

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ  
имени В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
БЕЛАРУСИ»**

УДК 621.893: 621.8: 620.193.4

**ГУЦЕВ**  
**Дмитрий Михайлович**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
НИКЕЛЬ-ФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах»

Гомель, 2018

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси».

**Научный руководитель:** **Григорьев Андрей Яковлевич**,  
доктор технических наук, профессор, директор Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»

**Официальные оппоненты:** **Кузей Анатолий Михайлович**,  
доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Физика поверхностных явлений» Государственного научного учреждения «Физико-технический институт НАН Беларуси»

**Попов Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение и технология материалов» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

**Оппонирующая организация:** Учреждение образование «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

Защита состоится «18» октября 2018 г. в 16.00 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси» по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32а; e-mail: mpri@mail.ru; тел.: +375(0232)34-17-11; факс: +375(0232)34-06-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси».

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2018 года

Учёный секретарь совета  
по защите диссертаций

Н.С. Винидиктова

## ВВЕДЕНИЕ

В современной технике широко применяются износостойкие и антифрикционные покрытия. Их использование обеспечивает значительную экономию дорогостоящих материалов узлов трения, повышая их функциональность и ремонтпригодность.

Никель-фосфорные (Ni-P) покрытия занимают особое место среди материалов триботехнического назначения. Стойкость к воздействию агрессивных сред, высокая твердость и износостойкость, постоянство коэффициента трения в широком интервале нагрузок и его малая зависимость от внешних факторов, позволяют использовать эти покрытия в оборудовании, работающем в экстремальных режимах – от прецизионных устройств до узлов трения аэрокосмической техники.

Ni-P покрытия могут формироваться как с помощью гальванических, так и химических методов, технологичность и точность которых обеспечивает получение слоев толщиной от нескольких десятков нанометров до сотен микрометров. В настоящее время наиболее перспективным направлением в разработке Ni-P покрытий является их формирование при совместном осаждении с дисперсными наполнителями. Широкие возможности управления процессом осаждения позволяет получать покрытия для узлов трения, эксплуатирующихся в различных условиях. Однако сведения о влиянии наполнителей, их концентрации и размеров на механизмы трения антифрикционных материалов на основе Ni-P в ряде случаев противоречивы. Данные о закономерностях трения композиционных покрытий на основе Ni-P позволят разработать более эффективные покрытия, адаптированные для работы в узлах трения механизмов различного назначения.

В рамках настоящей работы проведен анализ существующих методов формирования никель-фосфорных покрытий, изучены закономерности трения композиционных Ni-P покрытий, на основе которых созданы материалы для узлов трения с улучшенными характеристиками.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами.** Результаты, представленные в диссертационной работе, связаны с научно-исследовательскими работами, выполненными в рамках Государственных программ НАН Беларуси по решению важнейших проблем в области естественных наук: «Полимерные материалы и технологии», задание 1.24 (2008-2010 гг., гос.рег № 20082699), «Полимеры и композиты», задание 2.04 (2010-2013 гг., гос. рег № 20114917), «Космические исследования», задание 10 (2010-2012 гг., гос. рег № 20102182), Союзных программ «Космос-СГ»,

задание 5.3.3 (2004-2007 гг., гос. рег № 20044115) и «Космос-НТ», задание 3.3 (2008-2011 гг., гос. рег № 20083503); хозяйственных договоров и контрактов № И-60/2011 (ИТА НАН Беларуси), № И-45/2010 (БГУИР); № И-92/2012 (ООО «НТЦ Микротурбинные технологии», Россия); проектов БРФФИ договоры №Т08-211 (2008-2010 гг. гос. рег № 20082699), № Т10Р-124 (2010-2012 гг., гос. рег № 20102006), № Т11СРБ-003 (2011-2013 гг., гос. рег № 20120193), № Т11ПЛШ-004 (2011-2013 гг., гос. рег № 20120192); международного проекта EсоNet № 18918RG (2008-2010 гг.).

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы заключается в изучении механизмов трения Ni-P покрытий для определения методов их модификации и создания композиционных материалов узлов трения с улучшенными триботехническими характеристиками. Для ее достижения определены следующие задачи:

- исследовать структуру покрытий, их физико-механические характеристики и напряженное состояние в контакте с твердыми телами;
- установить закономерности трения и изнашивания покрытий в зависимости от их структуры, физико-механических характеристик и напряженного состояния;
- разработать методы введения мелкодисперсных частиц наполнителей в Ni-P покрытия в процессе их формирования, включая создание методов обеспечения заданной плотности частиц и их распределения по толщине;
- разработать методы формирования антифрикционных и износостойких покрытий для экстремальных условий трения на основе Ni-P матрицы и наполнителей с заданными функциональными свойствами.

*Объект исследования* – композиционные Ni-P покрытия.

*Предмет исследования* – закономерности фрикционного взаимодействия в связи с физико-механическими свойствами, структурой, видом и концентрацией наполнителя композиционных Ni-P покрытий.

