микротвердостью располагаются по границам крупных зерен. Неоднородность микроstructures сердцевин удалось выявить только при специальном травлении 0,4%-ным раствором HNO_3 , в то время как при обычном травлении 4%-ным раствором HNO_3 эти особенности микростроения не обнаруживаются. В результате формирования подобной структуры происходит ослабление границ зерен и в поверхностном слое, и в сердцевине, что вызывает резкое понижение ударной вязкости.

Результаты исследования влияния температуры закалки на строение излома сердцевин образцов показали, что вязкое разрушение в сердцевине нитроцементованных образцов происходит после закалки от 860 и 870 °С. Понижение температуры закалки до 850 °С приводит к образованию неоднородной структуры с большими различиями в микротвердости, что вызывает хрупкое разрушение в сердцевине образцов. При цементации с перекристаллизацией хрупкое разрушение сердцевин наблюдается после закалки от 820 °С.

Таким образом, при микрофрактографическом исследовании поверхности изломов цементованных и нитроцементованных образцов выявлена определенная связь между строением их поверхности разрушения и ударной вязкостью.

Высокой ударной вязкости соответствует получение в упрочненном слое мелко-ямочного излома с большим количеством мелкодисперсной карбонитридной фазы и вязкого излома в сердцевине.

Снижение ударной вязкости сопровождается появлением разрушения по границам зерен, что вызвано наличием дефектов в поверхностном слое. При резком снижении ударной вязкости наблюдается межзеренное разрушение в поверхностном слое и хрупкие разрушения в сердцевине.

Библиографический список

1. Зинченко, В.М. Внутреннее окисление легированных сталей при цементации и пути устранения его отрицательного влияния / В.М. Зинченко, Б.В. Георгиевская // Технология автомобилестроения. 1977. №2. С. 15–24.
2. Зинченко, В.М. Новые способы газовой цементации и нитроцементации / В.М. Зинченко, Б.В. Георгиевская, В.А. Оловянишников, В.В. Кузнецов // МиТОМ. 1984. № 10. С. 51–57.
3. Георгиевская, Б.В. Прокаливаемость и фазовый состав цементованных и нитроцементованных сталей / Б.В. Георгиевская [и др.] // Новое в металлведении и термической обработке металлов и сплавов: докл. Всесоюзного науч.-техн. симпозиума. Минск. 1975. С. 104–112.

УДК 620.178

Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, Е.В. Маркова, И.Ю. Канунникова
Тульский государственный университет

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ СУБСТРУКТУРЫ БОРИРОВАННОГО СЛОЯ

Изучено влияние амплитуды ультразвуковых напряжений на распределение остаточных макро- и микронапряжений, а также на параметры субструктуры. Приведенные результаты анализа параметров субструктуры при борировании показали, что увеличение остаточных микронапряжений, снижение внутренних микронапряжений, уменьшение величины блоков на поверхности борированного слоя происходят за счет изменения амплитуды ультразвуковых напряжений.

Ключевые слова: микронапряжения, амплитуда ультразвуковых напряжений, размеры блоков.

THE INFLUENCE OF THE AMPLITUDE OF ULTRASONIC STRESSES ON THE PARAMETERS OF THE SUBSTRUCTURE OF THE BORATED LAYER

The influence of the amplitude of ultrasonic stresses on the distribution of residual macro- and microstresses, as well as on the parameters of the substructure was studied. The results of the analysis of the parameters of the substructure during boration showed that the residual macro-stresses increase, the internal micro-stresses decrease, the size of the blocks on the surface of the borated layer decrease are due to changes of the amplitude of ultrasonic stresses.

Key words: microstresses, amplitude of the ultrasonic stress, block sizes.

При борировании в поверхностном слое металла происходит образование остаточных макро- и микронапряжений, влияющих на усталостную прочность и износостойкость упрочненных деталей.

Макронапряжения $\sigma_{\text{ост}}$, которые возникают при неравномерном нагреве или охлаждении, уравниваются в объеме всего образца. Остаточные напряжения этого рода могут привести к хрупкому разрушению металла, короблению, увеличению склонности к растрескиванию. Микронапряжения, уравнивающиеся в единичных объемах кристаллов, могут привести как к упрочнению, так и к преждевременному локальному разрушению материала [1].

В работе изучалось влияние амплитуды ультразвуковых напряжений на распределение остаточных макро- и микронапряжений, а также на параметры субструктуры.

При борировании с воздействием ультразвука на расплав при больших глубинах слоя до 180 мкм происходит охрупчивание структуры. Процесс этот протекает непосредственно на волноводе в минимуме амплитуды ультразвуковых напряжений при 180 мкм и в максимуме амплитуд ультразвуковых напряжений при 220 мкм.

Это является следствием оптимального соотношения фазовых составляющих и благоприятного распределения напряжений по глубине борированного слоя. С увеличением плотности тока электролиза от 0,4 до 0,6 А/см² при борировании с ультразвуком в расплаве глубина борированного слоя от 180 мкм возрастает до 200 мкм и при дальнейшем увеличении плотности тока до 0,6 А/см² глубина борированного слоя не увеличивается, а износостойкость при этом значительно уменьшается, что и является причиной увеличения хрупкости борированного слоя.

В поверхностном слое при всех амплитудах ультразвуковых напряжений возникают небольшие сжимающие напряжения 800...1 000 МПа. В средней части борированного слоя при максимальных амплитудах ультразвуковых напряжений, равных 189 и 170 МПа, получены небольшие растягивающие напряжения от 30 до 50 МПа. В средней части борированного слоя при минимальных амплитудах ультразвуковых напряжений, равных 23 МПа, величина сжимающих напряжений составляет ~70 МПа. В глубине борированного слоя при тех же амплитудах ультразвуковых напряжений возникают растягивающие напряжения ~200 МПа. Там же при максимальных амплитудах ультразвуковых напряжений, равных 189 и 176 МПа, соответствующих температурам насыщения 954 и 985 °С, соответственно получены растягивающие напряжения ~50 МПа и сжимающие ~100 МПа.

При максимальной амплитуде ультразвуковых напряжений, равной 174 МПа, и температуре в зоне образца 985 °С характер изменения остаточных макронапряжений (как и микроискажений) нелинейный и составляет на поверхности ~80 МПа, на глубине 30 мкм от поверхности – около 60 МПа и на границе борированного слоя с основой ~160 МПа. При минимальных амплитудах ультразвуковых напряжений, равных нулю, и температуре в исследуемой зоне образца 965 °С наблюдается аналогичный характер распределения остаточных макронапряжений и микроискажений: на поверхности ~70 МПа, на глубине ~80 мкм от поверхности ~40 МПа и на границе борированного слоя с основой около 220 МПа.

Таким образом, наиболее благоприятное распределение микроискажений и макронапряжений по глубине борированного слоя при борировании с ультразвуком по длине волновода получено в минимуме и максимуме амплитуд ультразвуковых напряжений при температурах в зоне образцов соответственно 965 и 985 °С.

В результате проведенного исследования субструктуры борированного слоя установлено, что размеры блоков на поверхности образцов составляют при закалке с ультразвуком $\sim 1,5 \cdot 10^{-5}$ см, а без ультразвука $\sim 6 \cdot 10^{-5}$ см. На глубине порядка 70 мкм величина блоков в схеме насыщения с ультразвуком и без него одинакова и равна $1 \cdot 10^{-5}$ см, т. е. в два раза меньше, чем при борировании с воздействием ультразвука по длине волновода в зоне максимальных амплитуд ультразвуковых напряжений. На глубине ~140 мкм

при закалке с ультразвуком величина блоков несколько больше, чем без действия ультразвука.

Меньшая величина блоков на поверхности борированного слоя в случае закалки с ультразвуком свидетельствует о том, что на размельчение блоков в большей степени влияет знакопеременное поле ультразвука, чем фазовые превращения, проходящие в процессе закалки стали 45. Меньшая величина блоков у поверхности в случае закалки с ультразвуком является основным фактором, улучшающим физико-механические свойства борированного слоя.

Анализ остаточных макронапряжений $\sigma_{ост}$, внутренних микронапряжений $\sigma_{вн}$ и размера блоков D при борировании и закалке с воздействием ультразвука и без него показал, что на увеличение остаточных макронапряжений, снижение внутренних микронапряжений, уменьшение величины блоков на поверхности борированного слоя значительно влияет амплитуда ультразвуковых напряжений. Ее воздействие от поверхности определенным образом распространяется на глубину до 70 мкм. В дальнейшем на глубине борированного слоя свыше 80 мкм характер распределения микро- и макронапряжений изменяется. На такое перераспределение весьма существенное влияние оказывают фазовые превращения, сопровождающиеся объемным эффектом. Рост макронапряжений растяжения или сжатия в результате фазовых превращений вызывает пластические сдвиги и появление напряжений на больших глубинах борированного слоя.

Воздействие ультразвука как при борировании, так и при закалке, способствует измельчению блоков. Наибольшее измельчение наблюдается при максимальных амплитудах ультразвуковых напряжений.

Таким образом, очевидно, что определяющее влияние на напряженное состояние при воздействии ультразвука на глубине до 70 мкм борированного слоя оказывает амплитуда ультразвуковых напряжений, а в более глубоких слоях – на перераспределение остаточных напряжений влияют главным образом фазовые превращения.

Изменение микроискажений, размеров блоков, макро- и микронапряжений в зависимости от амплитуды ультразвуковых напряжений объясняется, вероятно, тем, что ультразвуковые напряжения, достигая определенного предела, вызывают движение дислокаций, срывают их с мест закрепления и генерируют новые, увеличивая плотность субструктурных дефектов.

Нами определено, что для боридных покрытий в общем случае остаточные макронапряжения $\sigma_{ост}^{max}$ можно приближенно описать уравнением гиперболы в зависимости от относительной толщины слоя $h_{сл}$ и глубины диффузионной зоны $h_{дз}$:

$$\sigma_{ост}^{max} = E \cdot \Delta T \cdot \frac{\beta_{сл} - \beta_{дз}}{1 + K(h_{сл} / h_{дз})},$$

где E – модуль упругости; ΔT – изменение температуры при охлаждении после насыщения; $\beta_{\text{сл}}$ и $\beta_{\text{дз}}$ – соответственно коэффициенты линейного расширения материалов покрытия и диффузионной зоны; $K = 1 + \frac{E_{\text{м}} + E_{\text{б}}}{E_{\text{м}}}$ –

концентрационный параметр; $E_{\text{м}}$ и $E_{\text{б}}$ – модули упругости матрицы и боридных включений соответственно. Распределение внутренних напряжений аппроксимировали некоторой общей функцией в виде трехчлена:

$$\sigma_{\text{вн}} = K_1 \cdot h_{\text{сл}}^2 + K_2 \cdot h_{\text{сл}} + K_3,$$

где K_1, K_2, K_3 – коэффициенты аппроксимации.

Количество экстремальных точек эпюры выражается прочностными условиями:

$$h_{\text{сл}} = h_{\text{сл}}^{\text{max}} \text{ и } \sigma_{\text{вн}} = 0,$$

$$\frac{d\sigma_{\text{вн}}}{dh_{\text{сл}}} = 0 \text{ и } \sigma_{\text{вн}} = \sigma_{\text{вн}}^{\text{max}}.$$

Величины $\sigma_{\text{вн}}$ и $\sigma_{\text{ост}}$ могут принимать значения, функционально определяемые структурой конкретного типа слоя, финишной термической или механической обработкой и экспериментально определены стандартными рентгеноструктурными или оригинальными (метод стравливания) методами.

Анализ распределения внутренних напряжений в боридных покрытиях на сталях различной толщины в зависимости от режима охлаждения после насыщения показал, что максимальные сжимающие напряжения соответствуют более тонким слоям; с возрастанием толщины покрытия максимальные внутренние напряжения смещаются в глубь от поверхности.

Указанные выше аппроксимации внутренних напряжений в целом можно использовать при оценке напряженного состояния химико-термических покрытий.

Рациональными эпюрами внутренних напряжений химико-термических покрытий с позиции сопротивляемости повреждаемости следует считать те, у которых минимальные сжимающие напряжения распределяются по всей глубине слоя, а их максимум приходится на зону покрытия с большим удельным объемом. Введение в схему насыщения дополнительных активирующих воздействий в первую очередь влияет на напряженное состояние слоя [2].

Анализ эпюр напряжений в боридных покрытиях в зависимости от амплитуды ультразвуковых воздействий на жидкий боризатор показал, что максимальным их амплитудам соответствует наилучшее распределение макронапряжений. Благоприятным при этом является введение финишного ускоренного охлаждения, которое дополнительно нивелирует различие в эпюре при простом насыщении и с применением ультразвука. Усложнение режима охлаждения за счет закалки с ультразвуком, увеличение скорости

охлаждения и улучшение условий теплообмена обуславливают более полное мартенситное превращение в основе сталей и, как следствие, выравнивание напряженного состояния. В немалой степени термическая финишная обработка влияет также на микронапряжения.

На увеличение сжимающих макронапряжений, снижение уровня внутренних микронапряжений, а также уменьшение величины блоков на поверхности слоя в первую очередь влияет амплитуда ультразвуковых воздействий как в режиме насыщения, так и в режиме последующей термообработки детали с покрытием (таблица). Воздействие ультразвука закономерным образом сказывается на внутренних напряжениях до глубины порядка 80 мкм, а в более глубоких зонах покрытия характер распределения искажений изменяется. Это в первую очередь предопределяется наследственными фазовыми превращениями, сопровождающимися объемными эффектами. Рост макронапряжений растяжения или сжатия в результате фазовых превращений вызывают появления микронапряжений на больших глубинах диффузных зон.

Распределение макро- ($\sigma_{осн}$) и микро- ($\sigma_{вн}$) напряжений и размеров блоков D по глубине борированного слоя после закалки с ультразвуком (УЗК) и без него

Глубина слоя, мкм	Наименование параметров	Ед. изм.	Закалка стали 45		Зоны испытания Армко-железа		
			Без УЗК	С УЗК	1	2	3
-	Амплитуда смещения	мкм	-	-	1,0	6,0	1,5
	Амплитуда напряжений σ	МПа	-	-	183	0,0	174
	Температура в зоне образца	°С	-	-	954	965	985
50	Макронапряжения $\sigma_{осн}$	МПа	-330	-280	-100	-70	-100
	Микронапряжения $\sigma_{вн}$	МПа	-270	-250	-300	60	80
	Величина блоков D	10^{-5} см	1,5	1,0	0,2	1,2	0,1
100	Макронапряжения $\sigma_{осн}$	МПа	-300	-300	+40	-60	+40
	Микронапряжения $\sigma_{вн}$	МПа	270	250	160	40	50
	Величина блоков D	10^{-5} см	1,2	1,0	0,4	1,2	0,3
150	Макронапряжения $\sigma_{осн}$	МПа	150	230	+40	+200	-100
	Микронапряжения $\sigma_{вн}$	МПа	280	260	40	200	160
	Величина блоков D	10^{-5} см	1,8	2,0	0,2	1,2	0,15

Примечание. Режимы борирования: плотность тока $0,1 \text{ А/см}^2$; время 60 мин; температура расплава $970 \text{ }^\circ\text{С}$. Обработка после борирования: охлаждение на воздухе; отпуск при $200 \text{ }^\circ\text{С}$ в течение 30 мин.

Воздействие ультразвука как в процессе насыщения, так и в процессе закалки способствует измельчению блоков, причем наибольший эффект измельчения достигается при максимальных амплитудах ультразвуковых воздействий.

Библиографический список

1. Нечаев, Л.М. Распределение внутренних напряжений по глубине поверхност-

ного слоя стали 65С2ВА / Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, Е.В. Маркова // Материалы V Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов»: сб. науч. тр. М.: ИМЕТ РАН, 2013. С. 339–340.

2. Нечаев, Л.М. Влияние структуры на триботехнические характеристики боридных покрытий / Л.М. Нечаев [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ. 2015. Вып. 8. С. 79–83.

УДК 621.891

О.В. Сутягин
Научно-инновационный центр
эксплуатационной надежности механических систем,
А.А. Рачишкин
Тверской государственный технический университет

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрен системный подход к оптимизации надежности механических систем, объединяющий традиционные методы расчетов и экспериментов с компьютерным моделированием дискретных контактов трибосопряжений. Это позволяет снизить объем экспериментов на этапе опытно-конструкторских работ.

Ключевые слова: надежность, механическая система, дискретный контакт, компьютерное моделирование.

SYSTEMATIC APPROACH TO RELIABILITY OPTIMIZATION OF MECHANICAL SYSTEMS

The systematic approach to the optimizing of the reliability of mechanical systems, combining traditional methods of calculations and experiments with computer simulation of discrete contacts of tribocouplings, has been considered. It enables to reduce the amount of experiments on engineering development stage.

Key words: reliability, mechanical system, discrete contact, computer simulation.

Надежность механической системы (МС) определяется как общими показателями надежности технических объектов (ресурсом, сроком службы, сохраняемостью и пр.), так и функциональными (к.п.д., точностью, прочностью, жесткостью, герметичностью, тепло-электропроводностью и пр.). Несмотря на достижения в методах повышения надежности создание конкурентной техники требует оптимизации надежности элементов МС в целом. На рис. 1 представлен пример механической системы – простейший двигатель внутреннего сгорания, который включает в себя типовые трибосопряжения (цилиндр – поршень, вал – втулка, клапанная пара, резьбовое соединение), образующие триботехническую систему (ТС). Отметим,

что все трибосопряжения, образующие приведенную ТС, работают при различных эксплуатационных режимах и в различных средах.

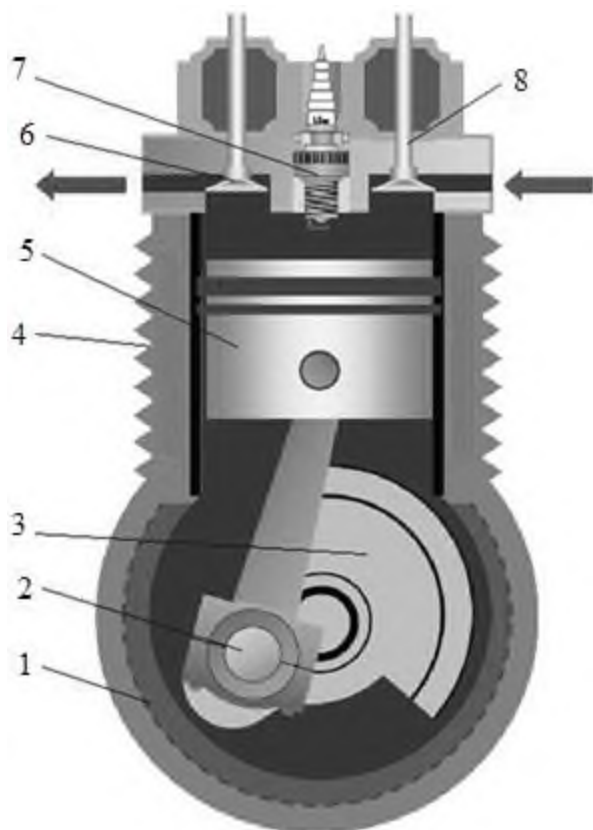


Рис. 1. Пример механической системы:

- 1 – маховик; 2 – шатун;
- 3 – коленчатый вал; 4 – цилиндр;
- 5 – поршень; 6 – выпускной клапан;
- 7 – свеча; 8 – впускной клапан

исследований с компьютерным моделированием контактного взаимодействия трибосопряжений [1, 2], образующих ТС, входящую в МС.

На основе технического задания (ТЗ), синтезируется возможная конструкция МС. При этом для реализации заданных функциональных параметров возможны различные конструктивные решения [3]. Далее, используя принципы технической механики, корректируются геометрические, кинематические и динамические параметры конструкции до их соответствия ТЗ. Если корректировка не приводит к выполнению заданных характеристик, должен быть синтезирован новый механизм. Когда все варианты конструкций исчерпаны, но положительный результат не получен, необходима корректировка ТЗ (рис. 2).

Далее создается эскизный проект МС и проводятся прочностные расчеты [4, 5], определяющие материалы и номинальные размеры деталей конструкции. Доступные материалы, работоспособные в условиях воздействий окружающей среды определенной ТЗ, задаются матрицей (рис. 2). При несоответствии рассматриваемого эскизного проекта требованиям ТЗ требуется корректировка конструкции МС (рис. 2).

Таким образом, ТС является подсистемой МС и должна рассматриваться с ней как единое целое. В процессе эксплуатации оптимальной является ситуация, когда МС, отработав заданный ресурс, выходит из строя по причине одновременной потери работоспособности всех составляющих ее элементов. Поэтому оптимизация надежности МС подразумевает снижение избыточной долговечности одних трибосопряжений и повышение долговечности других до заданного уровня.

Оптимизация надежности МС на этапе опытно-конструкторских работ представляет многоступенчатый процесс, включающий в себя решение ряда частных задач, в том числе и триботехнических. На рис. 2 представлена схема алгоритма конструирования МС, объединяющего традиционные расчетные и экспериментальные методы ис-

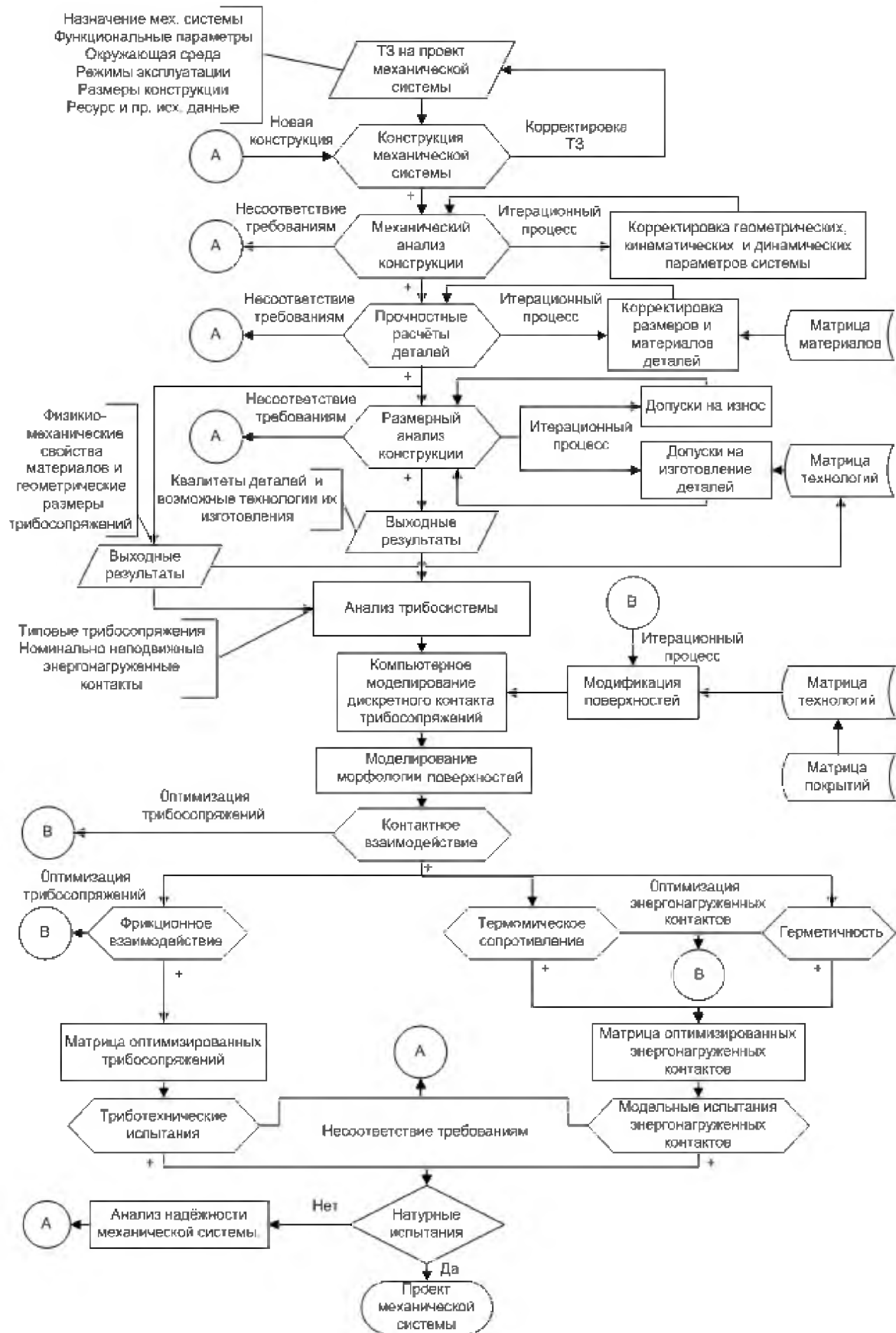


Рис. 2. Алгоритм оптимизации надежности МС на этапе опытно-конструкторских работ

При получении жизнеспособного решения проводится размерный анализ МС [6]. Результатом расчетов размерных цепей являются допуски на изготовление деталей конструкции, которые определяют их качества и технологии обработки. Матрица технологий задает доступные для конкретного производства способы обработки деталей, определяющие топографию и физико-механические свойства их поверхностей. Кроме того, размерный анализ определяет величины предельного износа деталей, приводящие к потере работоспособности конструкции.

Результаты, полученные в процессе выполнения перечисленных этапов, совместно с требованиями ТЗ являются основой для дальнейшего анализа ТС, входящих в МС. В процессе анализа выделяются типовые трибосопряжения и номинально неподвижные энергонагруженные контакты, в которых не обеспечиваются заданные показатели надежности на протяжении межремонтных циклов. Выделенные элементы МС приводятся к номинально плоским дискретным контактам [7]. На основе прочностных и размерных расчетов задаются параметры микрогеометрии и физико-механические свойства контактирующих поверхностей. На основе ТЗ учитываются режимы эксплуатации и окружающая среда. Такие дискретные контакты становятся объектами компьютерного моделирования (см. рис. 2), в процессе которого моделируется морфология контактирующих поверхностей и физические процессы на пятнах фактического контакта.

Первым этапом компьютерного моделирования является создание трехмерной модели поверхности дискретного контакта, определяющей ее морфологию. При создании математического аппарата принимается допущение, что ансамбль неровностей шероховатой поверхности представлен в виде одинаково ориентированных сегментов эллипсоидов вращения. Для распределения их по плоскости создан алгоритм, учитывающий входные параметры и общую структуру поверхности. Высоты и радиусы неровностей при моделировании изменяются по случайному закону распределения.

Количество сгенерированных сегментов достаточно для статистического описания моделируемой поверхности. Каждый сегмент эллипсоида вращения, моделирующий микронеровность, имеет собственные геометрические параметры и координаты центра основания, при этом пересечений оснований соседних сегментов не происходит.

Входными параметрами, задаваемыми оператором на данном этапе, являются данные о микро топографии контактирующих поверхностей, а при их отсутствии – статистически обработанные параметры продольных и поперечных профилей поверхностей.

Все характеристики каждой модели микронеровности сохраняются и учитываются на всех уровнях работы программы. В процессе моделирования морфологии поверхностей можно учитывать наличие в трибосопряжениях функциональных покрытий с толщинами и физико-механическими

свойствами – как случайно распределенными по номинальной площади контакта, так и имеющими постоянные значения.

Следующий этап работы программы (см. рис. 2) – моделирование напряженно-деформированного состояния, формирующегося на пятнах фактического контакта. Анализируются случаи контактного взаимодействия каждой модели микронеровности с упругим полупространством, имеющим упругопластическое покрытие, или с упругопластическим полупространством без покрытия. Возникающие деформации оцениваются и рассчитываются либо как упругие, либо как упругопластические. Результатом этих расчетов является определение жесткости стыка, фактической площади контакта и фактического давления. Последующие модули (фрикционное взаимодействие, термическое сопротивление, герметичность) являются подключаемыми и наследуют данные моделирования морфологии и контактного взаимодействия поверхностей. В результате численных имитаций экспериментов, проводимых для моделируемого дискретного контакта, оценивается влияние на его функциональные показатели различных факторов. По положительным результатам компьютерного моделирования создаются оптимизированные матрицы трибосопряжений и энергонагруженных контактов и на их основе разрабатываются планы модельных триботехнических испытаний (см. рис. 2).

В случае если компьютерное моделирование для поверхностей, обработанных традиционными технологиями, не дает результатов, соответствующих требованиям ТЗ, необходима модификация поверхностей, в том числе и нанесением функциональных покрытий. Далее создаются оптимизированные матрицы контактов с модифицированными поверхностями, которые определяют экспериментальные исследования.

Компьютерное моделирование существенно сокращает объем экспериментальных исследований, однако только они ставят окончательный диагноз проведенному анализу и расчетам.

Схемы модельных триботехнических испытаний должны соответствовать геометрии и кинематике исследуемых трибосопряжений, режимам испытаний и факторам воздействия окружающей среды. При этом возможно сокращение оптимизированной матрицы типовых трибосопряжений, полученной по результатам компьютерного моделирования. В случае положительного результата переходят к натурным испытаниям МС с сокращенной оптимизированной матрицей элементов ТС. В случае отрицательного результата натурных испытаний необходимо проектирование новой конструкции МС.

Эффект от сочетания традиционных методов инженерных расчетов с компьютерным моделированием дискретных контактов эквивалентных типовых трибосопряжений и энергонагруженных контактов состоит в целенаправленном сокращении экспериментальных исследований на этапе опытно-конструкторских работ, что повышает качество конечного результата.

Библиографический список

1. Сутягин, О.В. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей / О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, А.А. Рачишкин // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 3. С. 262–268.
2. Сутягин, О.В. Компьютерное моделирование фрикционного взаимодействия шероховатых поверхностей / О.В. Сутягин [и др.] // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 4. С. 427–435.
3. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. М.: Наука, 1988. 640 с.
4. Решетов, Д.Н. Детали машин / Д.Н. Решетов. М.: Машиностроение, 1989. 496 с.
5. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
6. Емельянов, С.Г. Размерный анализ в машиностроении / С.Г. Емельянов [и др.]. М.: Тонкие наукоемкие технологии, 2012. 332 с.
7. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.

УДК 621.8

А.У. Мигранова, А.М. Мигранов

Уфимский государственный авиационный технический университет

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Приведен расчет экономической эффективности использования разработанного датчика температуры и величины износа, который позволяет контролировать температуру в маслонаполненных агрегатах и износ по содержанию частиц в них, фиксировать текущее состояние узлов трения, хранить в памяти вычислительного блока информацию в виде таблиц и графиков о концентрации частиц износа в зависимости от времени.

Ключевые слова: экономический расчет, износ, трение, анализ масла, гидродинамическая смазка, трудозатраты, ремонт двигателя.

THE ECONOMIC EFFICIENCY OF DIAGNOSTIC EQUIPMENT APPLICATION

The calculation of the economic efficiency of the developed sensor of a temperature and wear value is produced. This sensor enables one to monitor the temperature in the oil-filled units and wear on the base of the concentration of wear particles in these units, fix the current state of friction units, store in the memory of the computing unit information in the form of tables and graphs about the concentration of wear particles depending on time.

Key words: economic calculation, wear, friction, oil analysis, hydrodynamic lubrication, labor costs, engine repair.

Анализ технического состояния оборудования основывается на его диагностике с помощью анализа работающего в нем смазочного материала [1–5]. В статье приведен экономический расчет стоимости внедрения дат-

чика износа и температуры в двигатель автомобиля «Газель» и сравнение его с существующим обслуживанием в условиях реального использования. Данные с прибора по беспроводной связи *BlueTooth* передаются на смартфон или планшет, где владелец может увидеть данные по текущему состоянию узлов трения, графики концентрации частиц износа в зависимости от времени, прогноз и рекомендации по срокам замены смазки и проведению ремонтных работ.