**Научная новизна.** Установлено, что при удельных нагрузках до 300 МПа, механизм изнашивания системы Ni-P покрытие – металлическое контртело обусловлен усталостным отслоением поверхностного слоя покрытия, его хрупким разрушением и абразивным воздействием образующихся частиц износа. При удельных давлениях свыше 300 МПа несущая способность Ni-P покрытий ограничивается пирофорностью мелкодисперсных продуктов износа никеля, взаимодействующих с кислородом воздуха и фосфором и образующих никель-фосфатные стекла с высоким (0,8 – 1,1) коэффициентом трения.

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние системы подложка-покрытие-контртело в условиях фрикционного контакта, определено,

что покрытия толщиной 1- 10 мкм при контактных давлениях 130 – 700 МПа и в диапазоне скоростей 0,001 – 15 м/с в условиях трения без смазки обеспечивают упруго-пластическое взаимодействие в системе.

Предложено для снижения коэффициента трения Ni-P покрытий модифицировать их поверхность пластичными термостойкими наполнителями, ограничивающими доступ кислорода в зону трения, и вводить в их состав твердые частицы для увеличения механической прочности и уменьшения площади фрикционного контакта контртела с Ni-P фазой. Показано, что введение в Ni-P покрытие 7-10% мелкодисперсных частиц диоксида кремния, позволяет повысить их твердость на 30% и снизить коэффициент трения на 35%, а дополнительная обработка покрытия низкомолекулярным политетрафторэтиленом (ПТФЭ) с последующей выдержкой в печи при температуре 330-350°C в течение 1 часа, снижает коэффициент трения по сравнению с базовым покрытием на 80% (до 0,09).

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Установленные закономерности контактного взаимодействия Ni-P покрытий на металлическом основании, позволившие определить, что оптимальная толщина покрытий лежит в диапазоне 1-10 мкм, обеспечивая оптимальное для условий сухого трения упругопластическое взаимодействие системы покрытие-подложка с контртелом в зоне трения;
2. Экспериментальные результаты исследования зависимости триботехнических характеристик Ni-P покрытий от их состава, физико-механических свойств и режимов испытаний, свидетельствующие, что предельная нагрузка покрытия при трении на воздухе ограничивается пирофорностью частиц износа никеля, формирующих на поверхности слои с высоким коэффициентом трения;
3. Методы получения композиционных Ni-P покрытий, заключающиеся во введении в покрытие одновременным соосаждением от 7 до 10% мелкодисперсного оксида кремния, нанесением на поверхность полученного покрытия низкомолекулярного ПТФЭ и его последующей термообработке при температуре 330-350°C в течении 1 часа, что в совокупности обеспечивает снижение коэффициента трения от 30 до 80% по сравнению с исходным;
4. Новые составы композиционных покрытий Ni-P / мелкодисперсный диоксид кремния и Ni-P / ПТФЭ (с вариантами), обеспечивающие реализацию предложенных методов получения износостойких антифрикционных покрытий с увеличенной в 1,3 раза твердостью и уменьшенным в 1,8 раз коэффициентом трения.

**Личный вклад соискателя.** Автор принимал непосредственное участие в постановке задач исследования, планировании и проведении экспери-

ментов по установлению влияния модификаторов на триботехнические и физико-механические характеристики покрытий, исследовании поведения покрытий в экстремальных условиях, анализе полученных результатов и формулировании выводов [1 – 5, 7 – 25], разработке оборудования триботехнического назначения [6, 14, 17, 22, 25 – 26], разработке состава и технологических методов формирования модифицированных Ni-P покрытий [27, 28]. Работы [9, 10, 20, 22, 23, 28], оформленные в виде публикаций, подготовлены самостоятельно.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты научных исследований и практического использования разработок были представлены на следующих научно-технических конференциях: на пяти Республиканских научно-технических конференциях молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (Гомель, 2008, 2009, 2010, 2012, 2014); на II международной конференции «Актуальные проблемы механики сплошной среды» (Дилижан, Армения, 2010), международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2011), на пяти международных научно-технических конференциях «Полимерные композиты и трибология» (Гомель, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017), международной научно-технической конференции «Современные проблемы трибологии» (Киев, 2010), на Всероссийском совещании по температуроустойчивым функциональным покрытиям (Санкт-Петербург, 2010), 9-ой Всероссийской конференции «Химия фтора» (Москва, 2012), на двух международных научно-технических конференциях «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 2010, 2014), научно-технической конференции «Аддитивные технологии, материалы и конструкции» (Гродно, 2016).