Для расчета экономического эффекта использовали формулу

$$E = E_y - E_{nc} \cdot C,$$

где E_y – годовая экономия либо показатели, которые достигаются в результате конкретной деятельности; $E_{nc} = 0,15$ – нормативный коэффициент эффективности (постоянная величина, которая зависит от конкретной сферы деятельности); C – затраты на конкретную деятельность, для которой подсчитывается экономический эффект.

Годовой экономический эффект представляет собой абсолютный показатель эффективности.

В данной работе рассмотрим экономический эффект от применения датчика скорости износа. В качестве примера возьмем автомобиль «Газель».

Для того чтобы рассчитать экономический эффект, нужно посчитать экономию от приобретения датчика износа. Для этого нужно посчитать разницу между среднегодовыми трудозатратами на техническое обслуживание (ТО) со стоимостью материалов в обычном режиме эксплуатации автомобиля без датчика износа и среднегодовыми трудозатратами на ТО со стоимостью материалов в режиме эксплуатации автомобиля с датчиком износа. Рассчитаем годовую экономию при приобретении датчика скорости износа:

$2\ 500 - 1\ 700 = 800$ руб., стоимость затрат на моторное масло снизилась на 800 руб.;

$2\ 100 - 1\ 400 = 700$ руб., стоимость затрат на трансмиссионное масло – на 700 руб.;

$550 - 370 = 180$ руб., затраты на замену фильтров – на 180 руб.;

$450 - 300 = 150$ руб., затраты на замену охлаждающей жидкости – на 150 руб.;

$(11\ 000 + 3\ 000 + 450) - 250 = 14\ 200$ руб., диагностика и ремонт двигателя и раздаточной коробки не требуется, так как датчик износа выявляет дефекты на ранней стадии. Экономия – 14 200 руб.

Итого годовая экономия: $800 + 700 + 180 + 150 + 14\ 200 = 16\ 030$ руб.

За показатель затрат на конкретную деятельность, для которой подсчитывается экономический эффект, возьмем стоимость двух датчиков износа с вычислительным блоком – 16 000 руб.

Рассчитаем экономический эффект:

$$E = 16\ 030 \text{ руб.} - 0,15 \cdot 16\ 000 \text{ руб.} = 13\ 360 \text{ руб.}$$

Важно отметить, что после установки датчиков масло и фильтры меняются в 1,5 раза реже, показатель среднестатистического ресурса двигателя увеличивается в 1,5 раза, показатель среднестатистического ресурса раздаточной коробки увеличивается на 50 000 км.

Экономический эффект в данном случае рассчитан примерно, так как невозможно предугадать точные трудозатраты на ТО: все зависит от ситуации, экологических, экономических и других факторов. Несмотря на это, датчик износа имеет значительный показатель экономического эффекта.

Рассчитав экономический эффект от применения датчика скорости износа, можно сделать вывод, что это выгодное приобретение. Довольно часто происходят поломки автомобиля вследствие различных факторов, но датчик скорости износа позволяет предотвратить их, он прост в применении, запатентован, прошел эксплуатационные испытания.

В настоящее время диагностическое устройство находится в переходной стадии между единичным и мелкосерийным производством. Изготовление вычислительных блоков поставлено на поток – в них используются стандартные элементы. Датчики требуют индивидуального подхода в связи с различиями в конструкции агрегатов техники разных производителей. Однако по мере накопления опыта изготовления датчиков для разной техники можно будет свести номенклатуру до нескольких типов датчиков, разделенных по посадочным размерам. Программное обеспечение уже обладает всеми базовыми функциями (вывод результатов измерений, построение графиков), ведется работа по оптимизации интерфейса и добавлению новой функциональности.

Рынок представлен двумя основными сегментами. Это крупные потребители (промышленные предприятия, автопарки и др.) и частные потребители (автовладельцы и небольшие предприятия, где используется техника с маслonaполненными агрегатами). Оба сегмента достаточно стабильны, в долгосрочной перспективе наблюдается небольшая тенденция к росту.

На российских предприятиях системы мониторинга за состоянием узлов трения в настоящее время не используются. Есть потенциальный конкурент – ООО «ММК» с разработками «ВЕКТОР» и «АИДА», однако эти разработки в настоящее время не внедрены в производство. Вышеуказанная проблема легла в основу постановки задачи по поиску инновационных решений для снижения затрат на обслуживание объектов топливно-энергетического комплекса.

Сравнение технико-экономических характеристик (включая количественные, качественные и стоимостные характеристики продукции) созданного продукта с зарубежными и отечественными аналогами (таблица). В сравнении использовались 3 аналога: прибор «ВЕКТОР», разработанный ООО «ММК» (Россия); прибор «АИДА», разработанный ООО «ММК» (Россия); *Condition Monitoring Sensor 4212*, реализуемый *Gill Sensors &*

Controls (Великобритания). Стоимость приводится для вариантов *Standard* и *Industrial*.

Технико-экономические характеристики датчиков

Технико-экономические параметры продукта	«ВЕКТОР»	«АИДА»	<i>Condition Monitoring Sensor 4212</i>	Созданный продукт – датчик скорости износа
Определение массы частиц железа, мг	Да	Нет	Да	Да
Определение массы цветных металлов, мг	Да	Нет	Нет	Эвристическое
Цена деления	0,1 мг	Нет	1 мг	0,1 мг
Диапазон	0...200 мг	«Норма» / «Выше нормы»	0...500 мг	0...100 мг
Подключение к другим устройствам	Проводное, <i>USB</i>	Нет	Проводное, <i>USB</i>	Беспроводное, <i>Bluetooth</i>
Сложность конструкции датчика	Высокая	Нет информации	Высокая	Низкая
Стоимость	Не производится	Не производится	£350...£570 35 000...57 000 руб.	12 500 руб.

На отечественном рынке и в странах СНГ предлагаемый продукт составит уверенную конкуренцию импортным аналогам за счет значительно меньшей стоимости, а также снижения затрат на доставку и таможенное оформление. Организация серийного производства сделает возможным вывод продукции на мировой рынок. Низкая стоимость прибора (вследствие меньшей сложности конструкция датчика, меньшей по сравнению со странами Европы стоимости рабочей силы) при сохранении технических характеристик позитивно влияет на конкурентоспособность продукта на зарубежных рынках.

Библиографический список

1. Виппер, А.Б. Анализ результатов испытаний масел в двигателе с учетом оценки их качества в лабораторных условиях / А.Б. Виппер, В.Л. Лахши // Двигателестроение. 1979. № 9. С. 58–59.
2. Путинцев, С.В. Состояние, проблемы и перспективы развития трибологического аспекта энергосбережения в двигателестроении / С.В. Путинцев // Известия вузов. Машиностроение. 1995. № 10–12. С. 71–79.
3. Салахов, Т.З. Текущая диагностика оборудования инновационным устройством / Т.З. Салахов [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2017. Вып. 10. С. 68–71.

4. Фиофанов, К.Н. Экспресс-метод для определения содержания воды, охлаждающей жидкости, сажи и механических примесей в нефтепродуктах / К.Н. Фиофанов // Мир измерений. 2015. № 2. С. 20–23.

5. Салахов, Т.З. Диагностирование промышленного оборудования на основе анализа состояния пар трения / Т.З. Салахов // Материалы Десятой российской научно-технической конференции. Мавлютовские чтения. 2016. № 10. С. 28–31.

УДК 621.793

М.Ш. Мигранов, Н.А. Сухова, С.Р. Шехтман
Уфимский государственный авиационный технический университет

ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Представлен механизм нанесения защитного покрытия на детали авиационной техники, проведены исследования свойств полученного наноструктурированного покрытия, осажденного с использованием плазменного ассистирования.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия, плазменное ассистирование, нанесение, технология, защита поверхности.

COATINGS FOR THE PROTECTION OF AVIATION EQUIPMENT PARTS

The mechanism of protective coating applying on parts of aviation equipment is presented, studies of the properties of the obtained nanostructured coating deposited using plasma assistment are carried out.

Key words: nanostructured coatings, plasma assistment, application, technology, surface protection.

Как показывает практика и многочисленные исследования, в большинстве случаев разрушение деталей авиационных двигателей начинается с поверхности или зарождается в тонком приповерхностном слое [1], поэтому особенно важно (и экономически, и технологически) разработать технологии получения функциональных и упрочняющих покрытий, свойства которых по прочности и пластичности недостижимы для традиционных моно- и поликристаллических структур. При этом возможна реализация одного из принципов нанотехнологии: создание объекта осуществляется не «сверху вниз» (например, когда при формообразовании снимается припуск с заготовки), а «снизу вверх», когда поверхность «достраивается» до необходимых размеров детали, причем последняя приобретает новое качественное состояние (по прочности, пластичности, износостойкости, коррозионной стойкости и др.) [2–4].

На современном этапе развития авиационной техники применяемые покрытия для целого ряда деталей, работающих в условиях повышенных температур, высоких знакопеременных нагрузок и агрессивных сред, не

всегда отвечают необходимым требованиям по их защите. В связи с чем продолжается поиск новых способов и процессов нанесения покрытий в направлении создания многослойных композиций, обладающих более высокими механическими и эксплуатационными свойствами по сравнению с монослойными [1, 4–7].

Метод вакуумного ионно-плазменного осаждения покрытий, характеризующийся получением поверхностных слоев со специальными свойствами, позволяющий защитить поверхность детали на протяжении всего ресурса работы, получил наибольшее распространение, так как он характеризуется практически полной универсальностью технологического процесса, высокой скоростью нанесения покрытий, высокой воспроизводимостью параметров и практически полным отсутствием экологических проблем.

Кроме того, метод позволяет получать многослойные покрытия, обладающие высокими механическими и эксплуатационными свойствами, которые могут состоять из периодически расположенных слоев различных материалов нанометровой толщины, например чередующихся Ti , Ti_xN_y и TiN с характерным размером толщины слоев менее 100 нм и количеством слоев до нескольких десятков [2, 3]. Благодаря особенностям строения, сверхмалой толщине слоев и их большому количеству, а также возможности плотного сопряжения слоев различных материалов, наноструктурированные покрытия сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанообъектов.

Многочисленные исследования [4–7] показали, что с уменьшением толщины пленки до 100 нм ее поверхностные свойства начинают доминировать над объемными. При этом тонкие пленки имеют физические свойства, которые существенно отличаются от свойств объемных образцов из того же материала. Они зависят не столько от химического состава, сколько от формы и размеров наноструктур, и во многих случаях на порядок превосходят характеристики монолитных материалов. Объясняется это более совершенной структурой сверхтонких пленок и более высокой внутренней энергией за счет перераспределения вклада в прочностные свойства материала поверхности по сравнению с объемом.

На основании вышеизложенного была разработана технология осаждения многослойного наноструктурированного покрытия системы $Ti-TiN$. Она предусматривает проведение в одном технологическом цикле предварительной ионной очистки поверхности плазмой несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, нагрев деталей ионами металла, нанесение многослойных покрытий в условиях плазменного ассистирования. Процесс получения наноструктурированного покрытия реализуется на модернизированной установке ННВ 6,6-И1.

Первый этап процесса – ионная очистка и активация центров адсорбции на обрабатываемой поверхности несамостоятельным сильноточ-

ным диффузионным разрядом – производится с помощью плазменного источника «ПИНК» в среде инертного газа аргона при давлении 10^{-1} Па, отрицательном смещении (900...1 100 В) на подложке, токе разряда 30...40 А, длительность обработки – 1...2 мин до прекращения возникновения микродуг. Такой режим позволяет избежать внедрения ионов металлической плазмы на стадии предварительной очистки, исключить привязывание микродуг к поверхности, снизить температуру предварительного нагрева до 100...200 °С.

На втором этапе формирования многослойного наноструктурированного покрытия осуществляется взаимодействие с поверхностью частиц ускоренного плазменного потока электродугового испарителя с титановым катодом, поверхностная миграция атомов и ионов титана, ионное перемешивание адсорбированных частиц. Формируется Ti -слой. В качестве катода используется технически чистый титан марки ВТ-1.0.

На третьем этапе в вакуумную камеру подается рабочий газ азот N_2 и происходит формирование слоя наноструктурированного покрытия. На поверхности образуется слой Ti_xN_y .

На четвертом этапе количество рабочего газа увеличивают для формирования на поверхности TiN . Затем с помощью системы напуска рабочего газа происходит снижение подачи азота в вакуумную камеру и на поверхности происходит осаждение слоя покрытия Ti_xN_y либо чистого Ti в зависимости от получаемого состава покрытия. Осаждение Ti из плазмы, генерируемой электродуговым испарителем, осуществляется в условиях плазменного ассистирования. Третий и четвертый этапы повторяются в зависимости от заданного количества слоев.

В процессе нанесения покрытия происходит равномерное планетарное вращение обрабатываемой детали относительно собственной оси и одновременно вокруг оси стола, благодаря чему обеспечивается равномерность осаждения покрытий. Процесс осуществляется при температуре 350...450 °С. Нагрев обусловлен энергией, приносимой осаждаемыми частицами. Толщина покрытия – 5...7 мкм. Количество слоев и их толщина задаются режимами напыления.

Чтобы получить многослойные наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия, необходимо соблюдать следующие основные правила:

1. Многослойные композиции должны состоять из множества сверхтонких (менее 100 нанометров) слоев.
2. При синтезе необходимо стремиться поддерживать температуру конденсации, близкой к минимальной (приблизительно 350...450 °С).

Усталостные испытания проводились на деталях, изготовленных из материала ВТ-6 с наноструктурированными многослойными покрытиями $Ti-TiN$. При этом имитируются все виды нагружения и нагрева, максимально приближающиеся к эксплуатационным. Обязательным условием

при таких испытаниях является реализация заданного напряженно-деформированного состояния в деталях и в опасном сечении. Одним из критериев правильности выбора схемы испытаний является идентичность получаемых разрушений разрушениям деталей, наблюдаемым в эксплуатации.

При периодических испытаниях на усталость используются контрольные нормативы, представляющие собой контрольный уровень напряжений σ_k , базовое число циклов нагружения N_k и число испытываемых лопаток n .

После испытания на усталость все лопатки подлежат контролю по технологии производства для обнаружения возможных трещин. Предварительная обработка поверхности соответствует базовому технологическому процессу. Финишная операция перед нанесением покрытий – полирование.

Результаты периодических испытаний считаются удовлетворительными, если все n лопаток не разрушатся на контрольном уровне напряжения σ_k и базовом числе циклов нагружения N_k . Испытания проводились на вибродинамическом стенде на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов на 6 лопатках.

Для определения влияния однослойных, многослойных и наноструктурных покрытий на усталостную прочность были проведены исследования на лопатках компрессора и образцах из авиационных материалов: 13X11H2B2MФ-Ш (ЭИ961-Ш) и титанового сплава ВТ6. Материал лопаток – ВТ6, ЭИ-961Ш. Испытания проводились на электродинамическом вибростенде в нормальных условиях по первой изгибной форме колебаний на лопатках методом «Лестница», $\sigma_{нач} = 480$ МПа на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. На лопатки наносилось покрытие на основе $Ti-TiN$, однослойное, многослойное (трехслойное) и наноструктурированное. На цилиндрические образцы наносилось покрытие на основе $Ti-TiN$, однослойное, многослойное (трехслойное) и наноструктурированное.

Для материала ВТ6 установлено, что предел усталости для наноструктурированного покрытия выше на 10,3 % по сравнению с однослойным покрытием и на 8,3 % выше, чем на образце с многослойным (трехслойным) покрытием.

Результаты испытания образцов на усталость (табл. 1) показывают, что наличие покрытия приводит к небольшому снижению усталостной прочности. В то же время усталостная прочность образцов с наноструктурированными покрытиями выше, чем у образцов с многослойными и однослойными покрытиями.

Повышение усталостной прочности может быть объяснено снижением остаточных напряжений в многослойных и наноструктурированных покрытиях.

Эрозионное изнашивание лопаток компрессора ГТД от абразивного воздействия содержащихся в воздушном потоке частиц пыли, песка, золы и других веществ является причиной разрушения поверхности лопаток,

выхода из строя лопаток, потери газодинамической устойчивости компрессора и сокращения ресурса двигателя или его ремонта.

Таблица 1. Результаты испытания образцов на усталость

Материал	Состояние обрабатываемой детали	Предел усталости, МПа	Изменение предела усталости, %
ЭИ961-Ш	Без покрытия	480	-
	Покрытие <i>Ti-N</i>	420	-12,5
	Многослойное покрытие (3 слоя)	430	-10,4
	Наноструктурированное покрытие	460	-4,2
ВТ6	Без покрытия	560	-
	Покрытие <i>Ti-N</i>	480	-14,2
	Многослойное покрытие (3 слоя)	490	-12,5
	Наноструктурированное покрытие	520	-7,14

Эрозионная стойкость образцов с покрытиями оценивалась методом сравнительных испытаний на специализированном стенде по методике разработанной ВИАМом. Угол атаки пылевоздушного потока – 20°. Количество циклов – 10.

Для оценки эрозионной стойкости были изготовлены образцы из материала ВТ6 с покрытием *Ti-TiN* с субмикроструктурной структурой. Толщина покрытий – 5...7 мкм. Многослойное покрытие было осаждено по предлагаемой технологии с использованием плазменного ассистирования. В табл. 2 представлены сравнительные данные о начальной массе образцов с наноструктурированными покрытиями *Ti-TiN* и без покрытий.

Таблица 2. Результаты исследований на эрозионную стойкость

Наименование образца с покрытием	Начальная масса, г	Потеря массы, г
Исходный образец (материал ВТ6)	4,843 155	0,002 85
ВТ6 + покрытие <i>TiN</i> (однослойное)	4,752 85	0,001 97
ВТ6 + наноструктурное покрытие <i>Ti-TiN</i>	5,177 0	0,001 69

Проведенные исследования показали, что при использовании в качестве защитного слоя многослойного покрытия с СМК-структурой возможно повышение эрозионной стойкости.

Анализ экспериментальных данных показал, что у образцов ВТ6 с однослойным покрытием *TiN* эрозионная стойкость в 1,5 раза выше, чем у исходных образцов ВТ-6 без покрытия. У образцов ВТ6 с наноструктурированным покрытием *Ti-TiN* эрозионная стойкость в 1,9 раза выше, чем у исходных образцов ВТ-6 без покрытия, и в 1,3 раза выше, чем у образцов из материала ВТ6 с однослойным покрытием *TiN*.

Библиографический список

1. Будилов, В.В. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов / В.В. Будилов, В.С. Мухин, С.Р. Шехтман // Физические основы и технические решения. М.: Наука, 2008. 194 с.
2. Белоус, В.А. Разработки НИЦ ХФТИ в области ионно-плазменных обработок конструкционных материалов (Обзор) / В.А. Белоус. Харьковская научная ассамблея, 2006. С. 60–73.
3. Мухин, В.С. Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования / В.С. Мухин, С.Р. Шехтман // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т. 9. № 1 (19). С. 84–91.
4. Пул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. М.: Техносфера, 2005. 336 с.
5. Schipachev, A. Optimum Conditions of Turning and Surface Plastic Deformation Determination Taking into Account Technological Heredity / A. Schipachev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1118. P. 012036.
6. Афанасьева, Ю.Д. Технология нанесения покрытия $Ti-TiN$ на режущий инструмент / Ю.Д. Афанасьева, С.Р. Шехтман // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2018. Т. 22. № 3 (81). С. 3–9.
7. Мигранов, М.Ш. Трибологические свойства многослойных покрытий для режущего инструмента / М.Ш. Мигранов [и др.] // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 3. С. 304–309.

УДК 621.793

М.Ш. Мигранов, Н.А. Сухова, С.Р. Шехтман
Уфимский государственный авиационный технический университет

МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ В УСЛОВИЯХ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается синтез многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий системы $Ti-TiN$ с субмелкозернистой структурой, полученной в условиях ионного модифицирования поверхности, реализуемого с использованием плазменного источника с накальным катодом. Оценено влияние дополнительной ионной бомбардировки на подготовку поверхности перед осаждением поверхности и на процесс модифицирования.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия, плазменное ассистирование, нанесение, технология, защита поверхности.

MULTILAYER COATINGS IN CONDITIONS OF SURFACE MODIFICATION

The synthesis of multilayer vacuum ion-plasma coatings of the $Ti-TiN$ system with a subfine-grain structure obtained under conditions of ionic surface modification with using of a plasma source with a filament cathode is considered. The effect of additional ion bombardment on surface preparation before surface deposition and on the modification process is estimated.

Key words: nanostructured coatings, plasma assisting, application, technology, surface protection.

Разработка новых материалов защитных покрытий, способов и процессов их нанесения в направлении создания многослойных композиций, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с монослойными, отвечающих современным требованиям по защите поверхности лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), работающих в условиях повышенных температур, знакопеременных нагрузок, усталостных и термоусталостных нагрузок, является важной задачей авиадвигателестроения. Особенно остро стоит вопрос о защите поверхности при работе в условиях знакопеременных температур. Для решения этой проблемы наряду с совершенствованием составов сталей и титановых сплавов разрабатываются технологии защиты поверхности лопаток ГТД от агрессивного воздействия [1–5].

Перспективным направлением в создании материалов для защиты лопаток компрессора ГТД являются много- или мультислойные покрытия, состоящие из периодически расположенных слоев различных материалов нанометровой толщины количеством до нескольких десятков, обладающие высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Благодаря особенностям строения, большому количеству и нанометровому диапазону толщин слоев покрытия с субмикроструктурной структурой и наноструктурированные покрытия сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанобъектов. Специфика получаемой структуры обусловлена процессами, происходящими во время образования покрытия [2, 4–7].

Целью работы является создание новых материалов и технологий синтеза вакуумных ионно-плазменных покрытий с субмикроструктурной структурой для защиты поверхности конструкционных материалов.

Синтез мультислойных покрытий системы $Ti-TiN$ осуществлялся на модернизированной промышленной установке ННВ 6.6-И1 с двух электродуговых испарителей с титановыми катодами в условиях плазменного ассистирования с использованием несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, генерируемого плазменным источником «ПИНК» в среде инертного газа – аргона.

Одновременная генерация частиц распыляемого материала за счет тока дуги с катодным пятном и генерация ионов инертного газа плазменного источника «ПИНК» позволяет повысить концентрацию заряженных частиц, что приводит к ускорению протекания процессов адсорбции, хемосорбции и ионного перемешивания.

Осаждение многослойных покрытий с субмикроструктурной структурой (СМК) происходит в процессе последовательного осаждения TiN и Ti_2N из плазмы, создаваемой электродуговыми испарителями, расположенными под углом 120° друг к другу на боковой поверхности вакуумной камеры. В качестве катодов используется технически чистый титан марки ВТ-1.0.

Проведение процесса в условиях ионной бомбардировки интенсифицирует процессы, протекающие при осаждении многослойных покрытий, способствует формированию мелкозернистой структуры, наноразмерных зерен и слоев, а также образованию сложных соединений за счет следующих факторов (рисунок):

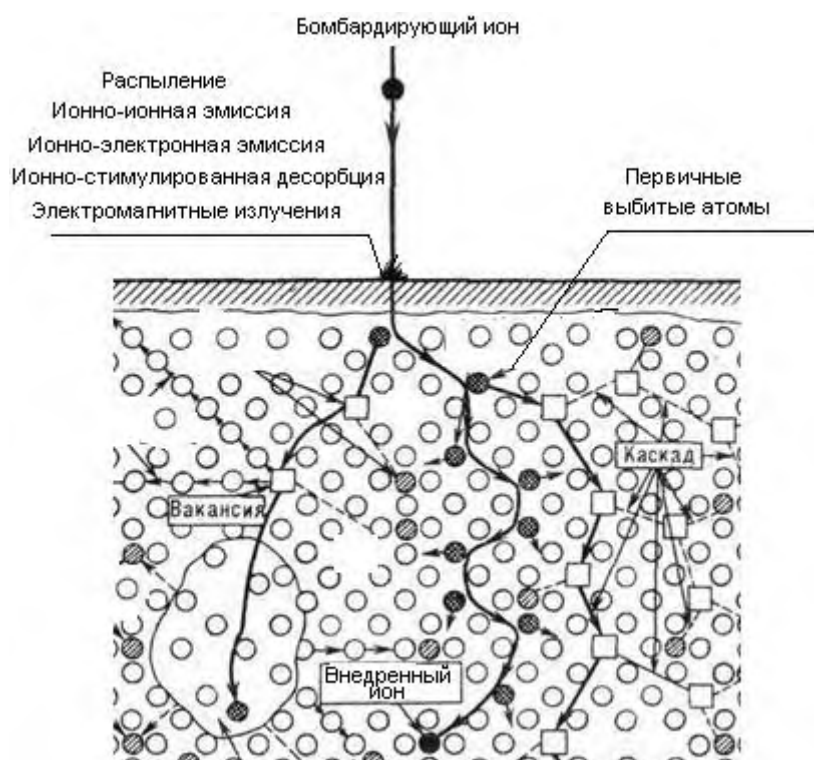
энергии, поставляемой в конденсируемое покрытие, и превращения кинетической энергии бомбардирующих ионов в тепловую для локальных объемов;

увеличения количества и плотности центров зародышеобразования; активирования плазмохимических реакций синтеза сложных соединений за счет подвода тепловой энергии непосредственно в зону образования и роста подвижности атомов;

повышения степени ионизации конденсируемого потока для снижения температуры синтеза покрытия и сдерживания роста размеров зерен (также наблюдаются поверхностные эффекты, которые заключаются, например, в аморфизации растущей пленки);

возможности очистки подложки и растущей пленки до и в процессе осаждения покрытия;

стимулирования диффузионных процессов на границе раздела «покрытие – подложка», повышающих адгезионную прочность.



Воздействие дополнительной ионной бомбардировки

Основное влияние модифицирования поверхности в условиях дополнительной ионной бомбардировки на свойства покрытий осуществляется на стадии их зарождения вследствие возникновения релаксации напряжений в

области ионного воздействия и перестройки кристаллической структуры. При облучении ионным потоком на поверхности образуются точечные дефекты, которые становятся активными центрами адсорбции.

Для образования мелкозернистой структуры наиболее существенен эффект дополнительной ионной бомбардировки, вводимой в процесс конденсации на самой ранней стадии роста пленок – стадии образования зародышей.

На основании проделанной работы была разработана технология осаждения многослойного покрытия системы $Ti-TiN$, реализованная на модернизированной установке ННВ 6.6-И1 и включающая:

бомбардировку поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом, которая производится с помощью плазменного источника «ПИНК» в среде инертного газа аргона, в результате чего происходит модификация поверхности и ее предварительная очистка;

дополнительную бомбардировку поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом;

испарение материала покрытия в вакууме;

осаждение ионов на поверхности с формированием слоя покрытия.

Бомбардировка поверхности ионами инертного газа аргона проводится для подготовки поверхности обрабатываемой детали перед нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий и заключается в термической активации поверхности, ее модификации и образовании центров зародышеобразования, что, в свою очередь, обеспечивает высокую адгезионную прочность покрытий.

Процесс предусматривает проведение всех операций в одном технологическом цикле. Совмещение основных технологических операций, сравнительная простота их реализации в одном вакуумном цикле определяют высокую эффективность ионно-плазменной технологии.

В качестве источника плотной однородной плазмы, генерируемой несамостоятельным дуговым разрядом низкого давления с накаливаемым катодом, может быть использован плазмогенератор «ПИНК».

Для реализации модификации поверхности в условиях дополнительной ионной бомбардировки может быть также использован разряд на основе эффекта полого катода [1, 2].

Сущность метода заключается в том, что с помощью специального экрана в виде сетки между обрабатываемой поверхностью и экраном формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц. Обрабатываемая поверхность детали становится поверхностью полого катода, что приводит к образованию вблизи нее структуры из плазмы и слоя пространственного заряда. В полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, и скорость ее распыления. Прикатодные области объемного разряда пере-

крывают расстояние между ячейками и отражают быстрые осциллирующие электроны, что увеличивает концентрацию заряженных частиц.

Экран подбирается таким образом, чтобы исключить уход электронов из полости, вследствие чего происходит интенсивная бомбардировка распыляемой поверхности ионами инертного газа.

Экран должен обладать максимальной геометрической прозрачностью для минимального экранирования металлической плазмы и минимального распыления сетки.

Технологический процесс синтеза вакуумных ионно-плазменных покрытий системы $Ti-TiN$ с СМК-структурой предполагает в едином операционном пространстве и цикле совмещение разрядов, горящих в парах Ti -катода и разряда на основе эффекта полого катода, выполняющего функцию дополнительной ионной бомбардировки. С помощью специального экрана в виде сетки формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц между обрабатываемой поверхностью и экраном. При этом поверхностью полого катода становится обрабатываемая поверхность детали. Возле нее возникает структура из плазмы и слоя пространственного заряда. В образовавшейся полости возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами между поверхностью детали и экраном. Рабочая среда – азот.

Перед осаждением многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий проводится бомбардировка поверхности ионами аргона для подготовки поверхности обрабатываемой детали. Кроме того, при проведении обработки происходит термическая активация поверхности и образование центров зародышеобразования, обеспечивая высокую адгезионную прочность.

Разработанная технология нанесения покрытий с СМК-структурой композиции $Ti-TiN$ включает:

- предварительную подготовку обрабатываемых деталей;
- загрузку обрабатываемых деталей в камеру и откачку воздуха из камеры;
- модификацию поверхности разрядом на основе эффекта полого катода в среде инертного газа аргона или проведение процесса с использованием плазмогенератора «ПИНК»;
- подачу рабочего газа азота в вакуумную камеру;
- нанесение многослойного защитного покрытия на основе композиции $Ti-TiN$ при одновременной дополнительной ионной бомбардировке поверхности разрядом на основе эффекта полого катода или с использованием плазмогенератора;
- охлаждение обработанных деталей в вакууме.

Следующей стадией технологии является плазменно-ассистированное нанесение многослойных покрытий композиции $Ti-TiN$. Нанесение покрытий с субмикроструктурной структурой проводится при давлении в камере 0,133 Па, потенциале на подложке 160 В и при токе

дуги электродугового испарителя 100 А. Осаждения покрытий проводится с одновременной дополнительной бомбардировкой разрядом на основе эффекта полого катода или с использованием плазмогенератора «ПИНК». В качестве переходного слоя использовался слой титана.

Библиографический список

1. Будилов, В.В. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов / В.В. Будилов, В.С. Мухин, С.Р. Шехтман // Физические основы и технические решения. М.: Наука, 2008. 194 с.
2. Белоус, В.А. Разработки НИЦ ХФТИ в области ионно-плазменных обработок конструкционных материалов (Обзор) / В.А. Белоус. Харьковская научная ассамблея, 2006. С. 60–73.
3. Пул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. М.: Техносфера, 2005. 336 с.
4. Schipachev, A. Optimum Conditions of Turning and Surface Plastic Deformation Determination Taking into Account Technological Heredity / A. Schipachev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1118 P. 012036.
5. Migranov, M.Sh. Composite nanostructured wear-resistant coatings for high-speed cutting processing / M.Sh. Migranov [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 25: Series: «25th International Conference on Vacuum Technique and Technology». 2018. P. 012053.
6. Афанасьева, Ю.Д. Технология нанесения покрытия $Ti-TiN$ на режущий инструмент / Ю.Д. Афанасьева, С.Р. Шехтман // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2018. Т. 22. № 3 (81). С. 3–9.
7. Мигранов, М.Ш. Трибологические свойства многослойных покрытий для режущего инструмента / М.Ш. Мигранов [и др.] // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 3. С. 304–309.