**Опубликованность результатов диссертации.** По результатам исследований опубликовано 28 научных работ, включающих: 1 главу в монографии, 5 статей в журналах включенных в перечень научных изданий ВАК, 6 статей в сборниках материалов конференций, 12 тезисов докладов на научных конференциях; 4 патента РБ на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, в том числе, 65 рисунков на 26 страницах и 22 таблицы на 8 страницах, список использованных источников из 128 наименований на 10 стр., список опубликованных работ автора из 28 наименований на 4 стр., 9 приложений на 10 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена информация об основных свойствах и преимуществах применения никель-фосфорных покрытий для улучшения эксплуатационных характеристик деталей узлов трения. Приведены примеры использования этих покрытий в различных механизмах. Отмечены основные научные школы, развивающие данное трибоматериаловедческое направление. Рассмотрены пути улучшения антифрикционных и противоизносных свойств никель-фосфорных покрытий и обоснована актуальность темы диссертации.

**В первой главе** представлена информация о современных подходах к повышению надежности и функциональности деталей узлов трения с помощью покрытий. Приведен обзор известных данных о механизмах формирования Ni-P слоев на поверхностях металлов. Рассмотрены современные представления о процессе химического осаждения Ni-P покрытий, как наиболее перспективном методе формирования функциональных покрытий триботехнического назначения. Проанализированы методы модификации Ni-P покрытий при совместном осаждении базового слоя и высокодисперсных твердых частиц (SiC, B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или частиц твердых смазок (ПТФЭ, MoS<sub>2</sub>, графит).

Приведены сведения о зависимости скорости осаждения и содержания никеля и фосфора в покрытиях от температуры, кислотности рабочих сред, состава буферных растворов и стабилизаторов. Сделан вывод о том, что известные методы нанесения покрытий позволяют обеспечить равномерное содержание основных элементов покрытия и их толщины.

Рассмотрена зависимость структуры Ni-P покрытий и морфологии их поверхностей от вида, дисперсности и формы наполнителей. Показано, что при прочих равных условиях, наибольшее влияние на структуру покрытий оказывает дисперсность наполнителей. Выявлено, что концентрация дисперсной фазы влияет на концентрацию частиц в покрытии только до ее определенных значений. Обсуждены технологические приемы формирования Ni-P покрытий с дисперсными наполнителями. Отмечена, низкая устойчивость суспензии используемая для получения композиционных покрытий.

Приведен обзор известных данных о физико-механических свойствах Ni-P покрытий. Проанализированы фазовые диаграммы покрытий и данные о связи механических характеристик с фазовым составом. Рассмотрены вопросы, касающиеся повышения адгезии покрытий с металлической подложкой и роль в этом процессов термической обработки.

Показано что триботехнические характеристики композиционных Ni-P покрытий определяются их структурой, концентрацией фосфора и свойствами дисперсных фаз. Отмечается неоднозначность и сложная зависимость

фрикционного взаимодействия композиционных никель-фосфорных покрытий со стальным контртелом от типа наполнителя и способа его введения.

По результатам аналитического обзора сделаны выводы об ограниченности, и в ряде случаев противоречивости, известных данных о механизмах трения композиционных Ni-P покрытий, влияния на эти механизмы напряженно-деформированного состояния, недостаточном объеме данных о влиянии состава, размера частиц дисперсной фазы на механизмы фрикционного взаимодействия в системе покрытие-подложка. Отмечено что, существующие методы формирования композиционных Ni-P покрытий не обеспечивают заданную плотность частиц и их распределение по толщине покрытия. В совокупности это ограничивает эффективное управление триботехническими свойствами Ni-P покрытий.

На основании проведенного анализа научно-технической информации сформулирована цель и задачи исследований.

**Во второй главе** описаны объекты и методы исследования. Основным объектом исследований являлись никель-фосфорные покрытия как в чистом виде (базовые покрытия), так и с наполнителями различной природы и дисперсности (композиционные покрытия).

При получении базовых Ni-P покрытий в качестве исходных компонентов использовались никель серноокислый (ГОСТ 4465-74), никель хлористый (ГОСТ 4038-79), гипофосфит натрия (натрий фосфорноватистокислый) (ГОСТ 200-76), натрий уксуснокислый (ГОСТ 2080-76), олово хлористое (ТУ 6-09-5384-88), палладий хлористый (ТУ 6-09-2025-86), кислота серная (ГОСТ 2184—77). Покрытия наносились на плоские образцы из стали 3 (ГОСТ 380-2005) и 45 (ГОСТ 1055-88), алюминия марки Д16А (ГОСТ 21631-76) и электротехнической меди М00, (ГОСТ 859-78), обработанных шлифованием (Ra 0,08—1,60 мкм).

Для получения композиционных покрытий использовались дисульфид молибдена ДМИ-7 ТУ 48-19-133-90 с размером частиц до 7 мкм, углерод технический П 245 ГОСТ 7885-86 (сажа), графит ГС-1 ГОСТ 8295-73, диоксид кремния «Аэросил А300» ГОСТ 14922-77. Низкомолекулярный мелкодисперсный ПТФЭ наносился непосредственно на поверхность покрытия из спиртовой дисперсии с последующим оплавлением в печи.

Покрытия наносили методом химического осаждения из разработанных электролитов, состав которых защищен патентами Республики Беларусь (пат. № 18117, №21068). Процессы нанесения композиционных покрытий реализованы в виде программ и методик, а также технологических инструкций, зарегистрированных в ИММС НАН Беларуси (ПМИ № 003-2009, ТИ № 65-2011, ТИ № 66-2011, ТИ №67-2011). После нанесения покрытия подвергали термической обработке в воздушной среде, выдержкой при 350 – 450°С в те-



чение часа в печи с электрическим нагревом SNOL 8,2/1100 (Литва).

Толщина нанесенных покрытий определялась по стандарту EN 1071, измерением размеров кратера, образованного вращающимся абразивным шариком на устройстве «KaloMAX» (Германия) или путем анализа изображений конической лунки, образованной сверлом с углом в плане 120°. Адгезия покрытий оценивалась по стандарту CN/TS 1071-8 вдавливанием наконечника Роквелла на глубину, превышающую толщину покрытия с последующим анализом трещин и отслаивания покрытия на краю отпечатка.

Значения микротвердости покрытий определяли методом восстановленного отпечатка, полученного пирамидой Виккерса (ГОСТ 2999-75, ГОСТ 9450-76) и пирамидой Кнуппа (ГОСТ 9377-81), на микротвердомере ПМТ-3М. Планиметрические размеры отпечатков оценивались с помощью программно-аппаратного комплекса «Optizer» (ИММС НАН Беларуси) в соответствии с программой и разработанной автором методикой № 022-2012.

Процессы фазовых превращений в покрытиях исследовали на сканирующем дифференциальном калориметре Diamond DSC (PerkinElmer, США). Структурные особенности покрытий изучали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 (НПО «Буревестник», Россия). Морфологию поверхностей исследовали методами растровой электронной и оптической микроскопии на приборах VEGA II LSH (Tescan, Чехия), HITACHI TM-1000 (Япония) и OLYMPUS BX41 (Япония). Элементный анализ проводили с помощью системы энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD (OXFORD Instruments Analytical, Великобритания). Оценку химического состава продуктов износа покрытий проводили на вторично-ионном масс-спектрометре MS 7201M (ЗЭМ, Украина).

Определение сил и коэффициентов трения покрытий осуществляли на модульном трибометре МТУ-2К7, в разработке которого автор принимал непосредственное участие (пат. № 5603 и № 6041 Республика Беларусь). Испытания проводились по схеме контакта сфера-плоскость при их возвратно поступательном относительном движении (программа и методика измерений ПМИ № 004-2008) и универсальном трибометре УМТ-2 (СЕТР, США). В качестве контртела использовали шарик из стали ШХ15 (Ø4,7 мм). Эксперименты осуществлялись при трении без смазочного материала, с нагрузками на индентор 100, 250, 500, 750 и 1000 мН, скорости скольжения 2,5 мм/с и длине хода 10 мм. Линейный износ покрытий оценивали на интерферометре Линника МИИ-4М (ЛОМО, Россия) по изгибу интерференционных полос, полученных при освещении образца белым светом. Испытания износостойкости покрытий в абразивной среде проводили по ГОСТ 23.210-78 на центробежном ускорителе ЦУК-4 (ГОСТ 23.201-78).

Коррозионную стойкость оценивали по стандарту ССТ-1 (ССТ-А) в ка-

мере циклических испытаний Q-FOG (Q-Lab, США) имитирующей процессы коррозии материалов под воздействием атмосферных факторов и по ГОСТ 9.909-86 «Метод испытания в морской воде».

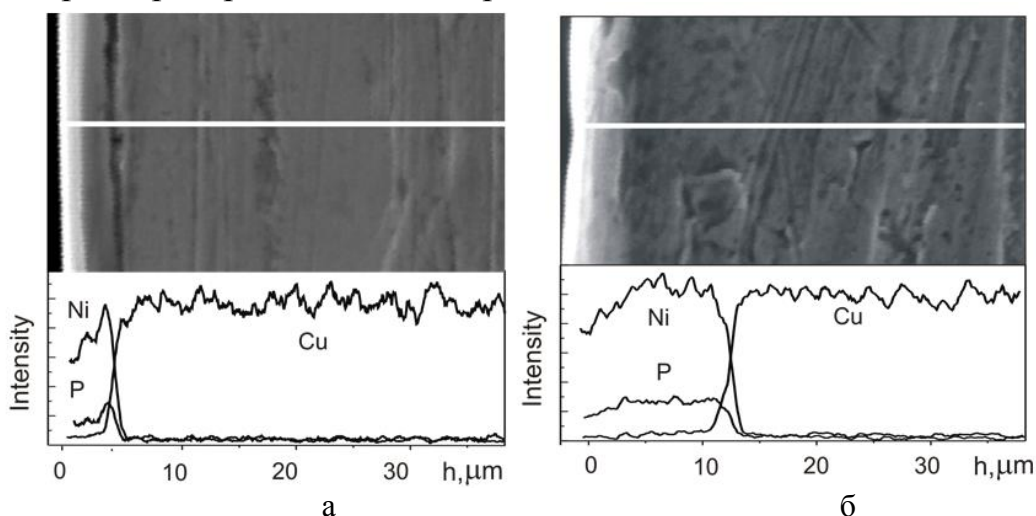
**Третья глава** посвящена выбору базового метода формирования Ni-P покрытий, исследованию физико-механических свойств Ni-P покрытий, установлению их механизмов трения, оптимальной толщины покрытий, требуемой по условиям упругопластичного фрикционного нагружения, разработке методов формирования композиционных покрытий различного состава, а также изучению взаимосвязи морфологии и шероховатости покрытий с триботехническими характеристиками.