УДК 531.43

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова
Тверской государственной технической университет

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ НАГРУЗКИ И ЗАКОНЫ ТРЕНИЯ АМОНТОНА И КУЛОНА

Рассмотрены различные трактовки понятия коэффициента трения, основанные на законах Амонтона и Кулона и на простой операции деления силы трения на силу нормального давления. Показано их качественное и количественное различие. Приведены результаты экспериментов и численного моделирования, подтверждающие линейную зависимость силы трения от силы нормального давления.

Ключевые слова: закон Амонтона, закон Кулона, сила трения, коэффициент трения, нормальное давление.

THE LOAD DEPENDENCE OF A COEFFICIENT OF FRICTION AND AMONTONS' AND COULOMB'S LAWS OF FRICTION

The various interpretations of the concept of a coefficient of friction based on Amontons' and Coulomb's laws and on the trivial friction force division by a normal load have been considered. Their qualitative and quantitative difference has been shown. The experi-

mental and numerical simulation results have been presented, which confirm the linear dependence of a friction force on normal load.

Key words: Amontons' law, Coulomb's law, friction force, coefficient of friction, normal load.

Такое всем известное явление, как трение, с положительными и негативными проявлениями которого мы постоянно сталкиваемся и в технике, и в повседневной жизни, кажется привычным и хорошо изученным еще со школы. Даже не специалисту в трибологии знакомы такие понятия, как сила трения и коэффициент трения. Законы (закономерности) сухого трения – одни из первых естественно-научных законов, установленные еще Леонардо да Винчи. И.В. Крагельский и В.С. Щедров пишут в своей книге по истории трибологии: «Пользуясь современной символикой, можно записать результаты опытов Леонардо следующим образом: $T = fN$, где T – сила сопротивления скольжению (сила трения); N – давление тела на плоскость скольжения; f – величина, называемая в современной физике коэффициентом трения, причем $f = 0,25$ для гладких поверхностей» [1, с. 6].

Приведенная выше формула известна как закон Амонтона – по имени французского физика Г. Амонтона, который опубликовал результаты своих экспериментальных исследований трения в 1699 г. В 1785 г. другой знаменитый французский физик Ш. Кулон предложил уточненную формулировку закона трения, которая в современной записи обычно приводится в виде двучленной зависимости силы трения от силы нормального давления: $T = A + fN$, где величину A (силу трения в отсутствие силы нормального давления) Кулон считал следствием некоей «сцепленности» поверхностей [1]. Позднее эту величину стали связывать с молекулярным (адгезионным) взаимодействием контактирующих поверхностей.

Зададимся вопросом: каково физическое содержание приведенных законов и каков физический смысл входящей в них величины f , называемой коэффициентом трения.

Дадим слово самому автору закона. Первым пунктом он пишет (цит. по [1, с. 13]): «Сопротивление, создаваемое трением, возрастает и уменьшается пропорционально давлениям, величины которых больше или меньше в зависимости от того, велики или малы трущиеся поверхности».

Кстати, при желании ознакомиться с оригинальным текстом Амонтона не обязательно искать подлинник издания 1699 г. Можно обратиться к работе [2], в которой воспроизведен оригинал страницы мемуара Амонтона «*De la resistance cause dans les machines*» с авторскими формулировками законов трения.

Пропорциональность силы трения приложенной нормальной нагрузке трактуют как первый закон трения Амонтона и современные издания, например «Энциклопедия трибологии» [3].

Н.К. Мышкин и М.И. Петроковец приводят следующую формулировку закона Амонтона: «Сила трения *прямо пропорциональна* (курсив

наш – авт.) нормальной нагрузке», и далее подчеркивают, что коэффициент трения «как следует из приведенной формулировки, есть константа, не зависящая от нормальной нагрузки» [4, с. 48].

В.Л. Попов пишет: «Закон пропорциональности силы трения и нормальной силы известен как "закон Амонтона"» [5, с. 15].

Разумеется, как подчеркивают авторы работ [2, 5], так называемый первый закон Амонтона (закон пропорциональности силы трения силе нормального давления) – «грубое приближение, приближение нулевого порядка, лишь качественно описывающее реальность». Но в его простоте заключается и его достоинство, объясняющее его широкое применение на практике. Пропорциональность силы трения силе нормального давления приблизительно справедлива, безусловно, в ограниченном интервале нагрузок. Правда, иногда этот интервал может охватывать 6 порядков величины нормальной силы [5], но это, конечно, исключение. Но даже если коэффициент трения остается постоянным (с разумной погрешностью) в пределах одного порядка величины нормальной силы, этого обычно достаточно для практических целей.

Итак, суть первого закона Амонтона состоит в пропорциональности силы трения силе нормального давления, приложенной к контакту трущихся тел. С математической точки зрения пропорциональность – простейший вид функциональной зависимости между двумя величинами. В этом случае коэффициент трения в законе Амонтона $T = fN$ есть не что иное, как коэффициент пропорциональности между силой трения и нормальной силой. В этом случае он, разумеется, не должен зависеть от величин, функциональную связь которых он определяет, т. е. от T и N .

Именно как коэффициент пропорциональности между силой трения и силой давления трактует коэффициент трения Б.В. Дерягин [6, с. 109]. Он также считает, что «закон Амонтона не принадлежит к числу особо точных законов», и указывает, что коэффициент трения зависит от природы и состояния поверхностей трущихся тел и не зависит от их формы и числа точек контакта. Вопрос о зависимости коэффициента трения от нагрузки Б.В. Дерягин обходит молчанием.

Закон Кулона уже не позволяет говорить о пропорциональности силы трения силе нормального давления, так как из-за наличия постоянного члена $A = T(0)$ двукратное, к примеру, увеличение силы N не приведет к двукратному увеличению силы T . В этом случае можно говорить о том, что на смену пропорциональности пришел другой вид простейшей функциональной зависимости двух величин – линейная зависимость. Но и в этом случае с математической точки зрения подразумевается постоянство коэффициента f .

Вернемся к описанию результатов исследований Амонтона в его собственном изложении. Четвертым пунктом он пишет (цит. по [1, с. 14]):

«Сила трения находится в сложной зависимости от нормального давления, времени и скорости скольжения».

Действительно, во многих современных работах по исследованию самых различных пар трения можно найти примеры зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки (давления). Авторы данной статьи не являются в этом смысле исключением. Но тогда возникает формальное противоречие: если коэффициент трения f зависит от нагрузки N , то формулу $T = fN$ нельзя считать научным законом, ибо она в таком случае не устанавливает никакой устойчивой повторяющейся необходимой связи между физическими величинами – силой трения и силой нормального давления. Если бы существовала устойчивая повторяющаяся зависимость коэффициента трения f от силы N , тогда ее можно было бы подставить в формулу $T = fN$ и таким образом вернуть ей статус закона (правда, это был бы уже не закон Амонтона). Но несмотря на все усилия трибологов, такой зависимости не установлено.

Здесь уместно провести аналогию между двумя эмпирическими законами – законом Амонтона и законом Гука ($F = -kx$), выражающим зависимость силы упругости F от упругой деформации x . Коэффициент пропорциональности k называют коэффициентом жесткости или просто жесткостью.

Между прочим, законы Амонтона и Гука не только сходны математически, так как оба выражают пропорциональность двух величин, но и имеют одинаковую физическую природу: оба закона являются в конечном счете проявлением сил молекулярного взаимодействия.

Коэффициент жесткости k в формуле закона Гука по умолчанию считается величиной, не зависящей от деформации или нагрузки (по крайней мере в довольно широких пределах). Именно это условие лежит, например, в основе принципа действия пружинных весов и динамометров, в которых цена деления не зависит от нагрузки или деформации (равномерная шкала).

Другой пример – камертон – настроенный инструмент, издающий звук определенной частоты. Ножки камертона совершают гармонические колебания, которые возможны только в гармоническом осцилляторе, т. е. в системе, подчиняющейся закону Гука при $k = const$.

Однако при всем сходстве законов Амонтона и Гука между ними есть и существенное различие. Хотя оба закона эмпирические, закон Гука скорее можно отнести к детерминистским (или, как их еще называют, динамическим) законам, тогда как закон Амонтона – характерный пример закона стохастического. И это различие, как ни странно, кроется в их общей природе: упругость есть следствие молекулярных сил в объеме тела, а трение – проявление молекулярных сил на поверхности, где в игру вступает большое количество случайных, плохо контролируемых и плохо управляемых факторов. По этому поводу очень эмоционально высказался

В. Паули: «Бог создал объем, а поверхность – порождение дьявола» (по крайней мере ему приписывают это выражение).

Если признать стохастическую природу законов Амонтона и Кулона, то они приобретают смысл уравнений простейшей парной линейной регрессии, выражающей статистическую связь зависимой переменной (отклика) T от независимой переменной (предиктора) N . Закон Кулона представляет собой общий вид уравнения линейной регрессии, а закон Амонтона – частный случай. Коэффициенты уравнения регрессии A и f в этом случае находятся методами математической статистики. Коэффициенты уравнения регрессии и сама линейная зависимость между переменными должны иметь статистическую значимость, которая проверяется с помощью определенных статистических критериев. Обоснованность такой трактовки коэффициента трения мы покажем ниже.

Если же признать зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки, то тогда формула $T = fN$ становится просто определением коэффициента трения. Именно как отношение силы трения к нормальной силе, прижимающей трущиеся тела друг к другу, дает определение коэффициента трения ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» (действующий). Такое же определение дает и «Физическая энциклопедия» [7], и «Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин» [8]. Согласно такому определению, коэффициент трения представляет собой просто иную (безразмерную) форму выражения силы трения, подобно тому как относительная деформация ε в механике деформируемого твердого тела – безразмерная форма представления деформации тела. Такая трактовка коэффициента трения, безусловно, имеет право на существование, иногда безразмерная форма даже удобнее, хотя бы по причине независимости от выбора системы единиц. Но к смысловому содержанию закона Амонтона (*пропорциональность* величины силы трения силе нормального давления) она не имеет отношения.

Далее на некоторых примерах мы хотим показать различие коэффициентов трения в различном понимании смысла этой величины, а также еще раз подтвердить правомерность применения законов Амонтона и Кулона к различным парам трения. Для этого мы используем результаты численного и натуральных экспериментов.

Численная модель фрикционного контакта. На примере численной модели фрикционного контакта [9] рассмотрим зависимость силы трения и коэффициента трения от нормальной нагрузки. В модели расчет силы трения на площадке фактического контакта двух неровностей шероховатости контактирующих поверхностей производится на основании дву-членной зависимости И.В. Крагельского для удельной силы трения τ :

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r,$$

где τ_0 и β – параметры удельной силы трения; p_r – фактическое контактное давление. Параметры модельных поверхностей приведены в таблице.

Параметры модельных поверхностей

Материал	Параметры микрогеометрии		Механические свойства		Параметры удельной силы трения	
	Rp , мкм	r , мкм	E , ГПа	H , МПа	τ_0 , МПа	β
Сталь	4	150	200	6 000	100	0,02

Примечание. Rp – наибольшая высота выступов профиля; r – наибольший радиус кривизны вершин выступов шероховатости; E – модуль Юнга; H – микротвердость.

Параметры микрогеометрии соответствуют типичным значениям для такой технологии обработки поверхности, как плоское шлифование. Высоты выступов шероховатости и их радиусы как случайные величины подчиняются бета-распределению с параметрами формы $\alpha = \beta = 3$, что близко к нормальному распределению. Параметры удельной силы трения τ_0 и β соответствуют трению без смазочного материала и приняты на основании наших экспериментов. Высокая микротвердость контактирующих поверхностей обеспечивает условия упругого контактирования, о чем свидетельствует доля пластически деформированных выступов шероховатости, которая не превышала 6 %.

Результаты моделирования представлены на рис. 1. Чтобы не привязываться к конкретной номинальной площади контакта, результаты представлены в относительных величинах.

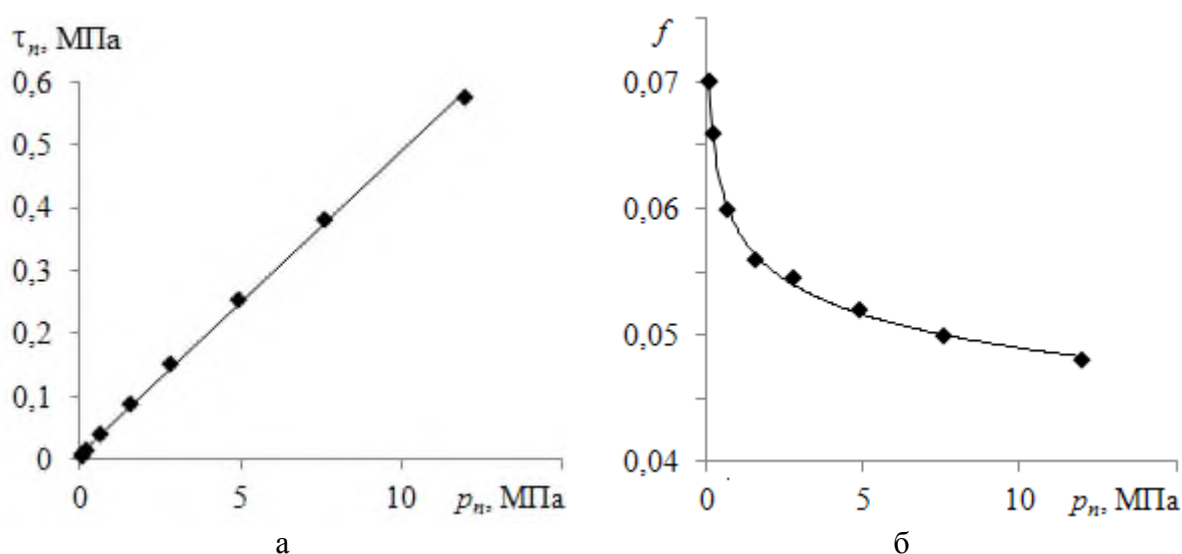


Рис. 1. Результаты моделирования фрикционного контакта:

а – зависимость номинального касательного напряжения в контакте от номинального контактного давления;

б – зависимость коэффициента трения от номинального контактного давления.

Точки – результаты моделирования; линии – аппроксимирующие зависимости

На рис. 1а представлена зависимость номинального касательного напряжения в контакте τ_n (отношение силы трения T к номинальной площади контакта A_n) от номинального контактного давления p_n (отношение

нормальной силы N к номинальной площади контакта A_n). Как видно, зависимость хорошо описывается линейной функцией. На рис. 1б представлена зависимость коэффициента трения $f = T/N = \tau_n/p_n$ от номинального контактного давления, из которой видно, что данный коэффициент трения зависит от нормальной нагрузки. Несмотря на это, методами математической статистики были определены коэффициенты линейной регрессии по Амонтону ($\tau_n = f_A p_n$) и Кулону ($\tau_n = \tau_{n0} + f_C p_n$). Они оказались следующими: $f_A = 0,049 \pm 0,001$; $f_C = 0,048 \pm 0,002$; $\tau_{n0} = 0,008 \pm 0,007$ МПа.

Доверительные интервалы у коэффициентов рассчитаны при 95 % доверительной вероятности.

Все коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,05$, что позволяет принять гипотезу о линейной зависимости силы трения от нормального давления.

Отметим, что коэффициент трения по Амонтону f_A несколько больше, чем коэффициент трения по Кулону f_C . Рассчитанный же как отношение силы трения к силе нормального давления коэффициент трения f при малых нагрузках почти в полтора раза превосходит аналогичные значения по Амонтону и Кулону.

Здесь уместно будет заметить, что моделирование фрикционного взаимодействия на наномасштабном уровне методами молекулярной динамики приводит к линейной зависимости между силой трения T и приложенной к контакту нормальной силой N [10] в диапазоне $N < 800$ нН. Исключение составляет начальная область нагрузок $N < 200$ нН.

Экспериментальные результаты. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований трения различных фрикционных пар в различных условиях с целью сопоставления различных трактовок коэффициента трения.

На рис. 2 представлены зависимости силы трения и коэффициента трения $f = T/N$ от силы нормального давления для пары трения «алюминиевая бронза – хромистая термообработанная сталь» [11].

Эксперимент проводился при больших контактных давлениях, таким образом заведомо обеспечивался пластический характер контакта. Подобные условия аналогичны, например, условиям фрикционного взаимодействия при обработке металлов давлением и в других процессах пластического формоизменения деталей.

Коэффициенты линейной регрессии по Кулону (закон Амонтона в этом случае, очевидно, не выполняется) следующие: $f_C = 0,075 \pm 0,013$; $T(0) = 0,030 \pm 0,014$ кН. Доверительные интервалы также рассчитаны при 95 % доверительной вероятности.

Все коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,05$, что позволяет принять гипотезу о линейной зависимости силы трения от нормального давления.

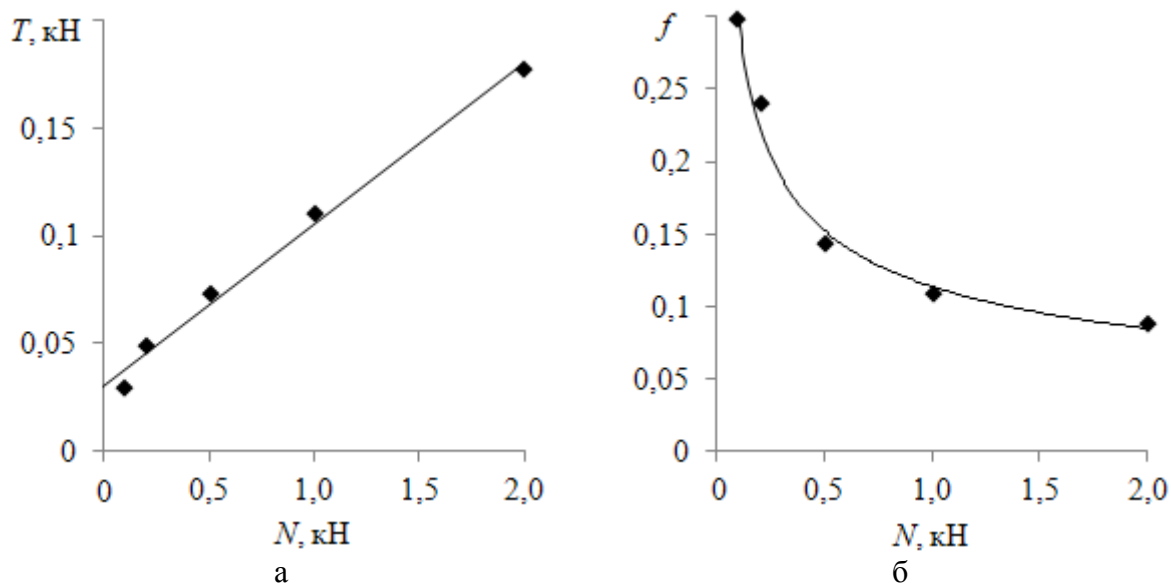


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования пары трения «алюминиевая бронза – хромистая сталь»: а – зависимость силы трения от силы нормального давления; б – зависимость коэффициента трения от силы нормального давления. Точки – результаты моделирования; линии – аппроксимирующие зависимости

Из рис. 2б следует, что коэффициент трения $f = T/N$ убывает с ростом нормального давления, меняясь в исследованных пределах примерно в 3 раза.

Вторая серия экспериментов отражает результаты исследования трения покоя при малых нагрузках. Отметим, кстати, что одна из заслуг Ш. Кулона в исследовании трения – то, что он первый из исследователей четко разделял трение скольжения и трение покоя и экспериментально исследовал последнее.

Эксперименты, о которых пойдет речь, проводились по схеме «шар – плоскость» при наличии и отсутствии смазочного материала. Нагрузка на шаровой образец изменялась в пределах 0,5...5,0 мН, что обеспечивало условия упругого контакта.

На рис. 3 приведены результаты эксперимента для пары трения двух стальных поверхностей из хромистой термообработанной стали высокой твердости. Шероховатость поверхности Ra не больше 0,04 мкм.

Коэффициенты линейной регрессии по Кулону (закон Амонтона в этом случае также не выполняется) следующие: $f_c = 0,120 \pm 0,005$; $T(0) = 0,15 \pm 0,02$ мН. Доверительные интервалы также рассчитаны при 95 % доверительной вероятности. Из рис. 3б следует, что коэффициент трения $f = T/N$ убывает с ростом нормальной нагрузки, уменьшаясь в исследованном диапазоне изменения последней более чем в 2 раза.

На рис. 4 представлены результаты эксперимента с той же фрикционной парой «сталь – сталь», но при наличии смазочного материала – тонкой пленки олеиновой кислоты.

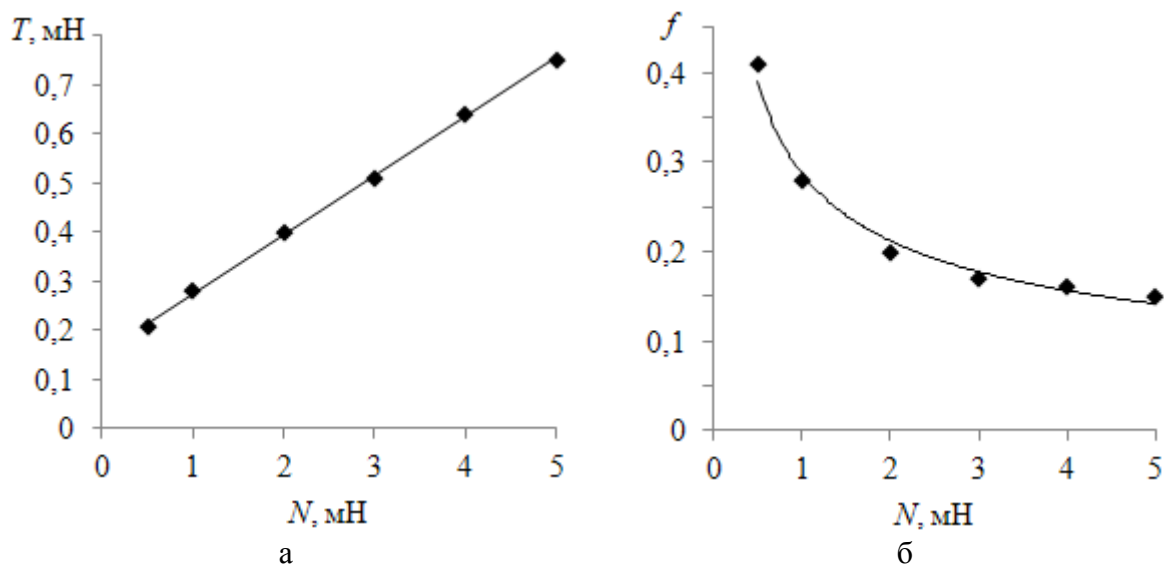


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования пары трения «сталь – сталь» без смазочного материала: а – зависимость силы трения от нормальной нагрузки; б – зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки

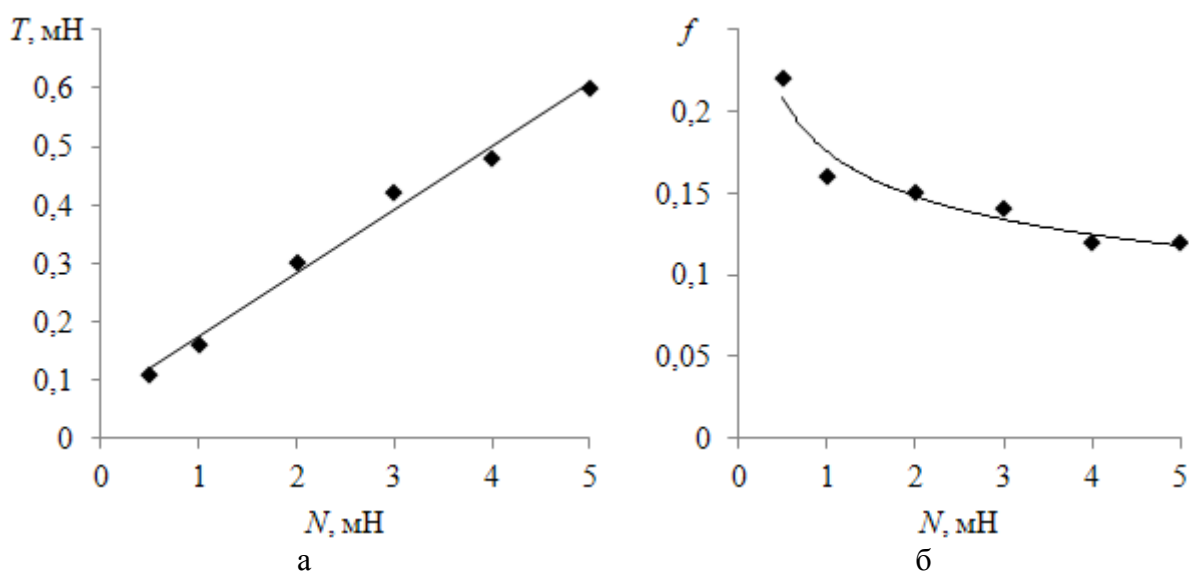


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования пары трения «сталь – сталь» со смазочным материалом – олеиновой кислотой: а – зависимость силы трения от нормальной нагрузки; б – зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки

Коэффициенты линейной регрессии следующие: по Амонтону – $f_A = 0,127 \pm 0,014$; по Кулону – $f_C = 0,108 \pm 0,015$; $T(0) = 0,065 \pm 0,047$ мН. Доверительные интервалы также рассчитаны при 95 % доверительной вероятности. Все коэффициенты статистически значимы на уровне $p < 0,05$.

Как видим, в этом случае линейная регрессия в простейшем виде – в виде закона Амонтона – также статистически значима. Это можно объяснить тем, что величина $T(0)$ – сила трения в отсутствие нормальной нагрузки – с учетом погрешности мало отличается от нуля.

Из рис. 4б следует, что коэффициент трения $f = T/N$ и в этом случае убывает с ростом нормальной нагрузки, но изменение его меньше, чем при трении без смазочного материала.

Заканчивая раздел, посвященный экспериментальным исследованиям, уместно будет отметить, что экспериментальные исследования трения на наномасштабном уровне в диапазоне нормальных нагрузок от нескольких наноньютонов до 100 нН показывают, что с очень хорошей точностью сила трения пропорциональна нормальной нагрузке [10].

Заключение. Прежде чем подвести итоги, хочется привести еще одну цитату. Обсуждая закон Амонтона, авторы статьи [10] отмечают, что, несмотря на известные его нарушения, он «удивительно хорошо описывает большинство трущихся поверхностей, включая смазанные и несмазанные контакты, пластичные и хрупкие, шероховатые и гладкие поверхности (за исключением адгезионных), макроскопические и микроскопические контакты».

В данной статье мы хотели обратить внимание на то, что возможны различные трактовки понятия «коэффициента трения». Первая основана на законах трения Амонтона и Кулона и состоит в трактовке коэффициента трения как коэффициента пропорциональности между силой трения и силой нормального давления (закон Амонтона) или как коэффициента в двучленной линейной зависимости силы трения от нормальной силы (закон Кулона). В таком случае они должны, на наш взгляд, определяться как коэффициенты линейной регрессии методами математической статистики с оценкой их статистической значимости. Определенный таким образом коэффициент трения считается постоянным в том диапазоне нагрузок, для которого он рассчитан.

Согласно второй трактовке, коэффициент трения есть просто отношение силы трения к силе нормального давления. В этом случае его можно считать зависящим не только от материалов пары трения, состояния поверхности и других факторов, но и от нормальной нагрузки.

Первая трактовка, на наш взгляд, представляет интерес с практической точки зрения, особенно если использовать закон Амонтона ввиду его простоты. Формула $T = f_A N$ удобна при проектировании различных фрикционных узлов, когда необходимо прогнозировать изменение силы трения с изменением нормальной нагрузки в некотором диапазоне, обычно известном. Погрешность в расчетах силы трения, связанная с приближенным характером закона Амонтона, компенсируется неизбежным влиянием на процесс трения многих порой плохо контролируемых факторов (температуры, состояния поверхности, влажности и химического состава атмосферы, состояния смазочного материала и т. д.), из-за чего точность расчета силы трения объективно невысока.

Вторая трактовка коэффициента трения (как отношение силы трения к силе нормального давления) представляет скорее академический интерес, когда исследуется физическая природа фрикционных процессов и влияние

различных факторов на процессы трения и изнашивания. Но в этом случае, на наш взгляд, более информативной величиной является удельная сила трения – аналог критического напряжения сдвига в механике деформируемого твердого тела.

Коэффициент трения может в этом случае служить удобной (безразмерной) формой представления удельной силы трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 17-08-00614.

Библиографический список

1. Крагельский, И.В. Развитие науки о трении / И.В. Крагельский, В.С. Щедров. М.: изд. АН СССР, 1956. 236 с.
2. Popova, E. The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction / E. Popova, V.L. Popov // Friction. 2015. V. 3. № 2. P. 183–190.
3. Blau, P.J. Amontons' Laws of Friction. / P.J. Blau // Encyclopedia of Tribology. Boston: Springer, 2013. P. 71.
4. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
5. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В.Л. Попов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
6. Дерягин, Б.В. Что такое трение / Б.В. Дерягин. М.: Изд. АН СССР, 1963. 232 с.
7. Физическая энциклопедия. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1998. Т. 5. С. 165.
8. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: «Наукова думка», 1990. С. 97.
9. Измайлов, В.В. Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин / В.В. Измайлов, С.А. Чаплыгин // Интернет-журнал «Наукосведение». 2014. № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf>
10. Jianping Gao. Frictional Forces and Amontons' Law: From the Molecular to the Macroscopic Scale / Jianping Gao [et al.] // J. Phys. Chem. B. 2004. V. 108. № 11. P. 3410–3425.
11. Измайлов, В.В. О методиках экспериментального определения удельной силы трения и ее параметров / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, С.А. Чаплыгин // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 5. С. 435–444.

УДК 621.822

И.В. Горлов, А.Н. Болотов
Тверской государственной технической университет

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Изложены результаты исследований изменения триботехнических свойств материалов при низких температурах в условиях сухого трения. Исследования проводились на полимерных материалах, работающих в широких интервалах температур. Модифицированный полиамид ПА 6 по результатам испытаний показал лучшие характеристики.

Ключевые слова: трение, износ, ремонт, антифрикционные материалы.

THE CHANGES OF THE PROPERTIES OF POLYMERIC FRICTION UNITS AT LOW TEMPERATURES

The results of the study of changes in the tribological properties of materials at low temperatures under dry friction conditions have been stated. The studies were conducted on polymeric materials operating in wide temperature ranges. The modified polyamide PA6 according to the test results showed the best characteristics.

Key words: friction, wear, repair, antifriction materials.

Ресурс большинства узлов трения в значительной степени зависит от свойств материалов, которые используются для их изготовления. Традиционно применяемые для подшипников скольжения материалы, работающие в режимах сухого трения, не всегда соответствуют эксплуатационным требованиям. Например, опорный подшипник тележки пассажирского вагона эксплуатируется в условиях значительных перепадов температур, высокой влажности и запыленности. При движении железнодорожного состава с юга нашей страны на север перепад температур может составлять более 60 градусов. Традиционно используемый для этого узла материал не соответствует рекомендациям ВНИИЖТ. Рекомендуемый коэффициент трения должен быть в пределах 0,15...0,17 [1].