Для выбора базового метода формирования Ni-P покрытий были изготовлены и исследованы покрытия, полученные химическим и гальваническим способом на подложках из электротехнической меди (таблица 1).

Таблица 1 Характеристики исследованных образцов

Характеристики покрытия	Обозначение покрытия					
	1		2		3	
	а	б	а	б	а	б
Метод нанесения	химический			гальванический		
Толщина, мкм	1	5	1	5	1	5
Содержание Ni, %масс	85,24	84,40	91,12	91,65	89,56	90,03
Содержание P, %масс	15,06	15,60	8,88	8,35	10,44	9,97

Анализ распределения элементов на границе раздела гальваническое покрытие-подложка показал повышенное содержание фосфора в приповерхностном слое на поверхности подложки (рисунок 1), что свидетельствует о его неравномерном распределении в покрытии.



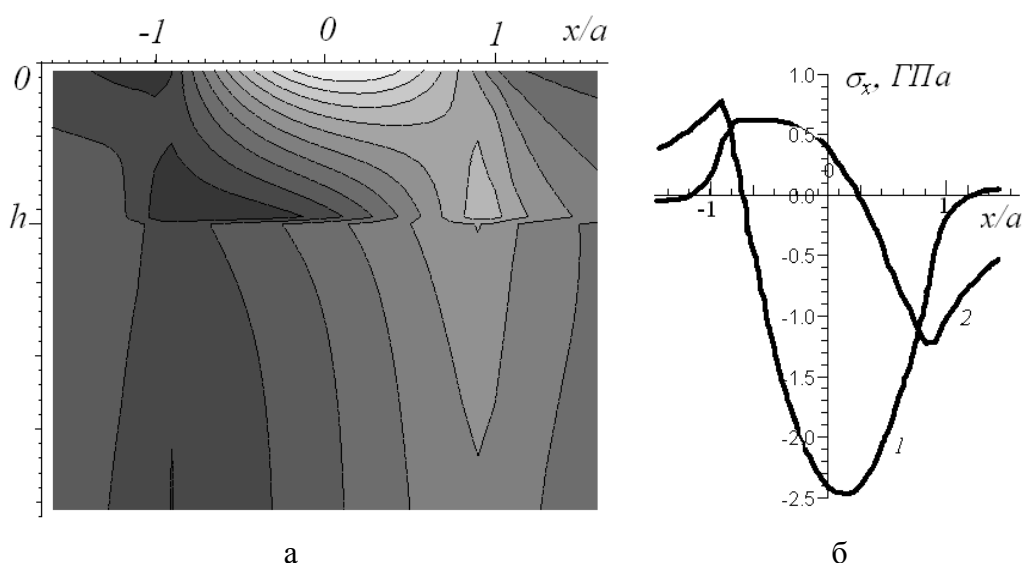
а – образец 1б; б - образец 3б

Рисунок 1. – Распределение компонентов покрытия Ni-P на поперечном срезе

Твердость гальванического покрытия в 1,3-1,7 раза выше твердости по-

крытия полученного химическим осаждением. Оценку влияния свойств подложки на величину твердости проводили на поперечных сечениях, а также по методу Шульца-Ганемана. Полученные данные подтвердили неоднородное распределение фосфора в покрытии, полученного гальваническим способом. Таким образом показано, что метод химического осаждения позволяет получать материалы с более однородным распределением фосфора по толщине покрытия.

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния никель-фосфорного покрытия при фрикционном контакте со стальным контртелом. Получено распределение растягивающих и сжимающих напряжений на поверхности покрытия и на его границе раздела с подложкой (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Распределение растягивающих и сжимающих напряжений в Ni-P покрытии и основании (а), на поверхности (б, кривая 1) и границе раздела с подложкой (б, кривая 2)**

Определено, что оптимальный диапазон толщин покрытий составляет 1-10 мкм, обеспечивая при легких и средних нагрузках трения (до 300 МПа) без смазки упругопластическое взаимодействие системы покрытие-подложка с контртелом в зоне трения.