В статье представлены результаты исследований ряда материалов для вкладыша скользуна опоры тележки пассажирского вагона. Исследования проводились на специально разработанном устройстве [2, 3], которое реализует схему трения «торец пальчика – плоскость» с автоматической системой регистрации величины силы трения. Условия испытаний: движение возвратно-вращательное, амплитуда около 100 мм, скорость движения изменяется от 0 до 0,01 м/с, давление 3,3...3,8 МПа. Контртело в виде кольца выполнено из стали 40Х, шероховатость рабочей поверхности $Ra = 0,16...0,32$, твердость $HRC50$, в соответствии с параметрами рассматриваемого узла.

Коэффициент трения для углепластика ОПМ-94 составил от 0,22 до 0,26, что не соответствует рекомендациям ВНИИЖТ. На рис. 1а показано изменение силы трения за один цикл перемещения образца. Линейная интенсивность изнашивания этого материала составила $4,3 \cdot 10^{-8}$. Увеличение коэффициента трения углепластика ОПМ-94 в процессе испытаний объясняется изменением состояния поверхности контртела за счет образования пленки переноса из углепластика (частицы смолы и графита) и снижения шероховатости поверхности.

Снизить коэффициент трения можно за счет увеличения количества углерода в поверхностном слое антифрикционного материала, но при этом снижается его прочность. Поэтому для увеличения количества графита в зоне трения можно использовать его в виде вставок на локальных участках. Для этого в центр пальчикового образца диаметром 8 мм устанавливался графитный стержень диаметром 2 мм. После испытаний на контртеле появился характерный след переноса графита шириной около 3 милли-

метров, коэффициент трения снизился незначительно, но сила трения стала более стабильной (рис. 1б).

На следующем этапе проводились исследования ОПМ-94 со вставкой графита через всю поверхность скольжения образца. След переноса графита на контртеле был по всей поверхности трения, при этом коэффициент трения снизился до 0,2...0,23, но этого недостаточно для указанного узла.

Далее проводились аналогичные испытания на графитонаполненном полиамиде ПА6 (торговая марка Капролон-42), коэффициент трения был достаточно стабилен – от 0,13 до 0,16 (рис. 1в).

Причем при скоростях, близких к нулю, не наблюдался существенный рост силы трения, т. е. уровень фрикционных потерь в режиме старт-стоп невелик, и это может положительно сказаться на плавности хода вагона [4]. Линейная интенсивность изнашивания образцов составила $4,05 \cdot 10^{-8}$.

При испытаниях маслонаполненного (при полимеризации) полиамида ПА6 (торговая марка *PA6 Oilon*) коэффициент трения изменялся от 0,16 до 0,2, причем в пределах одного цикла был менее стабильным, чем у графитонаполненного полиамида (рис. 1г).

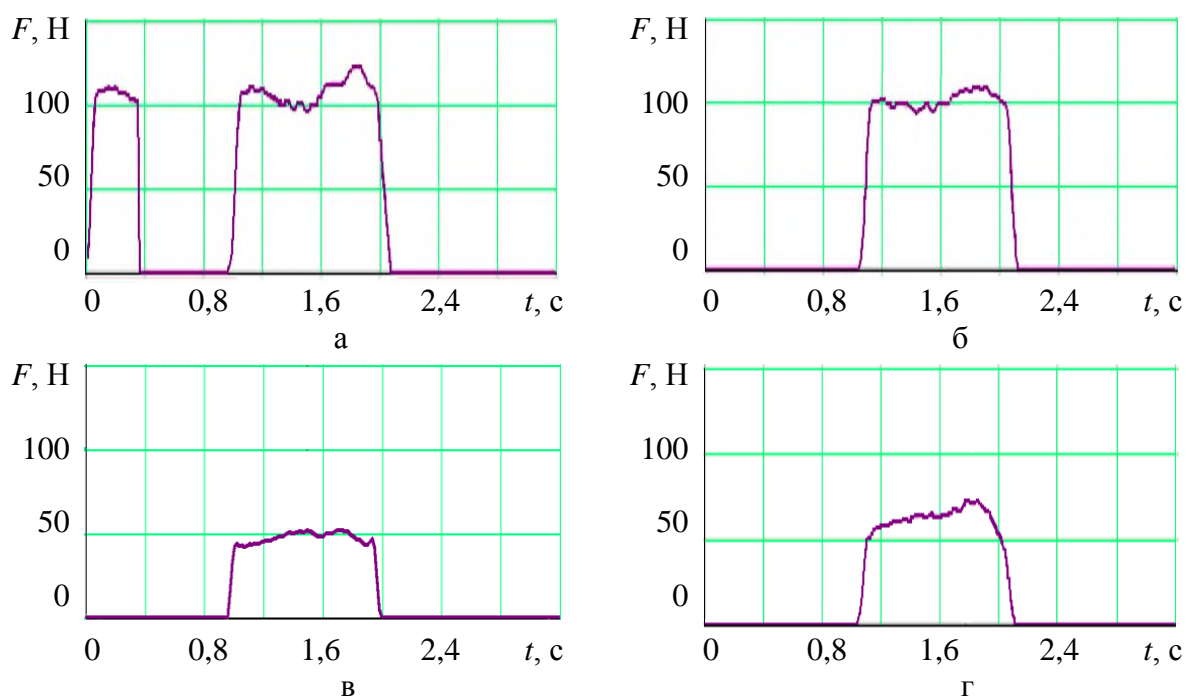


Рис. 1. Изменение силы трения за один цикл при испытаниях:
а – углепластика ОПМ-94; б – углепластика ОПМ-94 со вставкой графита диаметром 2 мм;
в – графитонаполненного полиамида ПА6; г – маслонаполненного полиамида ПА6

Коэффициент трения маслонасыщенного полиамида ПА6 был достаточно стабилен и изменялся от 0,12 до 0,14 (рис. 2). При изготовлении данного материала за основу был взят Капролон-42 и насыщен за счет капиллярного эффекта минеральным маслом [5].

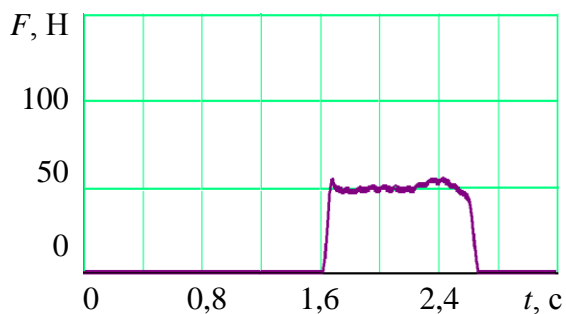


Рис. 2. Изменение силы трения за один цикл в начале испытаний маслонасыщенного полиамида ПА6

Линейная интенсивность изнашивания образцов из маслонасыщенного полиамида ПА6 составила $3,45 \cdot 10^{-8}$.

Анализ результатов испытаний показал, что лучшей совокупностью фрикционно-износных характеристик в данных условиях обладает маслонасыщенный полиамид ПА6 (табл. 1).

Таблица 1. Триботехнические свойства антифрикционных материалов

Материал	Коэффициент трения при 20 °С	Интенсивность изнашивания J_h , 10^{-8}
Углепластик ОПМ-94	0,22...0,26	4,3
Графитонаполненный полиамид ПА6	0,13...0,16	4,05
Маслонаполненный полиамид ПА6	0,14...0,2	7,25
Маслонасыщенный полиамид ПА6	0,12...0,14	3,45

Испытания при низких температурах проводились в морозильной камере ОАО ТИВ (Тверской институт вагоностроения).

Устройство для испытаний материалов устанавливалось на пол морозильной камеры, контроль температуры окружающего воздуха осуществлялся с помощью температурного датчика, подвешенного на высоте 500 мм, что на 200 мм выше, чем находится исследуемая пара трения. Такая установка датчика позволяла учитывать некоторое запаздывание снижения температуры испытываемого узла трения.

Во время испытаний при низких температурах исследовались материалы: ОПМ-94, маслонаполненный полиамид ПА6, графитонаполненный полиамид ПА6 и маслонасыщенный полиамид ПА6. Измерения силы трения проводились при температурах: 0, -15, -30, -40 и -50 °С. Так как характеристики некоторых материалов сильно отличались от рекомендуемых ВНИИЖТ, то исследования для них проводились в сокращенном объеме. Для материала ОПМ-94 не проводились исследования при температуре -50 °С, для маслонаполненного ПА6 – при 0 и -15 °С.

При низких температурах существенно изменяются условия трения, возрастает твердость полимеров, изменяются адгезионные свойства материалов. Проведенные исследования при низких температурах показали, что коэффициент трения в начале движения и в конце цикла ниже, чем при максимальной скорости движения, это может объясняться снижением адгезионной и увеличением механической составляющей силы трения (рис. 3).

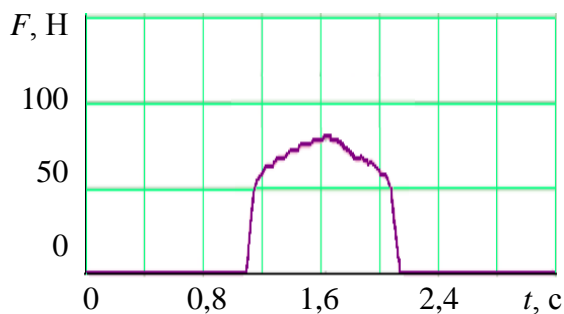


Рис. 3. Изменение силы трения за один цикл движения при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, материал – маслонасыщенный полиамид ПА6

Результаты исследования триботехнических характеристик рассматриваемых материалов при низких температурах представлены в табл. 2.

Исследования показали, что маслонасыщенный ПА6 имеет параметры трения, наиболее близкие к рекомендациям ВНИИЖТ по коэффициенту трения вкладыша скользуна пассажирского вагона. Для дальнейшего улучшения три-

ботехнических параметров рассматриваемого узла необходимы дополнительные исследования влияния низких температур на механизм трения самосмазывающихся полимеров.

Таблица 2. Результаты исследования материалов при низких температурах

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент трения			
	ОПМ-94	Маслонаполненный ПА6	Графитонаполненный ПА6	Маслонасыщенный ПА6
0	0,17...0,19	-	0,16...0,18	0,15...0,17
-15	0,18...0,21	-	0,17...0,19	0,15...0,18
-30	0,22...0,26	0,2...0,23	0,17...0,2	0,16...0,19
-40	0,22...0,28	0,2...0,22	0,18...0,2	0,15...0,19
-50	-	0,19...0,22	0,18...0,2	0,15...0,18

Библиографический список

1. Быков, Б.В. Конструкция тележек грузовых и пассажирских вагонов / Б.В. Быков. М.: Маршрут, 2004. 36 с.
2. Горлов, И.В. Испытания материалов для тяжело нагруженных узлов трения / И.В. Горлов [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. Вып. 7. С. 81–85.
3. Горлов, И.В. Устройство для испытания материалов для тяжело нагруженных узлов трения / И.В. Горлов [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. Вып. 7. С. 73–81.
4. Хусидов, В.В. Динамика пассажирского вагона и пути модернизации тележки КВЗ-ЦНИИ / В.В. Хусидов [и др.]. М.: МИИТ, 2001. 160 с.
5. Горлов, И.В. Повышение ресурса технологических машин за счет модификации материалов узлов трения / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, М.Г. Рахутин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. 2017. Вып. 10. С. 65–68.

УДК 621.892

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков, Г.Б. Бурдо
Тверской государственной технической университет

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Часть 2. Дисперсная фаза и ПАВ-стабилизатор магнитных масел

Сформулированы основные требования к ПАВ-стабилизатору коллоидных частиц магнитных масел. Показан новый подход к выбору ПАВ-стабилизаторов коллоидной структуры масел с учетом их диэлектрических свойств и особенностей влияния на трение. Предложены ПАВ-стабилизаторы различной химической структуры для масел на основе диэфиров и некоторых кремнийорганических жидкостей.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитное масло, дисперсная фаза, стабилизатор, дисперсионная среда, трение, износ.

ENGINEERING PRINCIPLES OF MAGNETIC LUBRICANT SYNTHESIS.

Part 2. Dispersed phase and surfactant-stabilizer for magnetic oils

The basic requirements to the surfactant stabilizer of colloidal particles of magnetic oils have been formulated. A new approach to the choice of surfactant stabilizers of a colloidal structure of oils with regard for their dielectric properties and features of the effect on friction has been shown. Surfactant stabilizers of various chemical structure for oils based on diesters and certain silicone fluids has been proposed.

Key words: magnetic fluid, magnetic oil, dispersed phase, stabilizer, dispersion medium, friction, wear.

Магнитные жидкости, относящиеся к классу гибридных наноматериалов, созданы более тридцати лет назад, но научный и практический интерес к ним остается очень высоким. Большое внимание уделяется проблемам применения магнитных жидкостей для смазывания триботехнических узлов [1].

Принципиальной отличительной особенностью магнитных масел, обуславливающей их уникальные триботехнические свойства, является высокая намагниченность насыщения. Но область применения магнитных смазочных масел ограничивается экономическими причинами – достаточно высокой стоимостью масла, магнитной системы и т. д. В связи с этим наиболее востребованы магнитные смазочные масла в космической и авиационной технике, робототехнике и химическом машиностроении, для смазки трибоузлов, работающих при граничном или смешанном трении, смазываемых дискретно через значительные промежутки времени, причем ограниченным объемом масла [2–7].

Представление о магнитных смазочных материалах (маслах) как об адаптированных к условиям граничного трения (например, с помощью присадок) традиционных трехкомпонентных магнитных жидкостях явля-

ется совершенно неверным. Именно потому, что в магнитожидкостных трибоузлах пытались использовать стандартные магнитные жидкости, а не специально созданные магнитные смазочные масла, эти узлы не показали убедительных преимуществ, и научный интерес к ним стал угасать. Стало понятно, что магнитные смазочные масла изначально должны синтезироваться с учетом специфических требований, предъявляемых к их структуре и свойствам, с опорой на обширный технологический опыт получения магнитных жидкостей [8, 9].

В первой части настоящей обзорной статьи [10] рассматривался трибологический анализ перспективных жидкостей для дисперсионной среды магнитных масел. Остановимся на подходах к выбору материала дисперсионной фазы магнитных масел и поверхностно активных веществ (ПАВ), в качестве адсорбтива стабилизирующих коллоидную структуру масел.

Дисперсная магнитная фаза. Для синтеза магнитных масел использовался высокодисперсный магнетит, полученный хорошо изученным методом химической конденсации [8]. Частицы магнетита имели характерный размер от 5 до 17 нм (средний размер около 10 нм); намагниченность насыщения составляла около 430 кА/м. Поверхность частиц обладала хорошей адсорбционной способностью, что было важно для обеспечения их коллоидной стабилизации. В некоторых магнитных маслах на основе полиэтилсилоксана применялись дисперсные частицы из карбонильного железа, полученные термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$ в жидкости-носителе с различным содержанием ПАВ. Средний размер железных магнитных частиц составлял около 5 нм, характерная намагниченность насыщения полученных масел – 20...40 кА/м. Микротвердость частиц магнетита – около 5 ГПа, микротвердость частиц карбонильного железа примерно на порядок меньше. Известно [6], что дисперсные частицы и образованные из них агломераты размерами до $10^{-7}...10^{-6}$ м при тяжелых режимах трения могут вызывать разрушение смазанных магнитным маслом поверхностей посредством микрорезания и многоциклового пластического передеформирования. Поэтому для снижения абразивной составляющей результирующего износа при граничной смазке следует выбирать материалы трения, у которых твердость в 1,3...1,6 раза выше, чем у дисперсных частиц.

Выбор ПАВ для стабилизации коллоидной структуры масел. Для стабилизации коллоидных частиц применяют поверхностно активные вещества, которые адсорбируются на поверхности магнетита и предотвращают агломерацию магнитных частиц, а также обеспечивают седиментационную стабильность коллоида в гравитационных и магнитных полях. Наиболее хорошо зарекомендовали себя ПАВ, содержащие длинноцепочечные дифильные молекулы с полярными функциональными группами OH , NH_2 , $COOH$, OS_3H . Если дисперсионная среда содержит поверхностно активные компоненты, как в случае магнитных смазочных масел, то пред-

почтительной является прочная (необратимая) химическая, а не физическая, адсорбция стабилизатора, чтобы исключить конкуренцию при адсорбции различных молекул после термоактивированной десорбции.

Для стабилизации магнитного коллоида при получении магнитных смазочных масел к ПАВ-стабилизатору предъявляется ряд дополнительных требований. Во-первых, ПАВ, растворенное в дисперсионной среде магнитных масел, не должно оказывать отрицательное воздействие на смазочные свойства масла и, во-вторых, адсорбционные оболочки на частицах должны быть устойчивы к термомеханическим воздействиям в зоне трибоконтакта.

Некоторые общие рекомендации по предварительному выбору ПАВ-стабилизатора, которые касаются размеров и конфигурации молекул, предпочтительной ориентации их на поверхности в адсорбированном состоянии, растворимости и относительной концентрации, приведены в [8, 9].

ПАВ-стабилизатор для магнитных масел на основе диэфиров. На практике для окончательного выбора ПАВ-стабилизатора для масел, как правило, приходится прибегать к экспериментальному анализу устойчивости опытных магнитных коллоидов. Вначале из общих соображений очерчивается круг ПАВ, подходящих для стабилизации магнитных масел.

Наиболее распространенными стабилизаторами магнитных коллоидов являются жирные кислоты (олеиновая, стеариновая и др.). Особенности структуры их молекул – оптимальное соотношение между посадочной площадкой и длиной углеводородного радикала, а также присутствие адсорбционно-активной концевой группы $COOH$, способной к хемосорбции, – определяют высокое стабилизирующее действие этих кислот. Магнитные масла, стабилизированные жирными кислотами, являются наиболее устойчивыми в неоднородных магнитных полях и в поле сил тяжести. В то же время жирные кислоты в определенных условиях могут облегчать разрушение поверхностей трения согласно эффекту Ребиндера и вызывать их коррозию (табл. 1).

Для опытного определения наиболее подходящего стабилизатора диэфиров были выбраны две ненасыщенные жирные кислоты – олеиновая (ОК) и рицинолевая (РК). Наряду с этим изучалась стабилизирующая способность алкидной производной олеиновой кислоты (МСДА), олигоэфира на основе этилена с фосфорсодержащей полярной группой (Алфонокс) и олигоэфира ОЭ-3, синтезированного непосредственно на поверхности магнитных частиц.

Для экспресс-оценки стабилизирующей способности ПАВ полученные магнитные коллоиды испытывали на стабильность в поле, аналогичном гравитационному. Фиксированный объем магнитного масла (40 мл) загружали в центрифугу и выдерживали в течение 2 часов при центробежном ускорении около 5 600g. По окончании испытания контролировали отделение дисперсионной среды и фиксировали падение намагниченности

из-за перехода магнетита в осадок. Учитывая, что намагниченность коллоида линейно зависит от концентрации дисперсных частиц, количественную оценку стабильности полученных коллоидов проводили по относительно-му изменению намагниченности в поле центробежных сил. Результаты испытаний магнитной жидкости на основе диоктилсебагината (ДОС) представлены в табл. 1. Исследования проводились на экспериментальных установках, описанных в [11, 12].

Таблица 1. Коллоидная стабильность магнитных жидкостей и смазочная способность растворов ПАВ в диоктилсебагинате

ПАВ-стабилизатор	Магнитный коллоид			Фрикционные характеристики (машина трения МТП, раствор ПАВ в ДОС)	
	ϵ_p	$\Delta J_s/J_s, \%$	$\Delta V, \text{мл}$	f	$I_h, 10^{-9}$
ОК	2,43	100	> 30	0,13	0,95
МСДА	3,40	57	10	0,15	0,70
ОЭ-3	4,95	4,8	0	0,14	0,42
РК	4,91	5,6	0	0,14	0,31
Альфонокс	6,30	69	11	0,15	0,60

Примечание. ϵ_p – диэлектрическая проницаемость ПАВ; $\Delta J_s/J_s$ – относительное изменение намагниченности J_s коллоида; ΔV – объем отделившейся основы; f – коэффициент трения; I_h – линейная интенсивность изнашивания.

Из табл. 1 видно, что наиболее устойчивые магнитные коллоиды получаются при использовании в качестве стабилизаторов рицинолевой кислоты и олигоэфира ОЭ-3.

Исследование состава дисперсионной среды методом ИК-спектроскопии, а также отделенной от магнитной фазы жидкости-носителя на рефрактометре показали, что при правильном расчете количества стабилизатора и тщательной пептизации содержание ПАВ в свободном состоянии составляет не более 1 %. Исходя из этого, влияние стабилизатора на фрикционные характеристики дисперсионной среды изучали на однопроцентных модельных растворах ПАВ в ДОС. Сравнение смазочных свойств растворов ПАВ (см. табл. 1) свидетельствует о положительном влиянии РК и ОЭ-3 на фрикционные и противоизносные свойства.

На основании проведенных опытов можно сделать вывод, что наиболее подходящими для стабилизации магнитных частиц являются ненасыщенные жирная кислота (РК) и олигоэфир ОЭ-3. Поэтому дальнейшие работы по созданию технологии синтеза устойчивых магнитных масел на основе диэфиров велись с использованием стабилизаторов РК и ОЭ-3.

ПАВ-стабилизаторы для магнитных масел с кремнийорганической дисперсионной средой. На основе вышеприведенных результатов исследований был предложен диэлектрический критериальный параметр E [13], существенно облегчающий выбор ПАВ-стабилизатора. Критериальный параметр E показывает относительное различие диэлектрических проницае-

мостей компонентов: $E = |\epsilon_p - \epsilon_r| / \epsilon_p$, где ϵ_r – диэлектрическая проницаемость ПАВ; ϵ_p – диэлектрическая проницаемость основы. В соответствии с этим критерием диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды должна незначительно отличаться от аналогичной характеристики ПАВ-стабилизатора. В противном случае процессы десорбции молекул ПАВ с магнитных частиц способствуют снижению качества защитных адсорбционных слоев, и коллоидная устойчивость ухудшается. На практике для окончательного выбора ПАВ-стабилизатора нельзя обойтись без экспериментального анализа устойчивости опытных коллоидов.

Традиционно для стабилизации кремнийорганических магнитных жидкостей на основе полиэтилсилоксана (ПЭС-5, ПЭС-4, ПЭС-В-2 и др.) и содержащих дисперсный магнетит используют олеиновую кислоту [8, 9]. Полученные магнитные масла имеют хорошую коллоидную устойчивость и намагниченность насыщения до 30 кА/м.

Исследования магнитных масел показали [14], что их фрикционные свойства могут быть очень чувствительны к избыточному содержанию в дисперсионной среде масла ПАВ-стабилизатора коллоидной структуры. Стабилизатор активирует негативные процессы коррозионно-механического изнашивания трущихся поверхностей, особенно выполненных из металлических сплавов.

Поэтому, если предполагается использовать магнитное масло на основе ПЭС-5 в качестве смазочного материала, то необходимо исключить содержание растворенной в дисперсионной среде жирной кислоты технологическими методами. В противном случае даже содержание менее 1 % свободной олеиновой кислоты в магнитном масле на основе ПЭС-5 приводит к повышению износа в 1,5...2 раза вследствие проявления внутреннего эффекта Ребиндера и коррозионного разрушения поверхностей (табл. 2, свойства ПЭС-5 и раствора ПЭС-5 с олеиновой кислотой).

Для стабилизации магнитных масел на основе ПЭС-5 с магнитными наночастицами карбонильного железа хорошо подошел хлорфенилсилоксан ХС-2-1ВВ. Химическая адсорбция молекул жидкости ХС-2-1ВВ происходила непосредственно во время синтеза магнитных частиц при температуре 200 °С на их каталитически активной поверхности. Стабилизатор ХС-2-1ВВ, растворенный в несущей среде ПЭС-5, благоприятно влияет на фрикционные свойства смазочной композиции (табл. 2): процесс трения становится более плавным, коэффициент трения и износ снижаются во всем диапазоне нагрузок.

Получены опытные партии магнитных смазочных масел на основе ПЭС-5, в которых для повышения термической устойчивости и снижения низкотемпературной вязкости жидкости стабилизатором выступали кремнийорганические триметилсилиллированные этилсиликаты с содержанием в олигомере до 20 % остаточных гидроксильных и этоксильных групп при кремнии (олигомеры МКС-2-0). Олигомер МКС-2-0 хорошо растворяется в

несущей жидкости магнитных масел и благодаря наличию поверхностно-активных этоксильных групп активно адсорбируется на поверхностях магнетита и трущихся деталей. Однако данный олигомер не может должным образом модифицировать поверхность трения, и поэтому его влияние на износ при высоких нагрузках несущественно (табл. 2).

Таблица 2. Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с ПАВ-стабилизаторами

Смазочная композиция	Машина трения МТП [11] ($P = 4,2$ МПа, $V = 0,32$ м/с)		Машина трения МТП-М [11] ($P = 1,25$ ГПа, $V = 0,24$ м/с)	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПЭС-5	0,12	9,0	0,21	0,69
ПЭС-5 + 5 масс.% ОК	0,13	20,0	0,32	0,89
ПЭС-5 + 1 масс.% ХС-2-1ВВ	0,10	4,5	0,13	0,42
ПЭС-5 + 1 масс.% МКС-2-0			0,15	0,53
ХС-2-1ВВ	0,06	0,5	0,18	0,68
ХС-2-1ВВ + 1 масс.% ОДБА	0,11	0,56	0,19	0,68
ХС-2-1ВВ + 1 масс.% МКС-2-0	-	-	0,15	0,62
ХС-2-1ВВ + 1 масс.% ЗН2ТЭ	0,05	0,41	0,12	0,32
ХС-2-1ВВ + 1 масс.% МХС	0,10	0,48	0,16	0,59

Примечание. P – давление на контакте; V – скорость скольжения; f – коэффициент трения; I_h – линейная интенсивность изнашивания; d – диаметр пятна износа.

При получении магнитных масел на основе хлорсилоксанов (например, ХС-2-1ВВ) ограниченное применение может найти поверхностно-активное соединение ОДБА, относящееся к классу аминов. Небольшая концентрация ОДБА в несущей среде индифферентно отражается на трении и износе (см. табл. 2).

Для повышения температурно-временной стабильности силоксановых магнитных смазочных масел было предложено стабилизировать магнитные частицы поверхностно-активным веществом, синтезированным путем химической прививки активных (карбоксильных) групп на молекулы дисперсионной среды.

Синтез ПАВ-силоксана МХС (модифицированного олигохлорсилоксана) проводился методом прививки на полисилоксановый скелет поверхностно-активных фрагментов углеводородных полимеров. В качестве основы для прививки был взят непосредственно олигохлорсилоксан ХС-2-1ВВ, что обеспечивает максимальное сродство сольватной оболочки на поверхности дисперсных частиц и дисперсионной среды. В качестве модифицирующего агента выбрана акриловая кислота, т. к. кислотные группы обладают наибольшим диспергирующим действием и образуют с магнетитом хемосорбционную связь.

Синтез осуществлялся в лабораторном реакторе с обратным холодильником и электронагревом при интенсивном перемешивании реакционной смеси, состоящей из олигохлорсилоксана, акриловой кислоты, перекиси бензоила (инициатора полимеризации) и бензола (растворителя). По-

сле окончания процесса модификации реакционная смесь расслаивалась на раствор гомополимера акриловой кислоты и раствор ПАВ-силоксана в бензоле и разделялась в делительной воронке. Анализ степени прививки проводился по кислотному числу титрованием полученного сополимера.

Максимальная степень прививки кислотных групп соответствует температуре 80...90 °С. При температуре более 90 °С выход кислотных групп снижается за счет реакции дегидратации, причем при температуре более 100 °С происходит образование сшитого продукта. Образование сшитого полимера наблюдается особенно интенсивно в отсутствие растворителя (образование геля в течение 1 часа).

Оптимальная концентрация акриловой кислоты составляет 25...30 масс.%. При концентрации менее 25 % снижается степень прививки, при содержании более 30 % увеличивается выход побочного продукта (гомополимера акриловой кислоты).

Исследование влияния поверхностно-активного соединения МХС в дисперсионной среде на смазочные свойства раствора показало, что при умеренных концентрациях ПАВ (примерно до 6 масс.%) противоизносные свойства композиции незначительно улучшаются (см. табл. 2), а затем по мере увеличения содержания ПАВ наблюдается обратный эффект. Поэтому строго контролировать содержание в магнитном масле стабилизатора, находящегося в неадсорбированном (в растворенном) состоянии, не требуется.

Накоплен положительный опыт по получению качественных магнитных масел на основе силоксанов, содержащих в качестве стабилизатора противоизносные или противозадирные присадки с высокой химической адсорбционной способностью. Такой подход к синтезу магнитных масел позволяет исключить конкуренцию при адсорбции на поверхностях трения и дисперсных частиц, происходящую между молекулами ПАВ-стабилизатора и ПАВ-присадки, поскольку она негативно сказывается на свойствах масел. Для устранения недостатков монофункциональных ПАВ, применяемых при синтезе магнитных масел, была исследована возможность стабилизации магнитных наночастиц посредством химического соединения 3Н2ТЭ на основе хлорированного эфира пентадиена, созданного изначально для снижения трения и износа (см. табл. 2). Адсорбционная способность данного по существу ПАВ проявляется за счет наличия в молекулах карбонильной группы. Предполагалось, что стерический фактор защиты частиц от агломерации обеспечивается достаточно длинным углеводородным радикалом.

Таким образом, показано, что для создания перспективных магнитных смазочных масел с хорошими смазочными свойствами, невысокими испаряемостью и вязкостью хорошо подходят в качестве дисперсионной среды некоторые диэфиры карбоновых кислот, кремнийорганические жидкости – полиэтилсилоксан, хлорфенилсилоксан (см. часть 1 обзора [10]). Обоснован выбор ПАВ для сохранения коллоидной стабильности магнитных масел в условиях граничного трения. Для магнитных масел на основе

диэфиров это следующие ПАВ: рицинолевая кислота и олигоэфир ОЭ-3. Для магнитных масел на основе кремнийорганических жидкостей подходит олеиновая кислота, модифицированный хлорфенилсилоксан ХС-2-1ВВ, химическое соединение ЗН2ТЭ на основе хлорированного эфира пентадиена и другие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-08-00614).

Библиографический список

1. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
2. Болотов, А.Н. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. Тверь: ТвГТУ, 2008. 124 с.
3. Болотов, А.Н. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. Тверь: ТвГТУ, 2013. 123 с.
4. Uhlmann, E. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. № 11 (252). P. 336–340.
5. Курапов, П.А. Трение и работоспособность сопряжений в условиях использования микрогетерогенных смазочных композиций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Курапов П.А. М.: 2011. 39 с.
6. Болотов, А.Н. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами // А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 107–113.
7. Болотов, А.Н. Магнитные масла триботехнического назначения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Тверь: ТвГУ, 2009. № 1. С. 5–9.
8. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. Минск: Вышэйш. шк. 1988. 184 с.
9. Байбуртский, Ф.С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения / Ф.С. Байбуртский. URL: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm>
10. Болотов, А.Н. Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 1. Трибологический анализ перспективных жидкостей для дисперсионной среды магнитных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2018. Вып. 11. С. 128–133.
11. Болотов, А.Н. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1 / А.Н. Болотов [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 68–74.
12. Болотов, А.Н. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2 / А.Н. Болотов [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. Вып. 7. С. 85–89.
13. Болотов, А.Н. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды /

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 4. С. 75–81.

14. Болотов, А.Н. Влияние присадок на триботехнические характеристики наноструктурных смазочных магнитных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 9. С. 43–47.

УДК 621.316.35

А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова
Тверской государственной технической университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Целью работы является повышение надежности и долговечности электрических контактов, подверженных электроэрозионному изнашиванию. Описаны состав и технология нанесения на алюминиевые контакт-детали методом конденсации с ионной бомбардировкой электропроводного покрытия из хромистой бронзы, легированной иттрием. Результаты лабораторных испытаний покрытий показали, что модификация покрытия введением в его состав дополнительного легирующего элемента и изменением структуры покрытия за счет режимов его нанесения позволяет увеличить электроэрозионную износостойкость.

Ключевые слова: электрические контакты, ионно-плазменное покрытие, электроэрозионная износостойкость.

THE ENHANCEMENT OF ELECTRICAL EROSION WEAR RESISTANCE OF COATINGS MEANT FOR ELECTRICAL CONTACTS

The purpose of this work is to increase the reliability and durability of electrical contacts subjected to electrical erosion wear. The composition and technology of application on aluminum contact parts by condensation method with ion bombardment the conductive coating of yttrium-doped chromium bronze are described. The results of laboratory tests of coatings have shown that the modification of the coating by introduction into its composition an additional alloying element and changing the structure of the coating due to the modes of its application can increase the electrical erosion wear resistance.

Key words: electrical contacts, ion-plasma coating, electrical erosion wear resistance.

Разрывные контакты являются наиболее нагруженными элементами электрической цепи. Во многих случаях условия их работы таковы, что существенную, а иногда и решающую роль играют процессы электроэрозионного изнашивания, связанные с оплавлением, испарением и выгоранием металла в момент разрыва электрической цепи. Возникающий в режиме коммутации электрический разряд при многократном воздействии разрушает рабочие поверхности контактов. Такой тип изнашивания характерен для контактов различного рода реле, выключателей и контакторов, а также

подвижных токопроводящих контактов, работающих в условиях трения качения и скольжения [1].

Надежность и эффективность электрокоммутирующих устройств в значительной мере определяются выбором электроконтактного материала. Основные требования к ним: хорошая электропроводность, обеспечивающая низкое переходное сопротивление, высокая сопротивляемость образованию оксидных пленок на рабочих поверхностях, достаточная твердость, высокая жаро- и дугостойкость. Самым распространенным электротехническим материалом остается медь, а также сплавы и металлокерамические композиции на основе меди. По комплексу параметров медь обладает наиболее высокими электрокоммутирующими характеристиками [2].

В настоящее время в качестве проводникового материала все шире применяют алюминий. Это объясняется не только его меньшей стоимостью, но и рядом положительных качеств, дающих ему преимущества перед медью: высокой электропроводностью (по отношению к массе, в два раза большей, чем у меди) и технологичностью. Однако проводниковый алюминий обладает плохими контактными свойствами: низкой твердостью, электроэрозионной стойкостью, склонностью к образованию на поверхности непроводящих окисных пленок [3]. Повысить качественные характеристики контактного соединения позволяет нанесение на рабочие поверхности контакт-деталей, в том числе алюминиевых или разнородных, защитных металлических покрытий. Результаты работы [4] показали возможность применения ионно-плазменных покрытий из хромистой бронзы для защиты алюминиевых неподвижных разборных токопроводов. Для нанесения покрытий был использован метод конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ), экономически целесообразный в условиях крупносерийного производства. Технологии КИБ позволяют конструировать многокомпонентные защитные покрытия с заданным составом и структурой в зависимости от состава распыляемого материала и режимов процесса формирования покрытия.

Для разрывных контактов основной проблемой является электроэрозионный износ. В данной работе была поставлена задача повышения надежности и долговечности ионно-плазменного покрытия на алюминиевых токопроводящих деталях электрокоммутационных устройств, подверженных электроэрозионному изнашиванию, за счет увеличения его жаростойкости и износостойкости. Решение задачи состояло в следующем. В распыляемую хромистую бронзу вводили иттрий в количестве 0,2...0,6 %, что при дальнейшем распылении этого материала позволило получать на поверхности алюминиевых контактов покрытие из хромистой бронзы, легированное иттрием. Известно, что введение в медь и ее сплавы редкоземельных элементов, в частности иттрия, применяется для повышения жаростойкости, жаропрочности и пластичности объемных материалов без существенного снижения их электропроводности. Процентное содержание легирующего элемента обусловлено следующим. Уменьшение содержания

иттрия (менее 0,2 масс.%) не приводит к увеличению жаростойкости, следовательно, и электроэрозионной стойкости покрытия. Повышение содержания иттрия (более 0,6 масс.%) приводит к потере покрытием пластичности, что снижает его усталостную износостойкость [5, 6]. Применение хромистой бронзы, легированной иттрием, в виде покрытия на алюминиевых токопроводящих деталях позволяет уменьшить склонность их поверхности к окислению и выгоранию под воздействием повышенной температуры в зонах микродуг и увеличить износостойкость за счет повышения прочности и пластичности в зонах контакта.

Материал для распыления получали следующим образом. Стружку хромистой бронзы БрХ0,5 легировали иттрием в количестве 0,2...0,6 масс.%, путем сплавления ее в индукционных печах с порошком иттрия марки «У_м-1» с содержанием иттрия 98,74 %. Далее полученный слиток обтачивали по размерам катода электродугового испарителя, от него отрезали пластину, которую механическим способом закрепляли на торцевой поверхности катода. Катод с пластиной помещали в катодный узел электродугового испарителя установки для ионно-плазменного напыления.

Напыление слоя покрытия на обрабатываемые детали проводили в вакууме при опорном напряжении 90...120 В и токе дуги 90...95 А. После нанесения покрытия толщиной 0,3...0,5 мкм скачком изменяли величину напряжения до 1 000...1 200 В. Высокое напряжение сохраняли в течение 20...40 % от времени подачи опорного напряжения. При этом происходило усиление ионной бомбардировки при одновременном снижении ионного осаждения, т. е. механо-термическое воздействие на напыленный слой с его упрочнением. Затем высокое напряжение снижали опять до опорного и далее указанный цикл повторяли неоднократно так, чтобы число скачков напряжения составляло один-два на каждый микрометр толщины напыленного покрытия [7].

Лабораторные испытания образцов электроконтактных материалов с нанесенными покрытиями на электроэрозионную износостойкость были выполнены на оригинальной установке по методике, описанной в работах [8, 9]. Испытания проводили в режиме импульсного разряда в емкостном накопителе энергии. При этом образцы исследуемого материала с покрытием использовали в качестве анода, поскольку в режиме импульсного разряда анод гораздо больше подвержен эрозии, чем катод. Катодом служил цилиндрический электрод диаметром 1 мм, изготовленный из вольфрама. Вольфрам выбран в качестве второго электрода ввиду его высокой электроэрозионной стойкости. Частота коммутаций (число циклов замыкания-размыкания) была принята равной 1 Гц (60 коммутаций в минуту), расстояние между контактами – 5 мм, напряжение – 220 В, сила тока составляла 1 или 5 А. За отказ принималось отсутствие проводимости в контакте в течение десяти коммутаций подряд. Результаты испытаний приведены в таблице.

Средняя наработка до отказа, мин

Сила тока	Содержание иттрия в материале покрытия, масс.%							
	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8
1 А	22	30	54	63	87	116	32	25
5 А	10	12	35	42	61	56	17	9, видимый износ покрытия

Результаты экспериментов показывают, что применение покрытия из хромистой бронзы, легированной иттрием, на алюминиевых токопроводящих деталях позволило увеличить их электроэрозионную износостойкость. Таким образом была реализована возможность модификации полученного методом КИБ металлического покрытия путем введения в его состав дополнительного (легирующего) элемента и изменения структуры покрытия за счет режимов его нанесения.

Библиографический список

1. Измайлов, В.В. Электрофрикционные свойства композиционного материала с медной матрицей, армированной сверхупругим твердым углеродом / В.В. Измайлов [и др.] // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 3. С. 328–334.
2. Буткевич, Г.В. Электрическая эрозия силовых контактов и электродов / Г.В. Буткевич [и др.]. М.: Энергия, 1978. 256 с.
3. Бойченко, В.И. Контактные соединения токоведущих шин / В.И. Бойченко, Н.Н. Дзекцер. Л.: Энергия, 1978. 144 с.
4. Гусев, А.Ф. Современные методы нанесения металлопокрытий для повышения надежности силовых электрических контактов / А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, И.Н. Нестерова // Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение: мат. 5-й Междунар. науч. конф. М.: Изд-во МЭИ, 2003. Ч. 1. С. 73–74.
5. Михайличенко, А.И. Редкоземельные металлы / А.И. Михайличенко, Е.Б. Михлин, Ю.Б. Патрикеев. М.: Металлургия. 1987. 232 с.
6. Замоторин, М.И. Влияние мишметалла на жаропрочность хромистой бронзы / М.И. Замоторин, О.С. Мнушкин // Труды Ленинградского политехнического института. 1970. № 305. С. 135–140.
7. Пат. № 2366756 Российская Федерация. Способ нанесения покрытия на разрывные алюминиевые контакты электрокоммутирующих устройств / И.Н. Нестерова, В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев; заявл. 24.12.2007; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.
8. Измайлов, В.В. К разработке методики ускоренной оценки электроэрозионной износостойкости электроконтактных материалов / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Вестник Тверского государственного технического университета. 2003. Вып. 3. С. 14–20.
9. Пат. № 2265862 Российская Федерация. Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова; заявл. 05.04.2004; опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34.

УДК 621.891

Д.А. Зоренко
Тверской государственной технической университет

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНА ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Представлены результаты исследования триботехнических свойств покрытий на титановом сплаве, полученных методом анодного оксидирования с использованием различных составов электролита.

Ключевые слова: анодное оксидирование, коэффициент трения, линейная интенсивность изнашивания, титановые сплавы, защитные покрытия, декоративные покрытия.

HIGHER WEAR RESISTANCE OF MACHINE PARTS MADE OF TITANIUM BY OXIDE COATINGS DEPOSITION

The results of the study of tribotechnical properties of coatings on titanium alloy obtained by anodic oxidation using various electrolyte compositions have been presented.

Key words: anodic oxidation, coefficient of friction, linear wear intensity, titanium alloys, protective coatings, decorative coatings.

Детали, изготавливаемые из титановых сплавов, имеют широкое применение в различных отраслях машиностроения и особенно в авиационной промышленности. Широко применяются титановые сплавы и в оборонной промышленности. Замена конструкционных материалов, потребляемых в настоящее время предприятиями транспортного машиностроения, титаном приводит к снижению расхода топлива, росту полезной грузоподъемности, повышению предела усталости деталей. Существенное уменьшение общего веса транспортных средств за счет применения титановых деталей позволяет повысить скоростные характеристики. Большинство изготавливаемых из титана деталей, применяемых в узлах трения, нуждаются в повышении износостойкости. Кроме этого, с повышением температуры растет химическая активность титана, а следовательно, весьма желательна дополнительная защита поверхностей титановых деталей, работающих в узлах, испытывающих значительный нагрев.

Одним из основных способов повышения надежности и долговечности деталей из титановых сплавов является нанесение различных защитных и декоративных покрытий. К ним относятся гальванические, лакокрасочные, анодные. Из вышеперечисленных наиболее перспективными являются анодные покрытия, так как они имеют наиболее прочную адгезионную связь с металлом подложки. Гальванические же и лакокрасочные покрытия требуют тщательной подготовки поверхности, поскольку плотная окисная пленка титана препятствует их нанесению и прочному сцеплению с металлом детали. Синтез анодных пленок с заданными свойствами

на металлах анодированием или плазменным осаждением имеет большое практическое значение. Большинство традиционных методов формирования защитных пленок на вентильных металлах не позволяют получать прочные покрытия, соответственно не удовлетворяют всему многообразию требований современной техники по износостойкости, твердости, адгезии с подложкой. В связи с этим возникает необходимость развития новых или малоизученных методик управляемого синтеза неорганических пленок на металлах.

Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов является одним из таких методов. Особенность его в том, что в одном процессе на металлическом аноде синтезируется материал, компонентами которого являются составляющие металла и электролита, и производится обработка образующейся пленки электрическими разрядами.

В Тверском государственном техническом университете на кафедре прикладной физики были проведены эксперименты по получению оксидного покрытия на поверхности титана. Экспериментальная установка состоит из наполненной электролитом ванны, имеющей водяное охлаждение и являющейся катодом, и погруженной в электролит детали, являющейся анодом.

В работе было исследовано четыре принципиально различных состава электролита. Наиболее удачным оказался электролит на основе ортофосфорной и серной кислот. Процесс образования покрытия в нем характеризуется хорошей воспроизводимостью и высокой скоростью: процесс нанесения не превышает десяти минут. На основании проведенных экспериментов удалось определить процентное соотношение компонентов электролита и токовых режимов нанесения покрытия, при которых пористость покрытия на поверхности не превышала 20 % (рис. 1), а средние слои имели пористость, не превышающую 10 % за счет уменьшения количества и размеров пор.

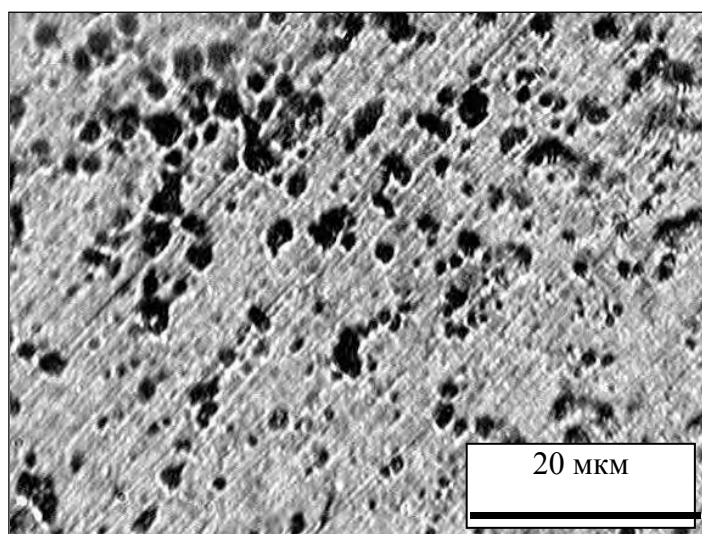


Рис. 1. Пористость на поверхности полученного покрытия

Снижение открытой и закрытой пористости в покрытии положительно влияет на его прочностные и триботехнические свойства. С целью определения работоспособности полученного покрытия были проведены триботехнические испытания. Испытания проводились на машине трения МТШ-М с модифицированным узлом трения без смазочного материала. Схема трения – «плоскость – плоскость». Материал контртела – закаленная сталь марки ХВГ. Материал испытуемого образца – титан марки ВТ1-0 с оксидным покрытием. Давление в контакте «плоскость – плоскость» изменялось от 500 кПа до 6 МПа, так как данный диапазон давлений является наиболее распространенным в узлах трения технических устройств, имеющих титановые комплектующие. Самоустанавливающийся подшипник, на внешнем кольце которого закреплен корпус с плоским контртелом, позволил обеспечить равномерный контакт с плоскостью трения образца. Эксперименты проводились при комнатной температуре. Для обеспечения чистоты контактных поверхностей поверхность плоского контртела и образца были предварительно обезжирены.

По результатам проведенных испытаний полученных покрытий на трение были определены зависимости коэффициента трения покрытия от времени наработки (рис. 2а).

На рис. 2б представлены зависимости линейной интенсивности изнашивания от контактного давления.

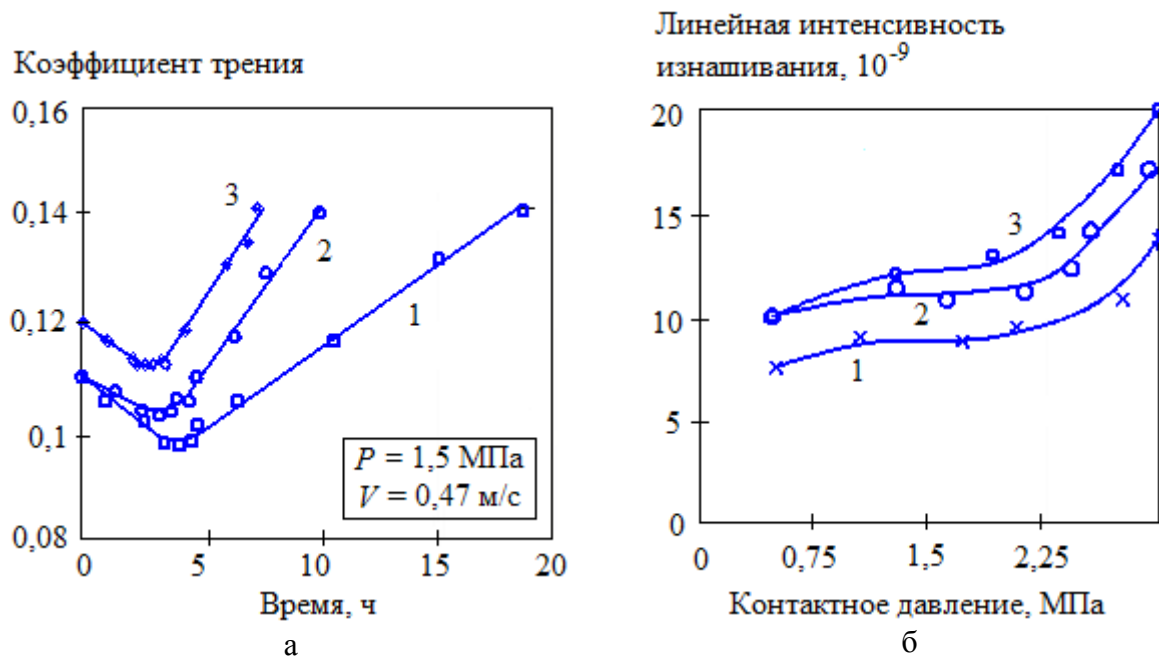


Рис. 2. Результаты испытаний: а – зависимость коэффициентов трения от времени для покрытий, полученных на разных электролитах; б – зависимость линейной интенсивности изнашивания от контактного давления.

- 1 – покрытие, полученное на электролите из смеси ортофосфорной и серной кислоты;
 2 – усредненная зависимость коэффициентов трения остальных полученных покрытий;
 3 – образец без покрытия

Полученное покрытие можно использовать в узлах трения без смазочного материала, так как оно позволяет обеспечить низкий коэффициент трения скольжения и повышает износостойкость титановой детали. Кроме этого, полученное покрытие не требует тщательной подготовки поверхности перед нанесением. Оно неплохо удерживает смазочный материал, так как имеет скрытую и открытую пористость. В отличие от чистого титана, не схватывается с углеродистой сталью при контактных давлениях выше 3 МПа. Ввиду низкой шероховатости порядка $Ra = 0,15 \dots 0,30$ мкм может применяться без конечной чистовой обработки. А при сокращении времени нанесения до 30 секунд покрытие представляет собой защитно-декоративную пленку с различными цветовыми оттенками.

Библиографический список

1. Баковец, В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. Новосибирск: Наука, 1991. 152 с.
2. Зоренко, Д.А. Повышение износостойкости подвижных деталей выталкивающей системы пресс-форм для литья термопластов под давлением: дис. ... канд. техн. наук / Зоренко Д.А. Тверь: ТвГТУ, 2004. 155 с.

УДК 621.07

А.М. Мигранов, А.Ф. Садыков

Уфимский государственный авиационный технический университет

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЯМИ

Представлены результаты экспериментальных исследований микротвердости, кривой нагружения – разгрузки, величины работы упругой и пластической деформации для оценки износостойкости режущего инструмента с покрытием с помощью параметра диссипации микротвердости.

Ключевые слова: износ, трение, наноиндентирование, микротвердость, упругая деформация, пластическая деформация.

THE ASSESSMENT OF WEAR RESISTANCE OF CUTTING TOOL WITH COATINGS

The results of experimental studies of microhardness, loading – unloading curve, the value of work of elastic and plastic deformation for the assessment of the wear resistance of the cutting tool with coatings by means of parameter of microhardness dissipation have been presented.

Key words: wear, friction, nanoindentation, microhardness, elastic deformation, plastic deformation.

Для повышения износостойкости инструмента обычно используются твердые покрытия. Режущие и штамповые инструменты являются примерами трибосистем с большой нагрузкой, работающих в условиях интен-

сивной пластической деформации на поверхности. Для эффективного использования инструментов необходимо сочетание высокой твердости и вязкости покрытий. В связи с этим представляется важным разработать один или несколько параметров, которые позволили бы оценить комбинацию этих свойств. Одним из таких параметров можно принять отношение твердости к модулю упругости. В работах [1, 2] показано, что классификация материалов по величине отношения твердости к модулю упругости (H/E) дает очень близкое соответствие их классификации по износостойкости. Поэтому коэффициент H/E можно использовать в качестве характеристики, отражающей способность различных режущих инструментов сопротивляться износу. Впервые в работе [3] представлена зависимость износостойкости сверл с покрытием $(AlTi)N$ -ФОП (физическое осаждение покрытия) от коэффициента H/E . Высокое соотношение H/E обуславливает низкую устойчивость инструмента во время сверлильных операций, когда преобладает адгезионный механизм износа. Этот результат показывает, что для инструментов, работающих с большой нагрузкой, в условиях интенсивной деформации контактных поверхностных слоев при трении необходим резерв пластических свойств для повышения износостойкости инструментов с покрытием.

В данной работе предпринята попытка разработки параметра, основанного на энергетическом подходе и связанного с износостойкостью покрытий, подобного по своему физическому смыслу коэффициенту H/E . Рассмотрим связь между характеристиками диссипации (рассеяния) и аккумуляции (накопления) энергии во время наноиндентирования и параметрами трения и стойкости покрытий при различных условиях изнашивания, соответствующих работе режущих инструментов и штампов.

Были исследованы твердые TiN -покрытия, нанесенные с помощью ФОП-метода на основе рассеивания дугой с использованием установки ННВ 6.6-И1. Параметры нанесения были следующими: ток в дуге – 50...160 А; напряжение смещения – 150...350 В; температура нанесения – 500 °С. Использовались два типа инструментальных материалов подложки (нижних слоев): первый – быстрорежущая сталь Р6М5 (твердость HRC 64-66) и второй – твердосплавные пластины (ТТ8К6).

Химический состав покрытий исследовался с помощью оже-электронной спектроскопии (ОЭС) на спектрометре *ESCALAB MK2 (VG)*. Фазовый состав и текстура определялись с помощью метода *PCA* на диффрактометре *DRON 3.0*. Осевая текстура покрытий TiN определялась с помощью метода Харриса и метода полюсных показателей [4].

Толщина покрытий, измеренная с помощью аппарата для сферического кратера, составила: для покрытия TiN – около 10 мкм, для покрытия $TiAlN$ – около 2,5 мкм.

Микротвердость и работа упругопластической деформации определялись на основе зависимостей «нагрузка – перемещение», измеренных с помощью компьютерно-управляемого прибора наноиндентирования *MTI-3M*

с алмазным индентором Берковича. Для каждого образца было проведено 30 измерений, которые затем были усреднены обычными статистическими методами. Разброс значений микротвердости составлял около 2 %. Для анализа использовалась экспериментальная кривая деформации, максимально приближенная к вычисленной средней.

Работа упругой и пластической деформации вычислялась с помощью кривых нагружения (при вдавливании), причем для каждого образца кривые были аппроксимированы с помощью полинома третьей степени в *Excel* с коэффициентом детерминации $R^2 \rightarrow 1$.

Суммарная работа A упругой и пластической деформации вычислялась интегрированием кривой нагружения в диапазоне глубин перемещения от 0 до h :

$$A = \int F(h) dh.$$

При этом шаг интегрирования был равен шагу нагружения (в нашем случае 200 мН). Диапазон нагрузок составлял от 0 до 5 000 мН.

Работа упругой деформации A_{e0} определялась интегрированием участка, ограниченного кривой разгрузки.

Работа пластической деформации A_p была определена как

$$A_p = A - A_{e0}.$$

С помощью полученных данных был подсчитан коэффициент K_e как отношение работы упругой деформации к общей работе деформации во время вдавливания:

$$K_e = A_{e0}/A.$$

Этот параметр затем был принят как коэффициент упругой деформации (аккумуляции энергии).

Параметр рассеивания (энергетических потерь во время пластической деформации) можно вычислить с помощью следующей формулы:

$$K_d = 1 - K_e.$$

Предлагается назвать эту характеристику параметром диссипации микротвердости (ПДМ) покрытия.

По результатам нагружения и разгрузки была получена кривая пластической деформации $F(h_p)$, где F – последовательно увеличивающаяся нагрузка вдавливания; h_p – глубина пластической деформации после завершения разгрузки, вычисленная как

$$h_p = h - h_{e0},$$

где h – текущая глубина вдавливания на кривой деформирования; h_{e0} – глубина индентирования, определяемая от начала координат (рис. 1). Кривая линия была результатом аппроксимации, полученной с помощью формул на основе экспериментальных данных. Каждая кривая имела свое собственное уравнение аппроксимации (табл. 1). На кривой $F(h_p)$ можно видеть два сегмента. Каждый сегмент имел коэффициент детерминации R^2 в диапа-

зоне от 0,999 7 до 0,999 9. Когда уравнение кривой меняется, на кривой появляется точка перегиба (рис. 1). Первый сегмент характеризует поверхностный слой толщиной около 10 % от всей толщины покрытия. Этот слой известен в литературе как слой, характеризующий собственную микротвердость покрытий [3, 5]. Второй сегмент характеризует более глубокий слой – зону пластической деформации, в которой сказывается влияние материала основы. Перегибы на линиях пластической деформации связаны с этим хорошо известным явлением. Положение точки перегиба кривых может быть источником важной информации для характеристики механических свойств покрытий, что является предметом изучения в данной работе. Основываясь на полученных данных, была вычислена величина ПДМ для поверхностного слоя толщиной около 10 % от общей толщины покрытия.

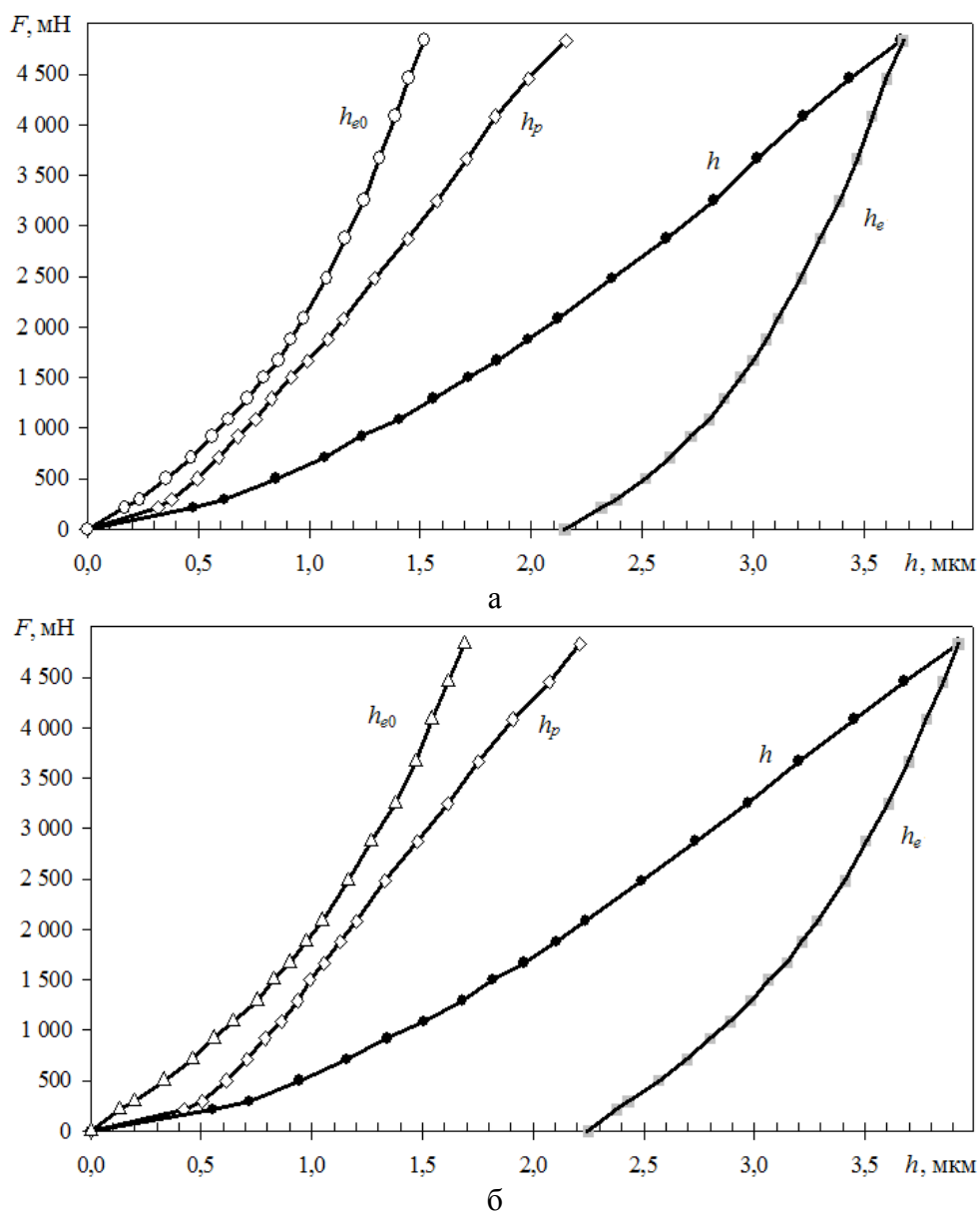


Рис. 1. Кривые деформирования при нагружении и разгрузке для покрытий TiN (ФОП): а – обычное покрытие; б – фильтрованное покрытие

Таблица 1. Зависимости для кривой пластической деформации h_p на рис. 1

Обычное покрытие TiN (ФОП)		
Сегмент 1	$0 < h < 0,7575$, мкм	$F = 190,19h_p^{1,9315}$ $R^2 = 0,9997$
Сегмент 2	$0,7575 < h < 2,1535$, мкм	$F = -38,037h_p^3 + 175,95h_p^2 + 19,866h_p + 12,482$ $R^2 = 0,9999$
Фильтрованное покрытие TiN (ФОП)		
Сегмент 1	$0 < h < 0,986$, мкм	$F = 155,36h_p^{2,2918}$ $R^2 = 0,9999$
Сегмент 2	$0,986 < h < 2,242$, мкм	$F = -24,633h_p^3 + 85,325h_p^2 + 197,574h_p$ $R^2 = 1,0$

Натурные испытания инструментов с покрытиями проводились в реальных условиях резания металлов. Были выбраны умеренные скорости резания, чтобы смоделировать адгезионный механизм износа. Режимы резания приведены в табл. 2. ФОП-покрытия TiN , нанесенные с помощью дуги, испытывались при резании с четырехгранными быстросменными пластинами в условиях, моделирующих адгезионный и адгезионно-усталостный механизмы износа [6, 7]. Фильтрованные с помощью магнитно-дуговой фильтрации (МДФ) ФОП покрытия TiN испытывались в условиях торцевого фрезерования, моделирующих адгезионный износ [4].