Исследование процессов формирования композиционных покрытий показали, что разработанный раствор для химического осаждения содержащий сульфата Ni ( $\text{NiSO}_4$ ) – 30 г/л, гипофосфита Na ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) – 30 г/л, глицина (аминоуксусной кислоты  $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$ ) – 40 г/л, ацетата натрия ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) – 7,5 г/л, гидроксида натрия (NaOH), концентрации дисперсной фазы 7-10 г/л (пат. РБ № 18117 и № 21068), при 80°C седиментационно-устойчив, флотации частиц дисперсной фазы пузырьками водорода не происходит.

Установлено, что формирование композиционных Ni-P покрытий сопровождается изменением шероховатости их поверхности, таблица 2.

Таблица 2. – Влияние дисперсных добавок на шероховатость покрытий

Образец	Шероховатость, Ra	Образец	Шероховатость, Ra
Подложка Cu	1,55	Подложка сталь	1,44
Cu +Ni-P	0,84	Сталь+Ni-P	0,67
Cu +Ni-P +сажа	0,92	Сталь+Ni-P+сажа	1,47
Cu +Ni-P +графит	0,79	Сталь+Ni-P+графит	0,99
Cu +Ni-P +SiO <sub>2</sub>	1,14	Сталь+Ni-P+SiO <sub>2</sub>	1,15

Показано, что наблюдаемое изменение шероховатости при введении в раствор химического осаждения частиц дисперсной фазы обусловлено уменьшением размеров дендритов и формированием более однородной микроструктуры композиционных покрытий. Эти эффекты объясняются тем, что в области концентрации дисперсной фазы 7–10% в суспензии содержание ее в диффузионном пограничном слое на поверхности растущего покрытия достаточно для блокирования поверхности и снижения скорости роста наиболее быстрорастущих центров кристаллизации и не препятствуют зарождению новых центров. В свою очередь, уменьшение величины дендритов способствует заземлению частиц дисперсных фаз и повышению их содержания в композиционных покрытиях. Снижение шероховатости композиционных покрытий с частицами графита, сажи, SiO<sub>2</sub> также связано с выравниванием скоростей роста центров кристаллизации во впадинах и выступах микрорельефа подложки и покрытий, а также преимущественным зарастиванием частиц дисперсных фаз во впадинах композиционных покрытий. Такой микрорельеф способствует более равномерному распределению нагрузки в области фрикционного взаимодействия и снижению удельных нагрузок в расчете на единицу площади.

Исследования механизмов трения Ni-P покрытий показали существенное влияние на их триботехнические характеристики химических процессов, протекающих в зоне трения. В области нагрузок до 250-300 МПа основным механизмом износа является усталостное разрушение, сопутствующее хрупкое разрушение и вызванный им абразивный износ. Образующиеся при фрикционном взаимодействии ультрадисперсные частицы Ni-P покрытия с пиррофорными свойствами окисляются в результате трения. Продукты окисления никеля и фосфора переносятся на поверхность индентора. Следствием этих процессов является увеличение коэффициента трения, изменение состава продуктов износа и поверхностного слоя покрытия (рисунок 3, 4, таблица 3).

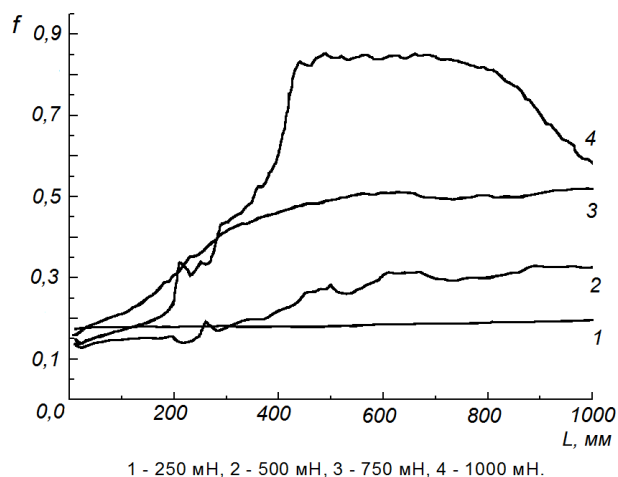
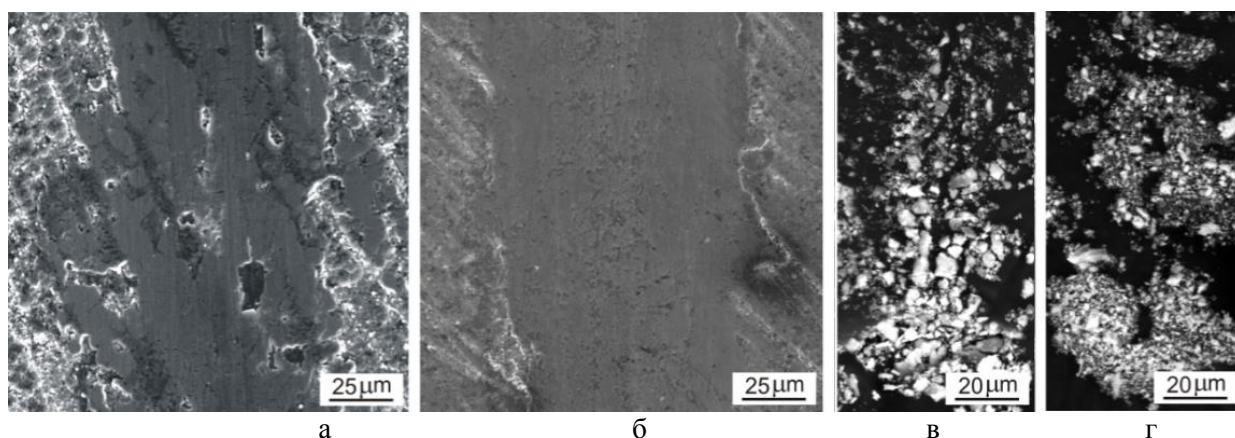