Таблица 2. Параметры резания

Продольное точение				
Быстросменные пластины из быстрорежущей стали с обычным покрытием TiN (ФОП)				
Обрабатываемый материал		Режимы резания		
Сталь	Твердость, HV	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина, мм
40X	200	45	0,33	1,0
Торцевое фрезерование				
Быстросменные пластины из твердого сплава с обычным покрытием TiN (ФОП)				
Обрабатываемый материал		Режимы резания		
Сталь	Твердость, HV	Скорость резания, м/мин	Ширина, мм	Глубина, мм
40X	200	50	10	3,0

Микротвердость TiN покрытий, а также параметр диссипации микротвердости (ПДМ) были измерены в зависимости от давления азота в камере во время нанесения покрытия. В работах [1–3] было показано, что на эти параметры значительно влияет фазовый состав покрытия. Высокая микротвердость достигается, когда двухфазовый состав $\alpha-Ti + TiN$ превращается в трехфазовый $\alpha-Ti + Ti_2N + TiN$ состав.

В результате экспериментальных исследований установлено:

существует связь между способностью нитридного покрытия (ФОП) рассеивать энергию пластической деформации и износостойкостью покрытия. Эту связь можно трактовать как параметр диссипации (рассеивания)

микротвердости (ПДМ). Были определены диапазоны величин ПДМ, представляющих собой отношение энергии диссипации к общей энергии упруго-пластической деформации во время наноиндентирования для различных условий, имеющих место при износе режущего инструмента;

покрытия с высокой величиной параметра ПДМ обеспечивают более высокую износостойкость инструментов (рис. 2).

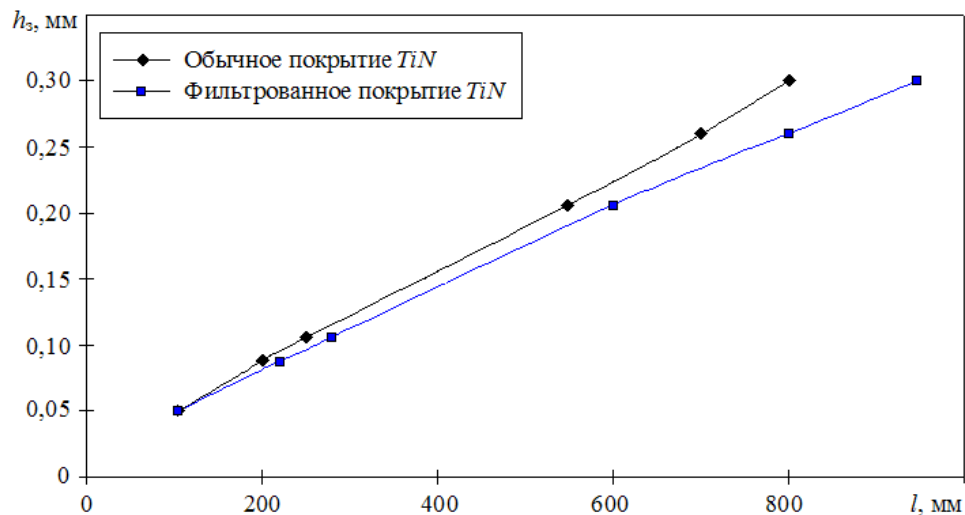


Рис. 2. Влияние длины пути резания l на износ инструмента по задней поверхности h_3 .

Обычное покрытие TiN : микротвердость 29...30 ГПа, ПДМ = 0,56;
 фильтрованное покрытие TiN : микротвердость 28...29 ГПа, ПДМ = 0,66

Библиографический список

1. Шустер, Л.Ш. Покрытия и смазки в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л.Ш. Шустер. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.
2. Vereschaka, A.A. Study of wear resistance of sintered powder tool materials / A.A. Vereschaka, M.S. Migrantov // Advanced Materials Research. 2014. V. 871. P. 159–163.
3. Fox-Rabinovich, G.S. Characteristic features of alloying HSS – based deformed compound powder materials with consideration for tool self – organization at cutting / G.S. Fox-Rabinovich [et al.] // Wear. 1997. V. 206. P. 214.
4. Криони, Н.К. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений / Н.К. Криони, М.Ш. Мигранов. М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2016. 327 с.
5. Vereschaka, A. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds / A. Vereschaka [et al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. V. 10. № 20. P. 9282–9286.
6. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л.Ш. Шустер. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
7. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. М.: Машиностроение. 1993. 336 с.

УДК 621.892

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова
Тверской государственной технической университет

ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Представлены результаты исследования режимов формирования матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала методом порошковой металлургии для обеспечения заданных триботехнических свойств. Отработаны технологические параметры получения спеченных заготовок с оптимальной относительной плотностью.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алмазосодержащий керамический материал, трение, износ.

THE FORMATION OF A MATRIX OF A DIAMOND-CONTAINING CERAMIC TOOL MATERIAL

The results of studies of the modes of formation of the matrix of the diamond-containing ceramic tool material by means of powder metallurgy for ensuring the specified tribological properties have been presented. Technological parameters of sintered billets production with optimal relative density have been worked out.

Key words: microarc oxidation, diamond-containing ceramic material, friction, wear.

Для обработки деталей из высокотвердых материалов – керамики, природного камня, синтетических алмазов, стекла, твердых сплавов, железобетона и других – необходимо применение современного высокопроизводительного абразивного режущего инструмента. Одним из его видов являются алмазосодержащие композиционные материалы. Инструменты, созданные на основе связующего из органических и металлических материалов, удовлетворительно работают при низких скоростях резания и нагрузках, однако при других параметрах трения проявляются их значительные недостатки: высокий расход алмазов, засаливание поверхности инструмента, низкая механическая прочность [1–3].

Качественно повысить работоспособность и износостойкость режущего инструмента можно, применив принципиально новый материал в качестве матрицы для абразивных алмазных зерен – износостойкую керамику, которая по физико-механическим свойствам близка к свойствам алмаза. Основная проблема создания такого материала заключается в разработке технологии инкорпорирования алмазов в керамическую матрицу. Проведенные нами эксперименты [4, 5] показали, что, проведя микродуговое оксидирование (МДО) [6] поверхности деталей, полученных методом порошковой металлургии из алюминиевой пудры и мелкодисперсного алма-

за, при определенных электрохимических параметрах можно получить новый триботехнический алмазосодержащий керамический материал (АКМ).

Целью данной работы являлась отработка режимов формирования матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала методом порошковой металлургии для обеспечения его оптимальных триботехнических свойств.

Используемые материалы и методики расчета технологических параметров матрицы. Для изготовления композиционного материала использовалась алюминиевая пудра ПАП-1, синтетические алмазы марки АС6, нанодисперсная медь, сформированная методом химического осаждения на поверхности алмазов.

Дисперсные частицы алюминия в составе пудры имели пластинчатую форму и следующие характерные размеры: средний размер – 20...30 мкм, средняя толщина лепестков – 0,25...0,5 мкм. Насыпная плотность дисперсных частиц – 210 кг/м³. В качестве абразивного наполнителя выбраны синтетические алмазы марки АС6, которые традиционно применяются для изготовления АКМ, используемого при обработке стекла, керамики и других хрупких твердых материалов.

Концентрацию алмазов K в формируемом композиционном материале характеризовали их массовой долей. Учитывая, что за 100%-ю концентрацию принята массовая доля 4,4 карата (или 0,88 г) алмазов в 1 см³ алмазного объема, массовую долю алмазов в АКМ рассчитывали по формуле $M_a = 4,4 \cdot 10^{-2} \cdot V \cdot K$, где V – объем, см³; K – концентрация алмазов, %.

Степень металлизации M медью алмазных зерен рассчитывалась как отношение массы нанесенного на них покрытия к массе исходного алмазного порошка, которая принимается за 100 %.

Для получения алмазосодержащих композиционных материалов были выбраны следующие параметры смеси:

концентрация алмазов: 50; 75; 100; 125; 150 %;

степень металлизации: 0; 25; 50; 75; 100 %.

Величина относительной плотности заготовки Q алмазосодержащего композиционного материала после прессования и спекания определялась в следующей последовательности. Вначале полученный образец взвешивался на лабораторных весах, определялся его объем и рассчитывалась реальная плотность ρ . Затем рассчитывалась теоретическая компактная плотность:

$$\rho_k = \frac{100\rho_1\rho_2}{k_1\rho_1 + k_2\rho_2},$$

где ρ_1, ρ_2 – плотность компонентов, которые были использованы для получения исходной смеси, кг/м³; k_1, k_2 – содержание компонентов в композиционном материале, %. Относительная плотность рассчитывалась по формуле

$$Q = \frac{\rho}{\rho_k} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Величина относительной плотности теоретически может достигнуть 100 %, однако это возможно при абсолютном уплотнении смеси. При реальном технологическом процессе, после прессования и спекания ее величина всегда меньше 100 %.

Получение заготовки АКМ методом порошковой металлургии. Технологический процесс получения АКМ включает несколько операций, режимы которых определяют качество формируемого материала и поэтому подлежат оптимизации.

Металлизация медью дисперсных частиц алмаза. Так как температура окисления алмаза сравнительно невысока и составляет около 800 °С, с целью защиты поверхности от окисления и придания им повышенной механической прочности проводилась предварительная подготовка алмазных порошков путем формирования на поверхности зерен металлического покрытия. Металлизация поверхности алмазного зерна связана с возникновением в сочетании «металл – алмаз» сложной картины внутренних напряжений, которые работают на увеличение прочности зерна (напряжения сжатия) или, наоборот, ее уменьшают (напряжения растяжения). Характер и величина напряжений определяются разностью коэффициентов расширения пленки металла и алмаза. С учетом этих обстоятельств было принято решение об использовании химической металлизации алмаза, которую можно провести при комнатной температуре. При химической металлизации в зерне минимальны внутренние остаточные напряжения. Если нагреть металлизированные этим способом алмазы, то радиальные внутренние напряжения, возникающие в металлическом покрытии на поверхности алмаза, сжимают зерно и при этом увеличивают его прочность.

Металлы, которые можно использовать для химического способа нанесения на поверхность алмазов, разделяются на 2 вида:

обладающие химическим сродством к углероду (никель, вольфрам, кобальт и др.);

химическим сродством к углероду не обладающие (медь и др.).

В нашем случае в роли одного из исходных компонентов для связки АКМ использованы дисперсные частицы алюминия. Предварительные исследования показали, что медь в небольших количествах в алюминиевых сплавах при микродуговом окислении выступает в качестве катализатора, способствующего образованию наиболее износостойкой и твердой фазы α -оксида алюминия микротвердостью около 24 ГПа. Поэтому в дальнейшем медная пленка наносилась на поверхность алмазов.

Используемая нами технология химической металлизации включает несколько этапов:

1. Подготовка поверхности, которая включает в себя обезжиривание поверхности в растворе следующего состава: тринатрийфосфат Na_3PO_4 (40...50 г); едкий натр $NaOH$ (40...50 г); сода кальцинированная Na_2CO_3 (50...80 г); дистиллированная вода (до 1 л). Температура раствора –

60...70 °С, время обработки зерен – 10...15 мин. После следовала промывка в холодной и горячей дистиллированной воде.

2. Активирование поверхности, заключающееся в том, что на поверхность алмазных зерен наносят небольшое количество металла, являющегося катализатором реакции химического восстановления. Данная технологическая операция проводилась в две стадии.

Вначале использовался раствор следующего состава: кислота соляная HCl (40...60 г); олово двуххлористое $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ (20...25 г); дистиллированная вода (до 1 л). Температура раствора – 15...20 °С, время выдержки – 10 мин. После зерна промывались в холодной дистиллированной воде.

На втором этапе алмазы помещались в раствор следующего состава: гидрат окиси аммония NH_4OH (15...20 мл); серебро азотнокислое $AgNO_3$ (2 г); дистиллированная вода (до 1 л). Температура раствора – 18...20 °С, время выдержки – около 3 мин. После зерна промывались в холодной дистиллированной воде.

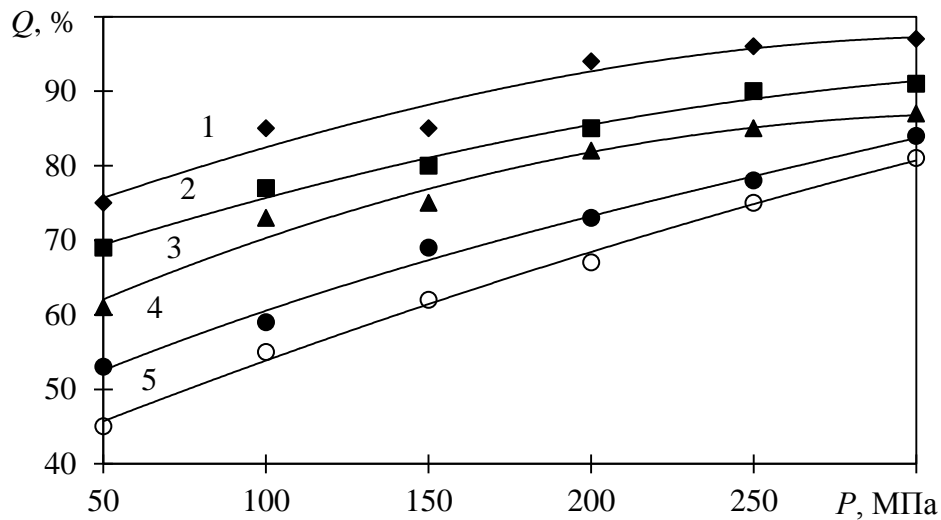
3. Химическое меднение является заключительной операцией всего технологического процесса металлизации алмазных порошков. Для этого использовался раствор следующего состава: медь сернокислая $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (25...35 г/л); калий-натрий виннокислый $KNaC_4H_4O_6$ (150...170 г/л); натр едкий $NaOH$ (40...50 г/л); натрий углекислый Na_2CO_3 (25...35 г/л); формалин (40 %) (20...25 мл/л); тиосульфат натрия $Na_2S_2O_3$ (0,002...0,003 г/л); никель хлористый $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ (2...3 г/л). Температура раствора – 20...25 °С. Время обработки определяется из необходимой степени металлизации алмазов. Необходимо постоянное перемешивание раствора. После обработки следовала промывка зерен в холодной проточной воде, а затем сушка. В результате обработки на зернах алмазов осаждался слой меди.

Прессование и спекание образцов алмазосодержащего композиционного материала. Необходимое количество исходных компонентов взвешивалось на лабораторных весах с точностью до 0,005 г и помещалось в смеситель, добавлялась легколетучая жидкость гексан для снижения трения между дисперсными частицами смеси. В течение 10...15 минут достигалось равномерное распределение алмазов по объему смеси. Затем она помещалась в пресс-форму из стали У10А. Поверхность пресс-формы покрывалась тонким слоем графита в качестве твердой смазки, работающей при высоких температурах, для устранения заедания частиц алюминия со стенками пресс-формы. Уплотнение полученной смеси проводилось на гидравлическом прессе с усилием сжатия в пределах 50...250 МПа методом изостатического прессования. При этом пресс-форма нагревалась до температуры 500...700 °С (точность до 5 °С) в течение 30...60 мин.

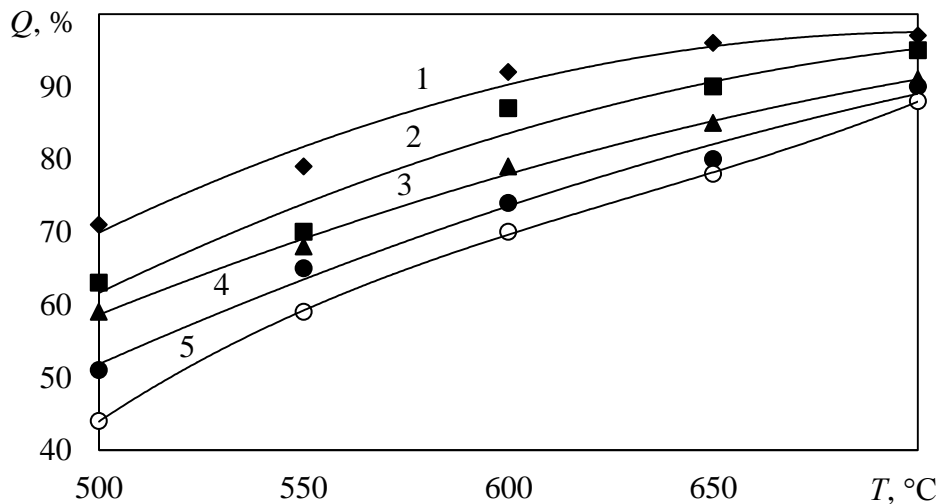
Исследование режимов формирования заготовки АКМ. При обработке технологии получения АКМ варьировались следующие параметры: концентрация алмазов K ; зернистость алмазов; степень их металлиза-

ции M ; давление при прессовании P ; температура нагрева пресс-формы T и время прессования τ .

При исследовании режимов формирования заготовки АКМ оценивалась величина относительной плотности детали в зависимости от температуры и давления прессования. Результаты показаны на рис. 1. Из них видно, что при возрастании давления и температуры относительная плотность материала увеличивается. При использовании алмазов более мелких фракций после прессования и спекания получается композиционный материал с большей относительной плотностью.



а



б

Рис. 1. Зависимость относительной плотности: а – от давления прессования ($T = 650$ °С); б – от температуры прессования ($P = 250$ МПа). $K = 100$ %; $M = 0$ %; $\tau = 30$ мин.

Зернистость алмазов: 1 – 50/40; 2 – 63/50; 3 – 80/63; 4 – 100/80; 5 – 125/100

Однако стремиться к максимально возможному повышению плотности исходной заготовки нецелесообразно. Это объясняется тем, что, как показали дальнейшие исследования, если относительная плотность заго-

товки меньше 75 %, то прочность ее невысока, и в процессе МДО такие детали подвержены саморазрушению из-за воздействия среды электролита и высокотемпературных электрических разрядов. При возрастании относительной плотности выше 90 % заготовки получают плотные, затруднен доступ электролита в глубь материала и керамический композиционный слой может получаться недостаточной толщины, что существенно скажется на триботехнических характеристиках инструмента из АКМ. Также увеличение температуры способствует повышению степени графитизации алмазов, что ведет к снижению режущей способности зерен и уменьшению прочности композиционного материала. Таким образом, определен массив значений давлений, температур и зернистости алмазов, которые в дальнейшем использованы для получения АКМ.

Степень металлизации оказывает влияние на состав исходной смеси, так как в нее вносится дополнительный элемент – медь. Для исследования его влияния на относительную плотность заготовки были проведены эксперименты, при которых степень металлизации варьировалась от 0 до 100 %. Повышать ее более 100 % нецелесообразно, так как предварительные испытания показали, что повышенное содержание меди на последующей стадии технологического цикла – микродуговом оксидировании заготовки – вызывает возникновение токов утечки и очагов электрохимической коррозии, что ведет к невозможности формирования АКМ. Установлено, что относительная плотность заготовки с увеличением степени металлизации может снижаться на 10...15 % (рис. 2).

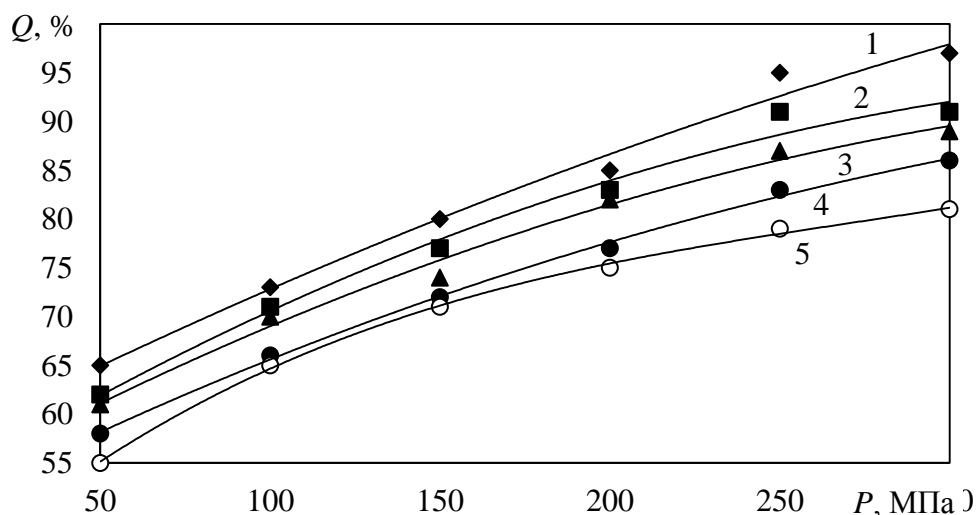


Рис. 2. Влияние степени металлизации алмазов на относительную плотность заготовки.

$T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$; зернистость алмазов 100/80; $K = 100 \text{ } \%$; $\tau = 30 \text{ мин}$.

Степень металлизации M : 1 – 0 %; 2 – 25 %; 3 – 50 %; 4 – 75 %; 5 – 100 %

Было исследовано влияние времени выдержки при высокой температуре на относительную плотность АКМ. Результаты представлены в табл. 1. Эксперименты показали, что более длительное время прессования

и спекания незначительно увеличивает относительную плотность композиционного материала. Однако при этом существенно возрастают энергетические затраты, которые необходимы для создания АКМ.

Проведенные исследования зависимости относительной плотности АКМ от концентрации алмазов показали (табл. 2), что при увеличении концентрации алмазов относительная плотность заготовки уменьшается.

Таблица 1. Влияние времени спекания на относительную плотность АКМ

Зернистость алмазов	Относительная плотность АКМ Q % при времени выдержки		
	30 мин	60 мин	90 мин
50/40	96	96	96
63/50	90	91	92
80/63	85	87	88
100/80	78	81	83
125/100	75	79	81

Примечание. $T = 650$ °С; $P = 250$ МПа; $K = 100$ %; $M = 0$ %; $\tau = 30$ мин.

Таблица 2. Зависимость относительной плотности АКМ от концентрации алмазов

Концентрация алмазов, %	25	50	75	100
Относительная плотность АКМ Q , %	92	87	84	78

Примечание. $T = 650$ °С; $P = 250$ МПа; зернистость алмазов 100/80; $M = 0$ %; $\tau = 30$ мин.

Заключение. По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что для обеспечения оптимальных триботехнических параметров формируемого АКМ наиболее целесообразно для последующего этапа его получения – микродугового оксидирования – использовать спеченные заготовки относительной плотностью 75...90 %. Технологические параметры получения заготовки и характеристики алмазных зерен выбираются, исходя из назначения получаемого алмазосодержащего композиционного керамического инструмента и обеспечения заданной относительной плотности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-48-690001, 17-08-00614).

Библиографический список

1. Богатырева, Г.П. Инструменты из сверхтвердых материалов / Г.П. Богатырева [и др.]. М.: Машиностроение, 2014. 608 с.
2. Судник, Л.В. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты / Л.В. Судник, П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
3. Sachsel, H.G. Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive and Superabrasive / H.G. Sachsel. Xlibris Corp., 2010. 680 p.
4. Болотов, А.Н. Анализ работы трибосопряжений на основе керамических алмазосодержащих материалов / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 3. С. 279–284.

5. Пат. № 2055696 Российская Федерация. Способ изготовления композиционно-го материала / А.Н. Болотов [и др.]; заявл. 02.14.94; опубл. 03.10.96.

6. Малышев, В.Н. Структура и триботехнические характеристики износостойких композиционных материалов и покрытий / В.Н. Малышев, М.В. Голуб // Долговечность трущихся деталей. М.: Машиностроение, 1990. Вып. 4. С. 119–130.

УДК 625.085:69.002.5

Ю.Н. Павлов, А.В. Кондратьев, Д.Г. Масленников, С.М. Кочканян
Тверской государственной технической университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ГРУНТОУПЛОТНЯЮЩЕЙ МАШИНЫ

Рассмотрена схема рабочего органа грунтоуплотняющей машины с использованием гидравлического вибровозбудителя. Представлены результаты исследования рабочего органа грунтоуплотняющей машины в грунтовом канале. Установлены зависимости коэффициента уплотнения грунта от глубины проработки и времени процесса.

Ключевые слова: вибровозбудитель, частота и амплитуда колебаний, грунт, коэффициент уплотнения, время процесса.

RESEARCH OF VIBRATION WORKING BODY OF SOIL COMPACTING MACHINE

The scheme of the working body of a soil compacting machine using a hydraulic vibration exciter is considered. The results of the study of the working body of a soil compacting machine in a soil canal are presented. The dependences of the soil compaction coefficient on the depth of processing and process time are established.

Key words: vibration exciter, vibration frequency and amplitude, soil, compaction coefficient, process time.

Уплотнение грунтов за счет вибрации рабочего органа в настоящее время считается достаточно перспективным, о чем свидетельствует отечественный и зарубежный опыт [1–3].

Наиболее часто применяемые дебалансные вибровозбудители, несмотря на простоту изготовления, обслуживания и невысокую стоимость, обладают и рядом недостатков: сложность регулирования параметров вибрации, большие динамические нагрузки на подшипниковые узлы, значительная масса и габариты, малый срок службы.

В связи с этим была разработана конструкция рабочего органа для грунтоуплотняющей машины с гидравлическим вибровозбудителем [4, 5]. Схема вибрационного рабочего органа представлена на рис. 1.

Устройство состоит из плиты 1, штока 2, вибровозбудителя 12 и бака 7. В центре бака вварена труба 19, внутри которой проходит шток. В верхней части бака закреплена плита 8, на которой крепится корпус вибровозбудителя. Бак герметично закрывается крышкой 9, на которой установ-

ливается дополнительный груз 10. Привод распределительного кольца 13 вибровозбудителя осуществляется зубчатой шестерней 14, закрепленной на валу гидромотора 17. Бак с вибровозбудителем и плитой помещен в раму 6, которая вместе с баком с помощью роликов 3 может перемещаться по направляющим швеллерам 4, закрепленным на лотке грунтового канала. Подъем и опускание рабочего органа внутри рамы осуществляется ручной лебедкой 16. Тяговый трос 15 закреплен на крышке вибровозбудителя. Швеллеры рамы являются направляющими, в которые входят опорные ролики 5 бака. Швеллеры рамы являются направляющими, в которые входят опорные ролики 5 бака.

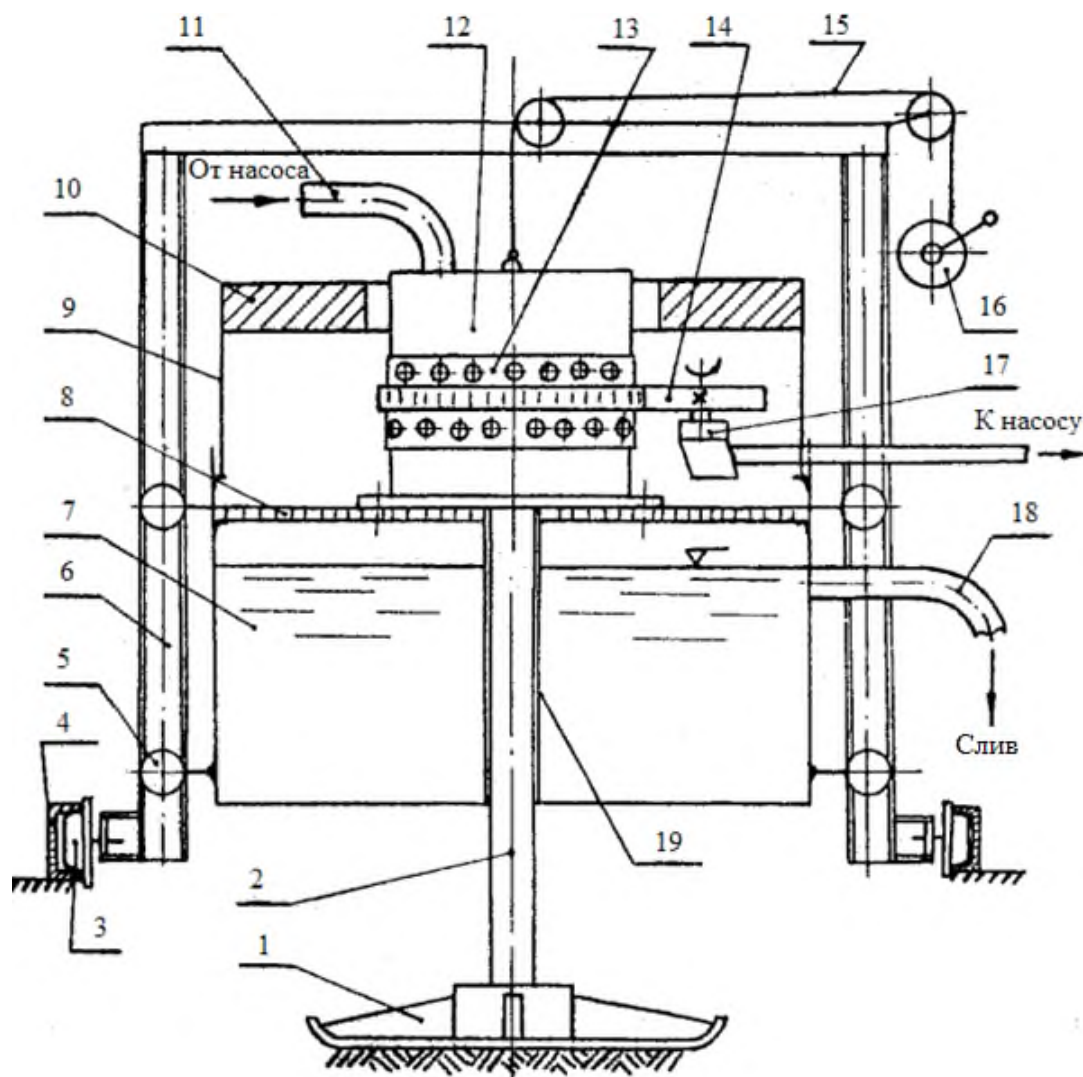


Рис. 1. Схема модельного рабочего органа грунтоуплотняющей машины

Работа вибрационного уплотняющего органа осуществляется следующим образом. Лебедкой производится опускание рабочего органа на уплотняющую поверхность до соприкосновения плиты с грунтом. При этом опорные ролики бака перекатываются по направляющим швеллерам рамы. Тяговый трос ослабляется, и устанавливается заданный режим работы вибровозбудителя. Затем включается гидромотор, приводя во вращение

распределительное кольцо вибровозбудителя. Одновременно включается насос и подается напорная жидкость в коллектор вибровозбудителя, осуществляется рабочий ход плиты. Изменение режима работы вибровозбудителя обеспечивается регулировкой подачи масла от маслостанции к гидромотору. Заданный режим работы вибровозбудителя контролируется регистрирующей и записывающей аппаратурой. Перемещение рабочего органа по грунтовой поверхности осуществлялось с помощью тяговой тележки.

На первом этапе изучалось воздействие рабочего органа на грунт при работе вибровозбудителя с использованием воды как рабочей жидкости. В процессе испытаний была получена амплитудно-частотная характеристика вибровозбудителя (рис. 2а). Изменение частоты достигалось регулированием расхода рабочей жидкости, подводимой к устройству.

В процессе испытаний было установлено, что устойчивая работа вибровозбудителя наблюдалась при частотах не ниже 100...110 Гц. Уплотнение песчаных и супесчаных грунтов производилось при частоте от 50 до 500 Гц при давлении на грунт 0,16...0,4 кг/см². Время процесса уплотнения изменялось от 10 до 40 секунд. Результаты исследований показали невысокую эффективность – коэффициент уплотнения $K \leq 0,8$. Такое низкое значение можно объяснить малой колеблющейся массой, которая составляла 60 кг.

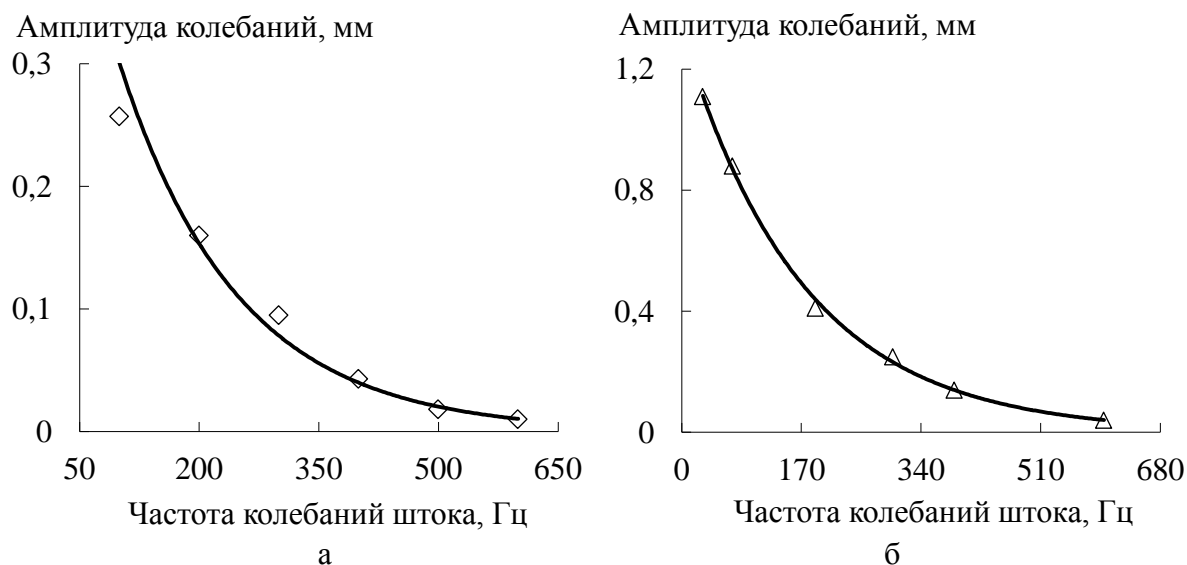


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика гидравлического вибровозбудителя.
Рабочая жидкость: а – вода; б – индустриальное масло

На втором этапе исследований колеблющаяся масса была увеличена до 1 000 кг и в качестве рабочей жидкости использовали индустриальное масло. Исследования проводились на мелкозернистом песчаном грунте с влажностью от 3 до 12 % и плотностью грунта 1,91 г/см³. Уплотнение проводилось при ступенчатом изменении частоты колебаний от 30 до 600 Гц. Время процесса фиксировалось в пределах 20, 30 и 40 секунд. После каждого режима уплотнения отбирались пробы грунта режущим кольцом объ-

емом 200 см^3 через 20 см по глубине забоя. Степень уплотнения оценивалась численными значениями коэффициента уплотнения K . Повторность опытов на каждом режиме составляла 7...10. Пробы отбирались в пяти точках уплотняемой площади под плитой рабочего органа.

Сначала была получена амплитудно-частотная характеристика гидравлического вибровозбудителя, которая представлена на рис. 2б.

Из рис. 2б видно, что в данной конструкции удалось существенно повысить амплитуду колебаний (почти в 3 раза) при низких частотах по сравнению с первой версией вибровозбудителя (см. рис. 2а), что должно было положительно повлиять на качественные показатели процесса уплотнения.

На рис. 3 показано изменение коэффициента уплотнения грунта в зависимости от глубины проработки и времени процесса воздействия вибровозбудителя на грунтовую массу при частоте 30 Гц и амплитуде колебаний 1,2 мм. Полученные данные показывают достаточно высокие показатели эффективности уплотнения. Увеличение времени воздействия рабочего органа на грунт (до 40 с) позволило повысить коэффициент уплотнения для промежуточных слоев материала (20...40 см), приближая его численное значение к 0,94. В то же время степень уплотнения поверхностного (нулевого) и глубинного (60 см) слоев с увеличением времени процесса практически не менялась.

Дальнейшие исследования проводили при более высокой частоте вибрации, которая составляла 80 Гц, а амплитуда колебаний плиты равнялась 0,7 мм, при этом время процесса уплотнения принимало одно из трех значений: 20, 30 или 40 с. Результаты изучения зависимости коэффициента уплотнения от глубины проработки и времени процесса сведены в таблицу.

Зависимость коэффициента уплотнения грунта от времени процесса t

Глубина проработки грунта, см	Численные значения коэффициента уплотнения грунта K		
	$t = 10 \text{ с}$	$t = 20 \text{ с}$	$t = 30 \text{ с}$
0 (8)*	0,930	0,930	0,938
20 (28)*	0,937	0,947	0,948
40 (48)*	0,920	0,935	0,938
60 (68)*	0,920	0,925	0,928

Примечание. * – нижняя граница отбираемой пробы.

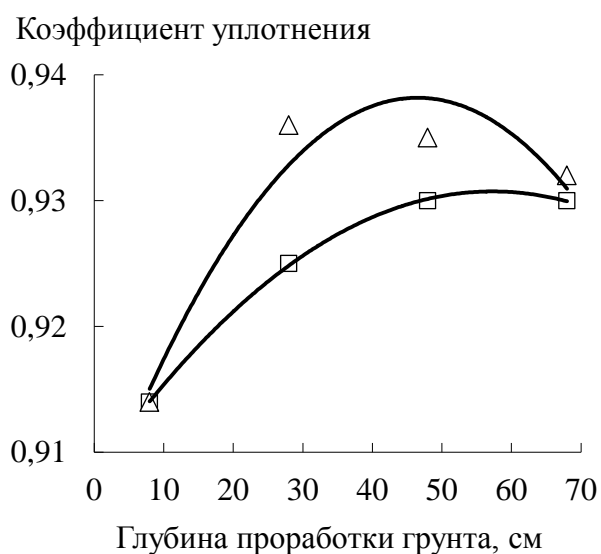


Рис. 3. Зависимость коэффициента уплотнения грунта от глубины проработки: время процесса \square – 30 с; \triangle – 40 с

Представленные табличные данные показывают, что наиболее интенсивное уплотнение грунта до значений $K = 0,948$ наблюдалось в слоях грунта на глубине 20 см. На глубине 40 см с ростом времени процесса уплотнение происходило несколько меньше. Самые глубокие слои (60 см) уплотнялись менее интенсивно, и наибольший показатель коэффициента уплотнения не превышал 0,93.

Таким образом, в ходе проведенных исследований была подтверждена работоспособность вибровозбудителя с грунтоуплотняющим рабочим органом площадочного типа. Получены достаточно высокие показатели степени уплотнения ($K = 0,93...0,948$) песчаного мелкозернистого грунта оптимальной влажности при частоте колебаний 80 Гц и амплитуде 0,7 мм. Результаты проведенной работы могут служить основанием для создания новых грунтоуплотняющих машин площадочного типа для проведения дорожно-строительных работ.

Библиографический список

1. Баранов, В.Н. Электрогидравлические следящие приводы вибрационных машин / В.Н. Баранов. М.: Машиностроение, 1988. 264 с.
2. Броднев, П.Н. Разработка методики расчета и исследование рабочих процессов гидравлического привода широкополосного вибровозбудителя: дис. ... канд. техн. наук / Броднев П.Н. СПб., 2000. 252 с.
3. Варсанюфьев, В.Д. Гидравлические вибраторы / В.Д. Варсанюфьев, О.В. Кузнецов. Л.: Машиностроение, 1979. 144 с.
4. А.с. № 990330 СССР. Вибровозбудитель / А.Б. Мясников, А.Г. Мошков; заявл. 20.02.81; опубл. 23.01.1983, Бюл. № 3.
5. А.с. № 1202631 СССР. Вибровозбудитель / А.Б. Мясников, Ю.Н. Павлов, Б.А. Мясников; заявл. 28.05.84; опубл. 07.01.1986, Бюл. № 1.

УДК 621.924.93

С.П. Рыков, В.В. Мешков
Тверской государственной технической университет

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АБРАЗИВНОЙ СТРУИ ИЗ АППАРАТА С ЭРЛИФТОМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Описано влияние технологических параметров абразивной струи из аппарата с эрлифтом на характеристики стальной поверхности. Оптимизация параметров гидроабразивной обработки (очистки от нагара) позволит повысить качество внутренних фасонных поверхностей стеклоформирующих комплектов.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, абразивное воздействие, технологические параметры, шероховатость, сьем металла.

THE INFLUENCE OF MANUFACTURING PARAMETERS OF AN AIRLIFT APPARATUS ABRASIVE STREAM ON STEEL SURFACE CHARACTERISTICS

The influence of manufacturing parameters of an airlift apparatus abrasive stream on steel surface characteristics has been described. The optimization of hydroabrasive treatment (scale cleaning) parameters enables to increase the quality of inner profiled surface of glass molding set.

Key words: hydroabrasive treatment, abrasive exposure, manufacturing parameters, roughness, metal removal.

Сущность процесса гидроабразивной обработки металлов заключается в воздействии струи суспензии, состоящей из воды и абразивного материала, на обрабатываемые поверхности деталей [1–6] (в данном случае внутренние фасонные профили стеклоформирующих комплектов). Увеличение скорости истечения суспензии достигается воздействием на нее потока сжатого воздуха. В результате такой обработки образуются очищенные от нагара матовые поверхности без направленных рисок, характерных для обычных методов механической обработки.

Производительность гидроабразивной обработки и ее качество зависят в основном от энергетических возможностей струи, формируемой струйным аппаратом, и свойств обрабатываемой поверхности.

Струйные аппараты различаются по способу подачи суспензии: принудительно насосом или засасыванием за счет инжекции. Подготовку однородной суспензии осуществляют двумя путями: перемешиванием посредством сжатого воздуха (барбатирувание) или механическими смесителями. Эти конструкции малоэффективны, громоздки и энергоемки.

На основе анализа конструкций пневматических перемешивающих устройств был спроектирован барбатер на базе воздушного подъемника (эрлифта).

На основе этой конструкции разработано принципиально новое струйное устройство для гидроабразивной обработки, которое объединило в себе барбатер, эрлифт и струйный аппарат [7]. Оно вертикально закрепляется в нижней части камеры-бака и состоит из подъемной трубы-корпуса с окнами для входа рабочей суспензии. Внутри корпуса соосно расположен подвижный жиклер с наружной поверхностью в виде равностороннего треугольника, который своим весом замыкает кольцевой вход в корпус для сжатого воздуха. За счет ступенчатого осевого отверстия жиклера часть сжатого воздуха свободно идет в сопло и создает разрежение в верхней части подъемной трубы, оставшаяся часть воздуха поднимает жиклер, в образовавшийся зазор устремляется воздух, который производит перемешивание и подъем абразивной суспензии в зону разгона. На поворотной крышке расположена шаровая опора с механизмами ориентации (осевого перемещения, поворота) и фиксации цилиндрических образцов. Регули-

ровка кольцевого зазора между жиклером и основанием корпуса в месте подвода сжатого воздуха осуществляется верхней резьбовой крышкой, в которой расположено рабочее сопло.

Эффективность работы комплексного струйного аппарата зависит не только от компоновки его составляющих, но и их размеров, основными из которых являются: отношение площадей активного (жиклера) и смешительного сопел, расстояние между ними, длина сопла, угол сходимости смешительного сопла, объем камеры смешения [6].

Характеристики поверхности металла (съем металла, шероховатость) после абразивного воздействия струи зависят от следующих технологических параметров: вида и величины зерна абразивного материала; скорости подачи струи рабочей суспензии, зависящей в основном от давления сжатого воздуха; угла падения струи на обрабатываемую поверхность; расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью; времени обработки.

Целью настоящей работы является оценка влияния технологических параметров гидроабразивной обработки на характеристики стальной поверхности, а именно на съем металла и изменение шероховатости применительно к внутренним фасонным профилям стеклоформирующих комплектов.

Экспериментальные исследования проводились на комплексном струйном аппарате, объединяющем барбатер, эрлифт и струйный аппарат. При проведении работ использовался абразивный микропорошок из карбида кремния зеленого зернистостью M16 (160 мкм) с концентрацией в суспензии 25 об. %.

В качестве образца использовалась торцевая поверхность цилиндра из стали 40Х диаметром 20 мм и длиной 35 мм с исходной шероховатостью $Ra = 7,0$ мкм.

Съем металла с поверхности образца определяли весовым методом на лабораторных электронных весах модели ВНА-600 с ценой деления 0,01 г. Шероховатость поверхности образцов до и после обработки определяли с помощью профилометра модели ПМ-80 МИКРОТЕХ.

В процессе экспериментов оценивали:

величину съема металла поверхностного слоя образца в зависимости от давления сжатого воздуха и расстояния от сопла до образца;

величину изменения шероховатости поверхности образца в зависимости от давления сжатого воздуха, расстояния от сопла до образца, угла атаки абразивной струи, времени обработки.

Зависимости характеристик поверхности образцов от технологических параметров гидроабразивной обработки приведены на рис. 1–3.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 1, показывает, что при изменении давления P сжатого воздуха и расстояния L от сопла до образца величина съема металла с образца существенно изменяется. Максимальный съем металла с образца достигается в диапазонах $P = 0,42...0,45$ МПа и $L = 85...90$ мм.

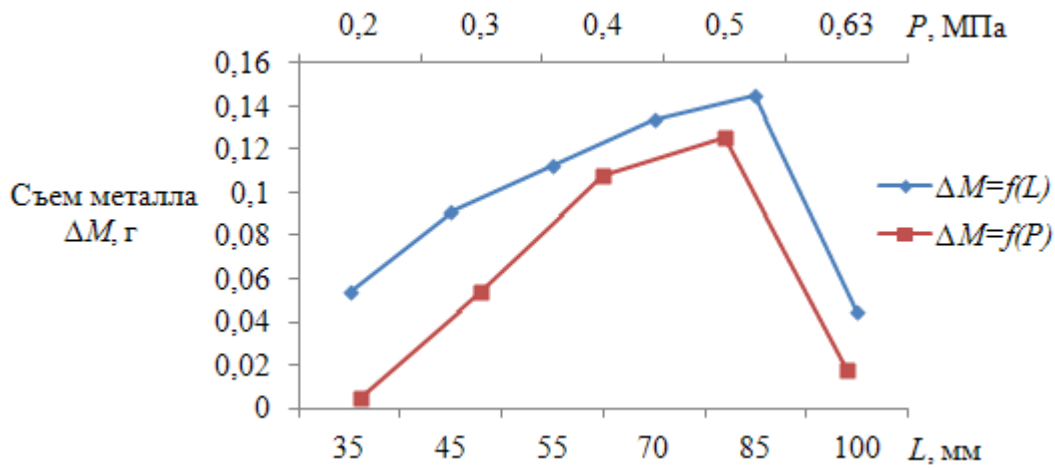


Рис. 1. Зависимость величины съема металла с образца ΔM от давления P сжатого воздуха и расстояния L от сопла до образца при времени обработки 3 мин

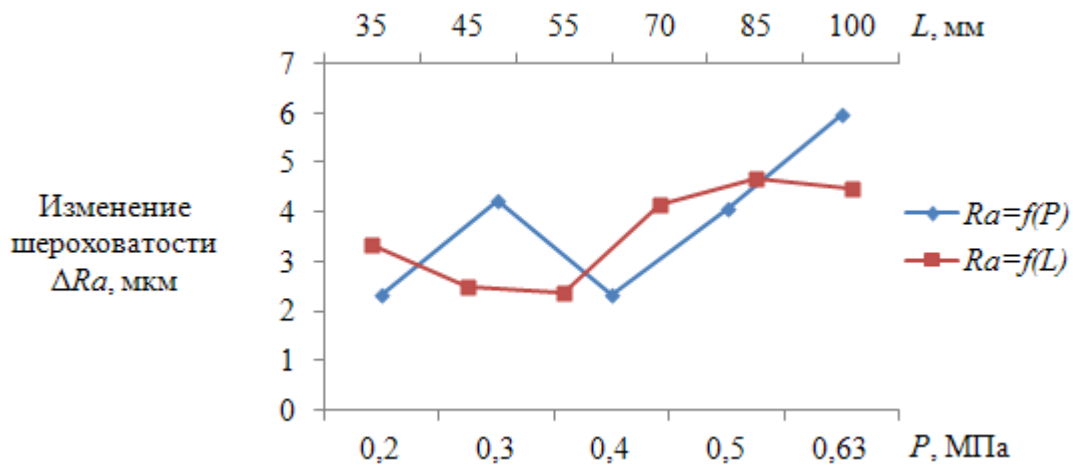


Рис. 2. Зависимость изменения шероховатости ΔRa поверхности образца от расстояния L от сопла до образца и давления P сжатого воздуха при времени обработки 3 мин

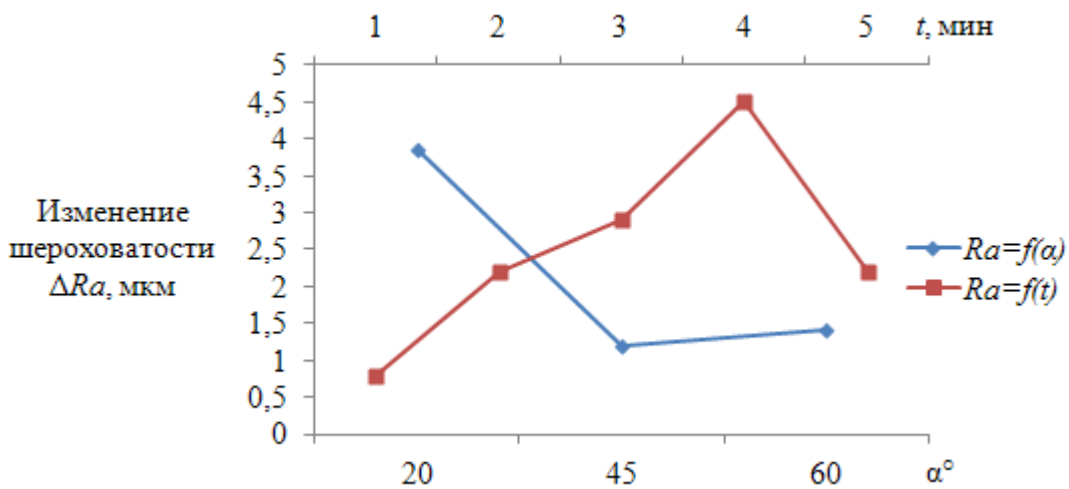


Рис. 3. Зависимость изменения шероховатости ΔRa от времени обработки t и угла атаки α абразивной струи

В отличие от съема металла величина изменения шероховатости ΔR_a поверхности образца имеет тенденцию к увеличению с 2 до 6 мкм при давлении воздуха $P \geq 0,4$ МПа и расстоянии от сопла до образца $L \geq 75$ мм (см. рис. 2). С увеличением давления P количество абразивных зерен и их кинетическая энергия возрастают, что приводит к увеличению съема металла.

С увеличением угла атаки α абразивной струи с 20° до 45° величина изменения шероховатости ΔR_a снижается с 4 до 1,2 мкм и сохраняется на этом уровне до $\alpha = 60^\circ$. Это связано с тем, что при той же кинетической энергии частицы площадь удаляемой поверхности увеличивается при одновременном уменьшении глубины внедрения. С увеличением времени обработки t до 3,5 мин величина изменения шероховатости ΔR_a увеличивается с 0,75 до 4,5 мкм, после чего снижается.

Анализ экспериментальных результатов показал:

наибольший съем металла с поверхности образца происходит при давлении сжатого воздуха $P = 0,5$ МПа и расстоянии от сопла до поверхности образца $L = 80 \dots 85$ мм;

максимальная величина изменения шероховатости достигается при $L = 85$ мм, а минимальная – при $L = 100$ мм;

оптимальный угол наклона абразивной струи к образцу $\alpha \approx 45^\circ$;

шероховатость образца уменьшается с течением времени гидроабразивной обработки;

шероховатость поверхности образца увеличивается при давлении сжатого воздуха свыше 0,4 МПа.

Таким образом, в результате экспериментов определена оптимальная комбинация технологических параметров, а именно $P = 0,45$ МПа, $L = 85$ мм, $\alpha = 45^\circ$, позволяющая уменьшить исходную шероховатость стальной поверхности на 3...5 мкм. Это, в свою очередь, позволит повысить качество обрабатываемой стальной поверхности (в частности, внутренних фасонных поверхностей стеклоформирующих комплектов).

Библиографический список

1. Виноградов, В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагачиев. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
2. Потапов, В.А. Струйная обработка: состояние и перспективы развития в Европе и мире / В.А. Потапов // Вестник машиностроения. 1996. № 1. С. 26–30.
3. Бреннер, В.А. Гидроструйные технологии в промышленности. Гидроабразивное резание / В.А. Бреннер [и др.]. М.: Изд. Московского государственного горного университета, 2003. 279 с.
4. Alkire, T.D. The Future of Waterjet Cutting / T.D. Alkire // Manufacturing Technology Int. Conf., 1 Jan. 1990. P. 201–204.
5. Raju, S.P. Predicting hydro-abrasive erosive wear during abrasive waterjet cutting. Part 1: A mechanistic formulation and its solution / S.P. Raju, M. Ramulu // PED. 1994. V. 68-1. P. 339–351.

6. Шпилев, В.В. Повышение эффективности процесса гидроабразивной резки листовых деталей путем оптимизации режимов обработки и параметров струи рабочей жидкости: дис. ... канд. техн. наук / Шпилев В.В. Саратов, 2012. 159 с.

7. А.с. № 1079421 СССР. Устройство для гидроабразивной обработке деталей / А.В. Базыкин [и др.]; заявл. 28.01.83; опубл. 15.03.1984, Бюл. № 10.

УДК 621.785:669.14.018.29

Г.В. Раткевич, И.А. Смолякова, Л.Е. Афанасьева, М.В. Новоселова
Тверской государственной технической университет

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УПРОЧНЕННОЙ ЛАЗЕРОМ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Представлены результаты экспериментальных исследований триботехнических свойств (коэффициента трения, твердости, интенсивности изнашивания) быстрорежущей стали Р6М5 после лазерной закалки и отпуска в муфельной печи. Лазерную закалку стали выполняли на автоматизированном комплексе АЛТКУ-3 с многоканальным CO_2 -лазером. Улучшенные характеристики абразивной износостойкости сталь приобретает после лазерной закалки с оплавлением и отпуска при температуре 560 °С.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, лазерная закалка, коэффициент трения, твердость, интенсивность изнашивания, абразивная износостойкость.

THE INFLUENCE OF TEMPERING TEMPERATURE ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF LASER HARDENED HIGH-SPEED STEEL

The results of experimental studies of tribotechnical properties of high-speed steel R6M5 after laser quenching and tempering in a muffle furnace have been reported. The above mentioned properties are the follows: the friction coefficient, the hardness and the wear intensity. Laser treatment of steel was performed by the use of automated complex АЛТКУ-3 with multichannel CO_2 -laser. A steel gains the higher wear resistance after laser quenching with melting and tempering at 560 degrees of centigrade.

Key words: high-speed steel, laser quenching, friction coefficient, hardness, wear intensity, abrasive wear resistance.

Работоспособность инструмента из быстрорежущих сталей определяется ее свойствами, важнейшими из которых являются твердость, прочность, тепло- и износостойкость [1–3]. Износ инструмента – одно из главных препятствий на пути повышения режимов резания и производительности оборудования. Износостойкость быстрорежущих сталей зависит от их структуры и свойств, прежде всего от твердости стали, количества и типа карбидных фаз в структуре. Необходимо получение мелких равномерно распределенных в мартенсите карбидов. Крупные карбидные частицы или

скопления карбидов, выходящие на поверхность трения, могут выкрашиваться, играя роль дополнительного абразива и ускоряя износ [1–3].

Стандартной технологией изготовления и упрочнения быстрорежущих сталей является литье, ковка и отжиг, закалка, трехкратный отпуск. После такой обработки в структуре быстрорежущих сталей нередко встречаются крупные первичные карбиды, карбидные неоднородности и скопления, что может привести к преждевременному выходу из строя инструмента по причине поломки или выкрашивания режущей кромки. Резервы увеличения работоспособности инструмента из быстрорежущих сталей за счет оптимизации структуры далеко не исчерпаны, данный вопрос требует глубокого изучения.

Широкие возможности по повышению работоспособности быстрорежущих сталей обеспечивает применение обработки высококонцентрированными потоками энергии (и прежде всего лазерные технологии). Современный уровень развития технологических лазеров позволяет не только увеличивать производительность и качество обработки самых разнообразных материалов, но и обеспечивать инновационные подходы к изготовлению деталей и конструкций, реализация которых традиционными методами затруднительна или невозможна [4].

При лазерной закалке рабочие поверхности инструмента нагревают до сверхкритических температур, после прекращения действия излучения происходит охлаждение обработанного участка с большой скоростью в результате теплоотвода во внутренние слои металла [4–8]. В настоящее время наибольшее практическое использование получила лазерная закалка без оплавления поверхности, так как при низких скоростях движения лазерного луча в зоне оплавления образуется микроструктура с пониженным значением микротвердости [4]. Влияние зоны оплавления на свойства быстрорежущих сталей оценивается в литературе весьма противоречиво. Экспериментальных данных до настоящего времени получено недостаточно. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию триботехнических свойств быстрорежущей стали марки Р6М5, упрочненной лазерной закалкой и последующим отпуском.

Методика эксперимента. Образцы стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73) после объемной закалки и трехкратного отпуска обрабатывались непрерывным лазерным излучением на автоматизированном комплексе АЛТКУ-3 на базе предприятия ООО «Центр лазерных технологий», г. Владимир [5, 6]. Лазерный комплекс состоит из специально разработанного для наплавки и термоупрочнения многоканального (40 лучей) CO_2 -лазера с мощностью выходного излучения 3 кВт и технологического поста с пятью координатами манипулирования лучом и двумя координатами манипулирования обрабатываемой деталью. Лазерную закалку с оплавлением поверхности выполняли на следующем режиме: мощность излучения – 1,5 кВт, скорость сканирования – 15 мм/с, диаметр пятна ла-

зерного излучения – 6 мм. После лазерной закалки проводили отпуск образцов в лабораторной муфельной печи модели ПЛ 10/12,5 при температурах 200, 300, 400, 500, 560 °С в течение 40 минут.

Для определения коэффициента трения образцов был использован микротрибометр [9]. Измерения проводились по схеме «шар – плоскость», плоский образец изготовлен из исследуемого материала, сферический контрообразец – из золота. Золото является диамагнетиком, что важно при исследовании поверхностей ферромагнитных материалов. Золото практически не окисляется, его поверхность на воздухе покрыта тонкими адсорбированными пленками. Применение индентора с устойчивым состоянием поверхности обеспечивает воспроизводимость условий эксперимента.

Твердость поверхностных слоев (микротвердость) определяли вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 150 гс, твердость подповерхностных слоев (мезотвердость) – вдавливанием конического алмазного индентора со сферической вершиной под нагрузкой 2 кгс. Величину твердости H оценивали по нормальной нагрузке F на индентор и площади отпечатка A [10]:

$$H = \frac{F}{A}.$$

Испытание на изнашивание стальных образцов проводили с закрепленным абразив по схеме «шар – плоскость». В качестве контрообразца использовали стальной сферический наконечник с алмазным напылением (рисунок). Диаметр наконечника равен 1,8 мм, размер алмазного зерна ≈ 130 мкм.

К контакту прикладывали нагрузку в 50 г ($N = 0,5$ Н). Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контрообразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой $\nu = 20$ Гц. За один период (цикл) путь трения составлял 8...12 мм. Каждый образец подвергался испытанию в течение $t = 11,5$ час. Общий путь трения $L_{\text{тр}} = 6\ 700 \dots 10\ 100$ м. Величину износа определяли с помощью профилограмм изнашиваемой поверхности, записанных перпендикулярно дорожке трения. По профилограммам определяли ширину и максимальную глубину h_{max} дорожки изнашивания, по которым рассчитывали объем удаленного материала V . Характеристики изнашивания образцов находили в соответствии с ГОСТ 27674-88: линейный износ за цикл $I = h_{\text{max}}/(\nu t)$; скорость изнашивания $u = V/t$; линейную интенсивность изнашивания $I_h = h_{\text{max}}/L_{\text{тр}}$; объемную интенсивность изнашивания $I_V = V/L_{\text{тр}}$; коэффициент изнашивания $k = I_V H/N$.



Вид наконечника с алмазным напылением

Результаты исследований и обсуждение. При лазерной закалке с оплавлением поверхности произошла высокоскоростная перекристаллизация стали на глубину до 300 мкм. Находящиеся в структуре стали первичные и вторичные карбиды почти полностью растворились, насыщая твердые растворы мартенсит и аустенит легирующими компонентами и углеродом. В результате лазерной закалки в поверхностном слое сформировалась ячеистая микроструктура с размером дендритного параметра $d = 3 \pm 0,4$ мкм.

Для ряда сплавов установлена корреляционная связь между скоростью охлаждения расплава и величиной дендритного параметра [11]:

$$d = A \cdot v^{-n},$$

где d – дендритный параметр, мкм; v – скорость охлаждения, °C/с; A и n – постоянные. Для быстрорежущей стали марки М2 (аналог Р6М5) в работе [12] даны значения констант: $A = 59$, $n = 0,34$. Используя эти данные и значение дендритного параметра, определенного экспериментально по изображениям микроструктуры стали в зоне лазерной закалки, можно оценить величину скорости охлаждения расплава при кристаллизации. Во время лазерной обработки она составила около 6 400 °C/с. Известно, что повышение скорости кристаллизации расплава приводит к расширению области твердых растворов, измельчению структурных составляющих, увеличению количества дефектов кристаллического строения [13]. Все эти процессы приводят, как правило, к более высокому комплексу свойств сплава.

Быстрорежущая сталь, упрочненная по стандартной технологии, имеет размер зерна около $11 \pm 1,8$ мкм. Влияние температуры отпуска на свойства закаленных быстрорежущих сталей изучались рядом исследователей [2, 3]. Известно, что отпуск при температуре 200 °C приводит к снижению концентрации углерода в мартенсите и выделению цементитного карбида и его коагуляции [2]. Карбиды цементитного типа имеют твердость, сопоставимую с твердостью мартенсита. При температурах отпуска выше 500 °C в быстрорежущих сталях идут процессы дисперсионного твердения с образованием специальных карбидов повышенной твердости. При отпуске при температуре 560 °C мартенсит сохраняется, но из него выпадают очень мелкие (размером около 10 нм) карбиды VC [3]. Происходит вторичное твердение. Результаты измерения микро- и мезотвердости быстрорежущей стали представлены в табл. 1. Образцы, упрочненные лазерной закалкой и отпуском при температуре 560 °C, имеют более высокую микро- и мезотвердость.

Результаты измерений коэффициента трения f представлены в табл. 2. Установлено, что лазерная закалка и отпуск при температуре 560 °C снижают коэффициент трения до 17 %.

Согласно данным табл. 3, большей износостойкостью обладает образец после лазерной закалки с оплавлением поверхности и отпуска при тем-

пературе 560 °С, характеристики изнашивания других образцов соизмеримы с образцом, прошедшим только лазерную закалку.