Таблица 3. – Содержание кислорода в покрытии при трении, масс. %

Место измерения	Нагрузка, мН	
	250	750
Частицы износа	2,7	5,6
След трения	9,6	19,0

Рисунок 3. – Зависимость коэффициента трения от нагрузки



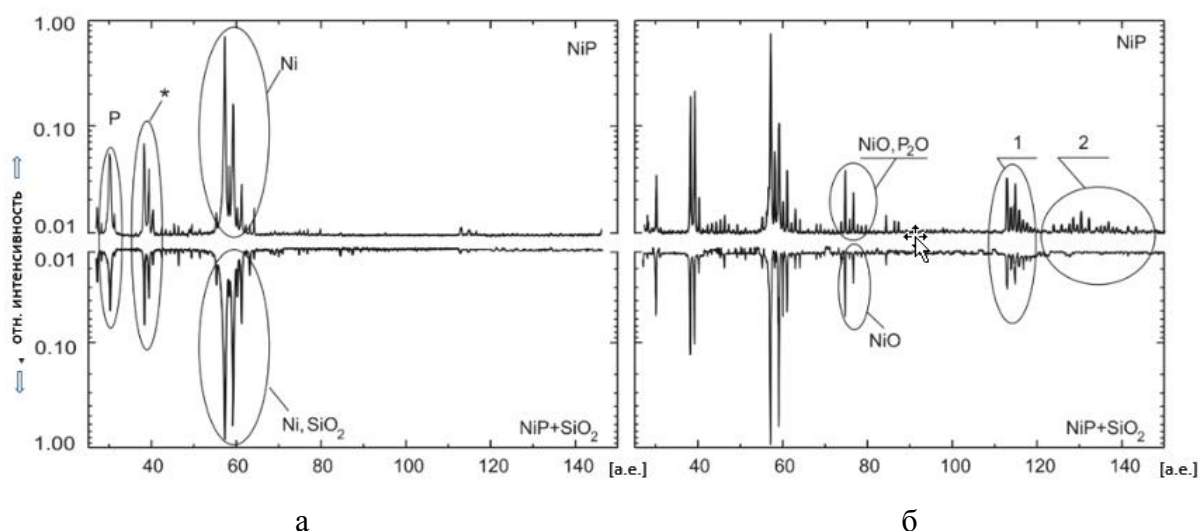
а, б – дорожки трения и в, г - частицы износа для образцов Ni-P+SiO<sub>2</sub> (а, в) и Ni-P (б, г)

Рисунок 4. – РЭМ изображения дорожек трения и продуктов износа после триботехнических исследований

Композиционные покрытия вне зависимости от состава дисперсной фазы имеют более низкий коэффициент трения, чем исходные Ni-P покрытия. Формирование характерных, гладких поверхностей трения покрытий с частицами MoS<sub>2</sub>, графита, сажи отмечается при давлениях 350 – 450 МПа (рисунок 4 б). Морфология поверхности частиц износа также изменяется, вместо осколочной формы частицы приобретают округлую форму и образуют агломераты (рисунок 4 г).

Для всех покрытий, кроме покрытий с SiO<sub>2</sub>, наблюдается критическое значение величины нагрузки, по достижению которой происходит резкое увеличение коэффициента трения (в 2-3 раза) и умеренное увеличение износа.

Анализ химического состава методом вторично-ионной масс-спектрометрии слоев поверхностей трения и частиц износа исходных Ni-P покрытий и покрытий с SiO<sub>2</sub> показал наличие многочисленных пиков в диапазонах масс 110-120 и 125-140 [а.е.] (рисунок 5), соответствующим фрагментам высокомолекулярных соединений фосфора, никеля и кислорода – линейных фосфатов (Ni<sub>n+2</sub>P<sub>n</sub>O<sub>3n+1</sub>), кольцевых метафосфатов (Ni<sub>n</sub>P<sub>n</sub>O<sub>3n</sub>) и двойного оксида (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-NiO), которые являются основой фосфатных стекол, формирующих гладкую поверхность трения на исходном Ni-P покрытий и их отсутствие на дорожках трения покрытий с SiO<sub>2</sub>.