Для выявления влияния твердости материала на его абразивную износостойкость рассчитывался коэффициент корреляции между ними. Значения коэффициентов корреляции между исследованными характеристиками образцов, прошедших отпуск после лазерной заправки, приведены в табл. 4.

Таблица 1. Твердость образцов при различных нагрузках

T отпуска, °С	Твердость, МПа	
	Нагрузка, 150 г	Нагрузка, 2 кг
200	8 480±740	7 068
300	6 859±423	7 068
400	5 944±1 268	7 068
500	6 845±350	7 068
560	9 226±572	7 924

Таблица 2. Значения коэффициента трения образцов

T отпуска, °С	f
Без лазерной заправки и отпуска	0,12±0,01
200	0,12±0,01
300	0,11±0,01
400	0,12±0,01
500	0,11±0,01
560	0,10±0,01

Таблица 3. Характеристики изнашивания образцов

Характеристика	Температура отпуска, °С						
	Лазерная заправка без отпуска	150	200	300	400	500	560
I , 10^{-8} мм/цикл	4,4	5,6	3,1	3,9	5,3	2,9	0,7
u , 10^{-3} мм ³ /ч	1,9	2,7	1,3	2,4	2,3	1,9	0,2
I_h , 10^{-9}	3,7	5,6	3,1	3,3	4,6	2,4	0,6
I_V , 10^{-15} м ²	2,2	3,7	1,8	2,9	2,7	2,2	0,2
k , 10^{-5}	4,3	5,9	2,8	4,1	3,4	3,0	0,3

Все значения коэффициентов корреляции средней твердости и характеристик изнашивания статистически незначимы. Коэффициент корреляции твердости и температуры отпуска также незначим.

Кроме коэффициентов парной корреляции, рассчитывался совокупный коэффициент корреляции $r_{I_h; \langle H \rangle, T}$ (линейная интенсивность изнашивания I_h – совокупность твердости $\langle H \rangle$ и температуры отпуска T). Расчет совокупного коэффициента корреляции проводили по формуле [14]:

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между исследованными характеристиками

	k	I_h	I_V	I	u	T
$\langle H \rangle$	-0,09	-0,17	-0,28	-0,34	-0,43	-0,33
k		0,92	0,98	0,90	0,93	-0,77
I_h			0,92	0,98	0,88	-0,75
I_V				0,94	0,98	-0,69
I					0,93	-0,66
u						-0,57

$$r_{H; <H>, T} = \sqrt{\frac{r_{H; <H>}^2 + r_{H; T}^2 - 2r_{H; <H>}r_{H; T}r_{<H>, T}}{1 - r_{<H>, T}^2}},$$

где $r_{H; <H>}$, $r_{H; T}$, $r_{<H>, T}$ – соответствующие коэффициенты парной корреляции (см. табл. 4). Коэффициент корреляции величины износа и совокупности твердости и температуры отпуска $r_{H; <H>, T} = 0,75$, что в математической статистике расценивается как свидетельство сильной связи между переменными.

Заключение. Улучшенные характеристики абразивной износостойкости быстрорежущая сталь Р6М5 приобретает после лазерной закалки с оплавлением поверхности и отпуска при температуре 560 °С. Корреляционный анализ показывает, что интенсивность изнашивания в условиях абразивного износа зависит не только от твердости, но и от других факторов, и прежде всего от структуры, которая, в свою очередь, зависит от режимов упрочняющей обработки.

Библиографический список

1. Фельдштейн, Е.Э. Режущий инструмент. Эксплуатация / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. М: ИНФРА-М. 2012. 256 с.
2. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
3. Кремнев, Л.С. Особенности превращений, структуры и свойств молибденовых быстрорежущих сталей / Л.С. Кремнев, А.К. Онегина, Л.А. Виноградова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 12. С. 13–19.
4. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. М.: МГТУ, 2006. 664 с.
5. Афанасьева, Л.Е. Повышение износостойкости сталей с помощью закалки многоканальным лазером / Л.Е. Афанасьева, В.И. Югов // *Технология металлов*. 2018. № 3. С. 23–26.
6. Раткевич, Г.В. Абразивная износостойкость инструментальной стали, упрочненной многоканальным лазером // Г.В. Раткевич [и др.] // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.* 2016. Вып. 9. С. 55–61.
7. Majumdar J.D. Studies on laser surface melting of tool steel – Part I: Surface characterization and it's electrochemical behavior / J.D. Majumdar, A.K. Nath, I. Manna // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Т. 204. V. 9. P. 1321–1325.
8. Majumdar J. D. Studies on laser surface melting of tool steel – Part II: Mechanical properties of the surface / J.D. Majumdar, A.K. Nath, I. Manna // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Т. 204. V. 9. P. 1326–1329.
9. Пат. № 2150688 Российская Федерация. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова; заявл. 25.12.98; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. 10 с.
10. International standard EN ISO 14577-1:2002. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
11. Мирошниченко, И.С. Закалка из жидкого состояния / И.С. Мирошниченко. М.: Металлургия. 1982. 168 с.

12. Benyounis, K.Y. Rapid solidification of M2 high-speed steel by laser melting / K.Y. Benyounis, O.M. Fakron, J.H. Abboud // *Materials and Design*. 2009. V. 30. № 3. P. 674–678.

13. Афанасьева, Л.Е. Металлографический анализ гранул быстрорежущей стали М2 / Л.Е. Афанасьева // *Вопросы материаловедения*. 2018. № 4 (96). С. 78–85.

14. Громько, Г.Л. Статистика / Г.Л. Громько. М.: Изд. Моск. ун-та, 1981. 408 с.

УДК 621.793.72

А.Ю. Лаврентьев, А.А. Тимофеев
Тверской государственный технический университет

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Проведен обзор публикаций, касающихся исследования трибологических свойств покрытий, применяемых для восстановления гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Анализ выполненных исследований позволяет выбрать оптимальную технологию нанесения покрытий гильзы цилиндра и обосновать выбор материала покрытия и его структурно-фазового состояния.

Ключевые слова: износостойкость, гильза цилиндра, покрытие, электродуговая металлизация.

WEAR-RESISTANT COATING OF CYLINDER LINERS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A review of publications related to the study of tribological properties of coatings used for a renewal of cylinder liners of internal combustion engines was carried out. The analysis of performed studies enables to select the optimal technique of cylinder liners coating deposition and to justify the coating material selection and its structural and phase state.

Key words: wear resistance, cylinder liner, coating, electric arc metallization.

Работоспособность и ресурс двигателя внутреннего сгорания определяется стабильностью системы «цилиндр – кольцо – поршень». Гильза цилиндра в процессе эксплуатации подвергается воздействию комплекса факторов, которые приводят к нарушению работоспособности. Замена или ремонт гильз цилиндров реализуются во время капитального ремонта. Стоимость такого восстановления значительна. Для многих современных двигателей ремонт с заменой гильз или обработкой блока на ремонтный размер не предусмотрен. Вместе с тем, наблюдается старение парка автотранспорта. В этой связи разработка технологии восстановления рабочей поверхности гильзы цилиндра является весьма актуальной.

Создать технологию восстановления гильз цилиндров возможно, основываясь на современных знаниях в области триботехники. Цель представленной работы – обзор публикаций, отражающих результаты выпол-

ненных исследований в области трибологических свойств покрытий, применяемых для восстановления гильз цилиндров ДВС.

Наружная поверхность гильз цилиндров может корродировать под воздействием охлаждающей жидкости. Особенно сильно это проявляется в случаях применения воды или некачественных антифризов для охлаждения двигателя. Кроме этого, на наружной поверхности происходит кавитационная эрозия. В работе [1] детально описан этот процесс и рассмотрены способы восстановления работоспособности гильзы цилиндра. Кавитационная эрозия возникает из-за вибраций гильзы в зоне перехода поршня в верхней мертвой точке. Наиболее интенсивно это явление происходит в дизельных двигателях из-за ударного воздействия [1]. Автор предлагает применять для ремонта композиции на основе эпоксидных смол [1].

В работах ряда авторов [2–4] предлагается для восстановления рабочей поверхности гильзы цилиндра применять электродуговую металлизацию. Метод основан на расплавлении металла проволоки электрической дугой в камере металлизатора. Полученные капли жидкого металла распыляются и разгоняются в сопле установки струей газа. Мелкие капли при соударении с поверхностью закрепляются на ней. В работе [5] представлены результаты исследований адгезионных свойств покрытий, полученных на внутренней поверхности гильзы электродуговой металлизацией. В работе даны рекомендации по использованию проволоки при восстановлении гильз цилиндров автотракторных двигателей. Авторы рекомендуют применять порошковую проволоку ППМ-6 или ППМ-2, а перед металлизацией выполнять тщательную подготовку поверхности (токарная и струйно-корундовая обработка). Адгезия покрытия к заготовке из высокопрочного чугуна, определенная по методике авторов, составляла от 22 до 40 МПа [5].

В работе [6] представлена математическая модель трибосистемы «гильза цилиндра – поршневое кольцо». На основе анализа модели сделан вывод о возможности снижения износа при условии сохранения внешнего трения поверхностей сопряжения. Это обеспечивается за счет применения в поверхностном слое материала с прочностью на сдвиг меньше, чем прочность основного материала. При этом прочность адгезионной связи должна быть ниже прочности нижележащих слоев. Снижение силы трения может быть обеспечено уменьшением модуля упругости материалов контактирующих поверхностей и улучшением их геометрических параметров. Авторы пришли к выводу, что металлизация гильзы материалом с модулем упругости $E = 1,2 \cdot 10^5$ МПа снижает силу трения на 30 % по сравнению с исходной гильзой, изготовленной из материала с модулем упругости $E = 1,6 \cdot 10^5$ МПа [6].

Один из вариантов использования материала с низким модулем упругости описан в работе [7]. Авторы предлагают выполнять на рабочей поверхности гильзы цилиндра канавки и заполнять их медью. В процессе

работы двигателя поршневые кольца размазывают медь по поверхности, оптимизируя условия трения. Авторы утверждают, что интенсивность износа гильзы в мертвых точках снизилась в 3 раза [7].

Анализируя результаты выполненных работ, можно сделать следующие выводы:

для восстановления гильзы цилиндра целесообразно применять технологию напыления;

необходимо провести сравнительный анализ электродуговой металлизации с технологиями плазменного напыления и нанесения гальванических покрытий;

при разработке технологии восстановления гильз цилиндров особое внимание нужно уделить не только оценке износостойкости и коэффициента трения, но также адгезии покрытия к материалу основы;

важнейшей задачей исследований при разработке технологии будет теоретическое и экспериментальное обоснование выбора материала покрытия и его структурно-фазового состояния, обеспечивающего высокую надежность работы трибосистемы.

Библиографический список

1. Заиченко, Я.И. Технология ремонта гильзы блока цилиндра двигателя внутреннего сгорания, подверженного кавитационному износу / Я.И. Заиченко // Вестник ИрГТУ. 2015. № 10 (105). С. 45–49.
2. Денисов, В.И. Восстановление деталей методом сверхзвуковой электродуговой металлизации (технологический процесс). Стандарт организации / В.И. Денисов [и др.] // ФГБНУ ГОСНИТИ. 2015. 32 с.
3. Толкачёв, А.А. Применение электродуговой металлизации для восстановления гильз цилиндров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники / А.А. Толкачёв, В.И. Денисов, Б.А. Матюшкин // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 126. С. 179–182.
4. Толкачёв, А.А. Повышение износостойкости гильз цилиндров дизельных двигателей / А.А. Толкачёв, В.И. Денисов, Б.А. Матюшкин // Сварочное производство. 2016. № 9. С. 48–51.
5. Толкачёв, А.А. Восстановление внутренней поверхности гильз цилиндров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники электродуговой металлизацией / А.А. Толкачёв, Б.А. Матюшкин, В.И. Денисов // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3 (28). С. 524–529.
6. Марьин, Д.М. Формирование модели повышения трибологических характеристик цилиндропоршневой группы / Д.М. Марьин, А.А. Глущенко, И.Р. Салахутдинов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2018. № 2. С. 80–87.
7. Салахутдинов, И.Р. Повышение износостойкости гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания / И.Р. Салахутдинов [и др.] // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 1 (13). С. 102–105.

УДК 537.39

К.Б. Корнеев, Ю.М. Павлова
Тверской государственной технической университет

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ШИНОПРОВОДОВ В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Эксплуатация силовых шинопроводов в сетях низкого напряжения связана с протеканием токов, кратных третьей гармонике. Учет воздействия токов высших гармоник позволяет прогнозировать температурный режим фазных и нулевого проводников, а также выбрать оптимальную геометрию шин.

Ключевые слова: шинопровод, гармоники, моделирование.

THE ANALYSIS OF OPERATING CONDITIONS OF POWER BUSBARS IN LOW VOLTAGE NETWORKS

An operation of power busbars in low voltage networks is related to the flow of third and threefold harmonics currents. Taking into account the effects of higher harmonic currents enables to predict the temperature regime of the phase and zero conductors, as well as to select the optimal bus geometry.

Key words: busbar, harmonics, modeling.

Современные шинопроводы из меди или алюминия находят все большее распространение при проектировании и модернизации питающей электрической сети низкого напряжения промышленных предприятий и больших офисно-торговых центров. Поскольку они имеют более низкое электрическое сопротивление, чем изолированные силовые кабели, то могут пропускать большие электрические токи и поэтому подходят для использования в системах распределения электроэнергии на электростанциях, подстанциях, в промышленности и в центрах обработки данных. Шины обеспечивают большую гибкость, так как они изготовлены из ковких металлов, что допускает значительные изменения их геометрии для обеспечения безопасного и надежного крепления к ограждающим конструкциям, а также в соответствии с расположением электроприемников, подключенных к шинопроводам.

По способу соединения шинопроводы подразделяют на разборные (скрепленные болтами и шпильками) и сварные. Сварные соединения более надежны, однако требуют значительных затрат при изменении геометрии, а также при ремонте. Болтовые соединения более мобильны, могут обеспечить быстрый монтаж, однако при ненадлежащем обслуживании могут ослабевать, приводя к росту сопротивления в месте контакта. В данной зоне возникает значительный нагрев, который дополнительно увеличивает электрическое сопротивление и может привести к выгоранию или даже пожару.

Для предотвращения перегрева в любом из шинных соединений они должны регулярно проверяться. Однако поскольку шины часто находятся внутри пластиковых или металлических коробов, а также часто проходят в труднодоступных местах, визуальный осмотр может быть затруднен.

Выгорание отдельной шины питания является причиной выхода из строя электроустановки, а также угрозой для безопасности обслуживающего персонала, что может привести к незапланированному прекращению работы не только отдельного потребителя, но и предприятия в целом. Чтобы устранить такие риски и избежать значительных затрат вследствие недопоставки продукции, очень важно быстро обнаружить и немедленно отреагировать на любые признаки перегрева в шинопроводе.

Перегрев и последующее выгорание в силовой шине можно предотвратить, быстро и точно диагностировав ненормальное повышение температуры и обнаружив горячие точки. Поскольку шины окружены сильными электрическими полями, обычные электрические датчики, такие как термометры с термопарами, не подходят для этой цели. Шинопроводы также иногда проложены в труднодоступных местах по внутренним конструкциям зданий и могут иметь ряд слепых зон, в которых невозможно или чрезвычайно затруднительно выполнить мониторинг с помощью тепловизионных камер.

При эксплуатации шинопроводов на промышленных предприятиях в ряде случаев наблюдается значительный нагрев объема шинопроводов при токах, значительно уступающих номинальным. При этом диагностика причин данного перегрева может быть затруднена. Как показывает опыт проведения энергетических обследований, выполненных центром «Энергоэффективность» ТвГТУ, одним из факторов, приводящих к такому нагреву, является наличие токов высших гармоник.

Источником высокочастотных возмущений в распределительной сети выступает большинство современных электронных нагрузок, которые можно найти во всех секторах промышленного, коммерческого и бытового оборудования. К ним относятся следующие нелинейные нагрузки:

промышленное оборудование (машины для электрической сварки, индукционные печи, мостовые выпрямители и зарядные устройства);

приводы переменной скорости для двигателей переменного или постоянного тока, преимущественно частотно-регулируемый привод;

источники бесперебойного питания (ИБП) и стабилизаторы;

оборудование информационных технологий (компьютеры, мониторы, серверы, копиры, принтеры и т. д.);

бытовая техника (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы, диммеры и т. д.).

В большей части данного оборудования присутствуют компоненты с нелинейными характеристиками, а также имеется в наличии электронный блок питания. Преимуществами электронного блока питания являются его

стоимость, эффективность и возможность управления его мощностью. Токи высоких гармоник являются естественным побочным продуктом его работы. С целью повышения эффективности такие электронные блоки потребляют ток только в небольшой части электрического цикла.

Гармонические токи, создаваемые этими нагрузками, приводят к негативным последствиям:

искажению напряжения, что ведет к выходу из строя некоторых типов электроприемников;

возросшим потерям электрической мощности, так как среднеквадратичный ток на данном участке сети оказывается значительно выше, чем расчетный ток первой гармоники;

возрастанию риска резонанса при наличии конденсаторов в цепях.

Токи третьей (150 Гц) или кратных гармоник ответственны за увеличение токов в нейтрали в трехфазных четырехпроводных системах. В связи с этим важно выбрать оптимальный дизайн шин для промышленных и офисных зданий, где перегрузка нейтрального провода является серьезной проблемой.

На рис. 1 приведены результаты замеров несинусоидальности напряжения и тока на промышленном предприятии, оснащенной многопоточной печатной линией.

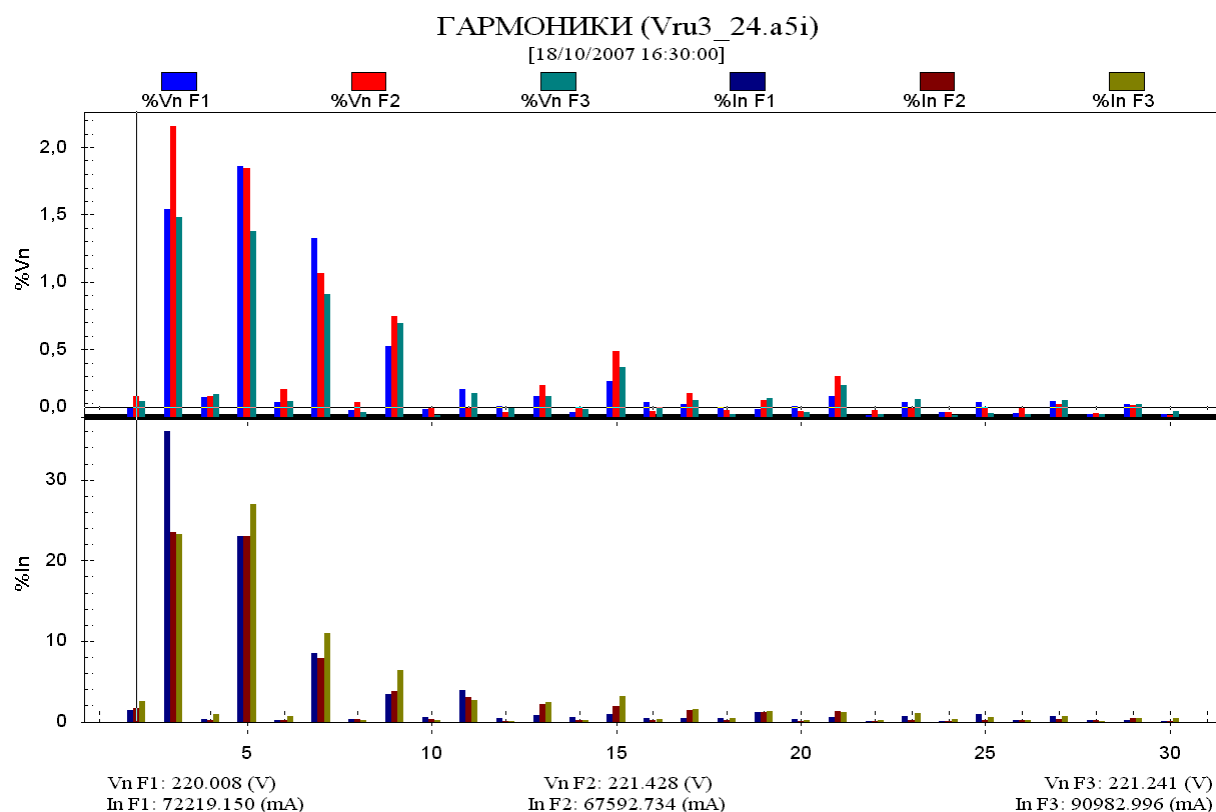


Рис. 1. Относительные значения величин гармоник тока и напряжения в процентах от основной гармоники

Анализ спектра гармоник тока показал, что у ряда потребителей составляющие тока, кратные трем, достигают от 20 до 100 % от основной гармоники. При этом ток нейтрали будет включать только третью или кратную трем гармоники (3, 9, 15 и т. д.). Амплитуда этих токов может значительно превышать амплитуду фазных токов. Как правило, в измерениях тока нейтрали третья гармоника имеет наибольшую величину, а остальные кратные значительно уменьшаются по величине, поэтому не вносят значительный вклад в среднеквадратичное значение.

С ростом токов третьей гармоники растет относительное значение тока нейтрали по сравнению с фазным током. Коэффициент нагрузки нулевого провода (отношение тока в нулевом рабочем проводнике к току линии) в функции от относительной величины третьей гармоники представлен на рис. 2.

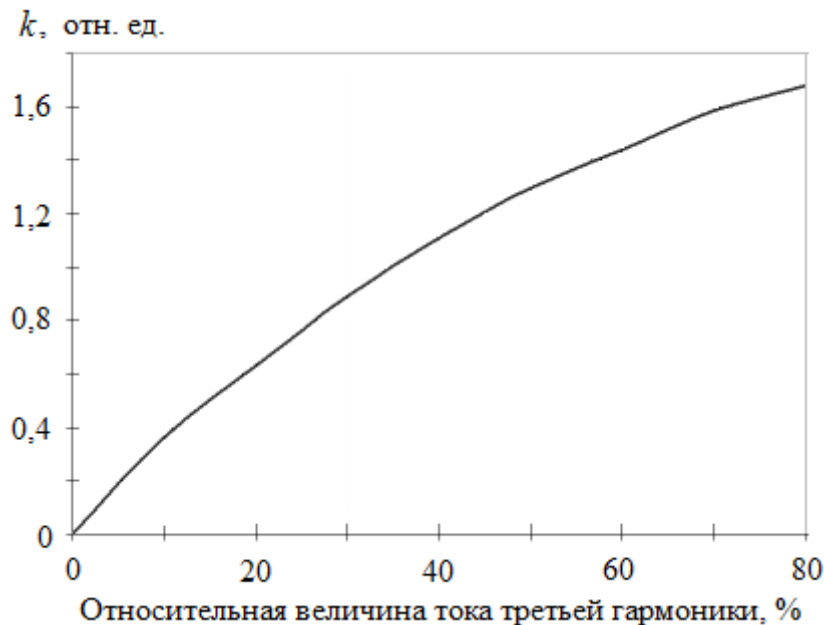


Рис. 2. Коэффициент нагрузки нулевого провода k

В установках, где имеется большое количество однофазных электронных нелинейных нагрузок, подключенных к одной и той же нейтрали, в этой нейтрали может наблюдаться высокий коэффициент нагрузки нейтрального провода. В этих установках ток нейтрали может превышать фазный ток, особое внимание следует уделять размерам нулевой шины. В этом случае установка нейтрального проводника уменьшенного размера недопустима, необходимо учитывать ток во всех четырех шинах.

Так как время, в течение которого суммарная мощность, потребляемая группой нагрузок, равна максимальной, как правило, ограничено, то ток нейтрали будет превышать ток в линии также только в определенных условиях. Обычной практикой в подобных условиях является использование шины нулевого проводника двойной площади сечения. Такая мера не

заявлена в нормативной документации по электроэнергетике, но применяется некоторыми производителями оборудования.

В сильно разветвленных электрических сетях с большим количеством однофазных потребителей, подключенных к шинопроводам, возникает явление циркуляции токов высших гармоник. Такая циркуляция вызывает дополнительный нагрев проводников по нескольким причинам:

тепло вырабатывается в результате высоких уровней токов, кратных третьей гармонике, при относительно небольшом токе, протекающем в нейтрали при нормальных симметричных линейных нагрузках;

возможен дополнительный нагрев всех проводников за счет проявления скин-эффекта и потерь на вихревые токи за счет циркуляции токов высших гармоник.

Моделирование мощности, выделяемой в шинах, с помощью программной среды *ABAQUS FEA* [1] позволяет оценить влияние токов высших гармоник на величину нагрева проводников. Расчет был произведен для двух различных типов конструкции сборных шин, имеющих одинаковую общую площадь поперечного сечения, при двукратной площади сечения нулевой шины и при площади, равной площади фазного шинопровода. Расчеты показывают, что увеличение площади поверхности теплоотдачи (т. е. изменение линейных габаритов шинопровода при сохранении площади сечения) оказывается предпочтительнее увеличения площади сечения нулевого проводника.

В зависимости от расчетного уровня 3-й гармоники возможны три случая.

Уровень тока третьей гармоники ниже 15 % от уровня основной гармоники. Нулевой проводник считается незагруженным. Размер фазных проводников зависит только от величины фазных токов. Согласно правилам МЭК 60439 [2], размер нейтрального проводника может быть меньше, чем у фазных проводников, если площадь поперечного сечения превышает 16 мм^2 для меди или 25 мм^2 для алюминия.

Уровень тока третьей гармоники 15...33 % от уровня основной гармоники. По нулевому проводнику протекает ток. Расчетный ток в фазных шинах должен быть увеличен на коэффициент 1,19. Как правило, это приводит к выбору шинопроводов с сечением, ближайшим большим к выбранному по номинальному току. Размер нейтрального проводника должен быть равен размеру фазных шин.

Уровень тока третьей гармоники выше 33 % от уровня тока основной гармоники. Нейтральный проводник считается проводником с током. Рекомендуемый подход – использовать проводники одинакового размера для фазы и нейтрали. Ток нейтрали является преобладающим при выборе размера проводника. Как правило, это приводит к выбору шинопроводной системы, номинальная мощность которой выше требуемой пропускной способности (оценочно в два раза) [3].

Для контроля перегрева шин и принятия мер по недопущению выхода их из строя возможно применение современных методов контроля температуры, одним из которых является датчик температуры на основе оптоволоконного кабеля. Поскольку такой датчик не подвержен влиянию электромагнитных помех, он может контролировать распределение температуры с точностью до 1 метра в условиях сильного электрического поля. Благодаря быстрому обнаружению перегрева и точному определению местоположения горячей точки такой датчик обеспечивает упреждающее воздействие до того, как такое превышение приведет к дорогостоящему ремонту или выходу из строя оборудования [4].

Оптоволоконный кабель может быть установлен непосредственно на шину или на поверхность защитной крышки шинопровода. Используя импульсы лазерного излучения, распространяющегося по оптоволоконному кабелю, датчик способен обнаруживать зависящие от температуры изменения частоты сигнала, которые являются результатом комбинационного рассеяния света (эффект Рамана), которое происходит по всей длине оптоволоконного кабеля. Благодаря этому эффекту можно определить местоположение этих изменений температуры, используя свет, отраженный назад к источнику (обратное рассеяние). Измеряя время, которое требуется свету, чтобы вернуться обратно к источнику (обратное рассеяние), можно рассчитать местоположение каждого изменения температуры. Аномалии могут быть обнаружены с пространственным разрешением всего один метр. Недостатком этого метода является высокая стоимость приемо-регистрирующей аппаратуры.

Таким образом, эффективная и безопасная эксплуатация силовых шинопроводов для электроснабжения потребителей с несинусоидальной нагрузкой возможна при учете влияния токов высших гармоник на нулевой проводник. Контроль перегрева, вызываемого токами нулевой последовательности, позволяет не допустить выхода из строя оборудования и шинопроводов.

Библиографический список

1. Корнеев, К.Б. Особенности моделирования электроконтактного соединения в среде ABAQUS FEA / К.Б. Корнеев, Раймонд Осей Овусу // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. 2018. Вып. 11. С. 118–123.
2. ГОСТ Р 51321.1-2007 (МЭК 60439-1:2004) Устройства комплектные низковольтные распределения и управления. Часть 1. Устройства, испытанные полностью или частично. Общие технические требования и методы испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200067411>
3. Рябчицкий, М.В. Методика выбора сборных шин для низковольтных комплектных устройств / М.В. Рябчицкий [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 6. С. 35–41.
4. Improved Detection of Bus Bar Overheating / Yokogawa Electric Corporation. 2017. URL: <https://web-material3.yokogawa.com/1/13457/files/AN39J02T30-08EN.pdf>

СОДЕРЖАНИЕ

В.В. Измайлов Механика и физика контактного взаимодействия: из XX века в век XXI (История одного сборника научных трудов)	4
А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова Исследование ионно-плазменного покрытия для электрических разъемных соединений	10
Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, Е.В. Маркова, Г.В. Сержантова Изучение механизма разрушения стали 12Х2Н4А после химико-термической обработки	15
Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева, Е.В. Маркова, И.Ю. Канунникова Влияние амплитуды ультразвуковых напряжений на параметры субструктуры борированного слоя	20
О.В. Сулягин, А.А. Рачишкин Системный подход к оптимизации надежности механических систем	25
А.У. Мигранова, А.М. Мигранов Экономическая эффективность применения диагностического устройства	30
М.Ш. Мигранов, Н.А. Сухова, С.Р. Шехтман Покрывтия для защиты деталей авиационной техники	34
М.Ш. Мигранов, Н.А. Сухова, С.Р. Шехтман Многослойные покрытия в условиях модифицирования поверхности	39
В.В. Измайлов, М.В. Новоселова Зависимость коэффициента трения от нагрузки и законы трения Амонтона и Кулона	44
И.В. Горлов, А.Н. Болотов Изменение свойств полимерных узлов трения при низких температурах	54
А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков, Г.Б. Бурдо Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 2. Дисперсная фаза и ПАВ-стабилизатор магнитных масел	59
А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова Повышение электроэрозионной износостойкости покрытия для электрических контактов	67
Д.А. Зоренко Повышение износостойкости деталей из титана путем нанесения оксидных покрытий	71
А.М. Мигранов, А.Ф. Садыков Оценка износостойкости режущего инструмента с покрытиями	74
А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала	80
Ю.Н. Павлов, А.В. Кондратьев, Д.Г. Масленников, С.М. Кочканян Исследование вибрационного рабочего органа грунтоуплотняющей машины	87

С.П. Рыков, В.В. Мешков Влияние технологических параметров абразивной струи из аппарата с эрлифтом на характеристики стальной поверхности	91
Г.В. Раткевич, И.А. Смолякова, Л.Е. Афанасьева, М.В. Новоселова Влияние температуры отпуска на триботехнические свойства упрочненной лазером быстрорежущей стали	96
А.Ю. Лаврентьев, А.А. Тимофеев Износостойкие покрытия гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания	102
К.Б. Корнеев, Ю.М. Павлова Анализ режимов работы силовых шинопроводов в сетях низкого напряжения	105

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 12

Ответственный редактор В.В. Измайлов
Редактор Е.Н. Спиридонова
Корректор
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать

Формат 60×84/16

Физ. печ. л.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л.

Заказ №

Бумага писчая

Уч.-изд. л.

С – 20

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22