**а – покрытия перед трибоиспытаниями, б – частицы износа и дорожки трения исследуемых покрытий. \* – обозначен фон масс-спектрометра**

**Рисунок 5. – Масс-спектры покрытий**

Таким образом, формирование гладких поверхностей износа указывает на повышение температуры в зоне фрикционного контакта, окисление покрытий, образование пленок легкоплавких фосфатных стекол на их поверхности и частиц износа из фосфатных стекол.

Морфология поверхности композиционных покрытий и поверхности износа показывают, что SiO<sub>2</sub> присутствует в покрытии как между зернами так и в зернах в форме ультрадисперсных агломератов, в отличие от более крупных частиц MoS<sub>2</sub>, графита, сажи, расположенных между зернами. Данное явление снижает окисление ювенильной поверхности покрытия в зоне фрикционного контакта.

Сделан вывод о том, что уменьшение интенсивности образования частиц никеля, являющихся инициаторами протекающих окислительных процессов при фрикционном взаимодействии Ni-P покрытий, препятствует образованию в фрикционном контакте фосфатных стекол, повышающих коэффициент трения. Предложен метод улучшения триботехнических характеристик Ni-P покрытий, заключающийся в уменьшении площади контакта базового мате-

риала покрытия с контртелом путем введения в покрытие различных дисперсных сред. Для твердых частиц это уменьшение происходит за счет участия частиц в контактном взаимодействии, а для пластичных – в формировании пленок переноса, защищающих поверхность базового материала покрытия.

Исследование влияния модифицирующих добавок на триботехнические свойства химических покрытий Ni-P показало, что добавление  $\text{SiO}_2$  в концентрации около 7 мас.% приводит к формированию более гладкой поверхности при сохранении механических свойств исходного Ni-P покрытия, позволяя снизить коэффициент трения в 3–4 раза, и уменьшить износ в 1,4–2,0 раза в сравнении с исходным покрытием Ni-P.

В четвертой главе исследованы основные функциональные свойства композиционных Ni-P покрытий, определяющие их эксплуатационные характеристики. Процессы трения и изнашивания зависят от комплекса физико-механических характеристик композиционных материалов, но в рамках решаемых в данной работе задач, основное внимание уделялось характеристикам, непосредственно связанными с износостойкостью – микротвердостью и адгезией покрытий к подложке.

Триботехнические испытания исходных подложек, базовых Ni-P покрытий и покрытий, модифицированных дисперсными наполнителями показали существенные изменения значения коэффициента трения (рисунок 6).

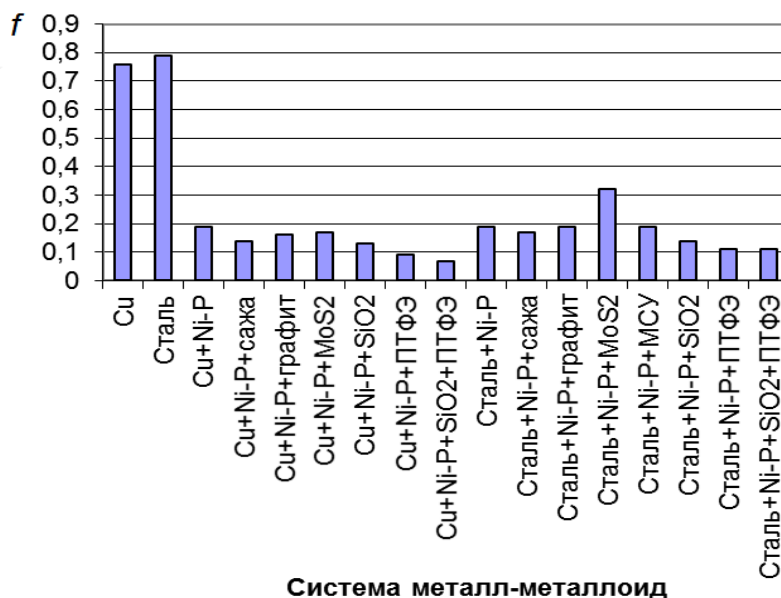


Рисунок 6. – Зависимость коэффициента трения от типа покрытий при установленном режиме трения при нагрузке 1000 Н индентором из стали ШХ-15 диаметром 4,8 мм

Наибольшую износостойкость и наименьший коэффициент трения имеет композиционное покрытие Ni-P+ $\text{SiO}_2$  дополнительно аппретированное

ПТФЭ. Данный подход позволил реализовать известный принцип Шарпи, при котором – твердые частицы  $\text{SiO}_2$  снижают площадь контакта контртела с покрытием и повышают его износостойкость, а ПТФЭ служит твердой смазкой, заполняя промежутки между ними, препятствуя доступу кислорода в зону трения.

В исследованном диапазоне нагрузок, 250 – 1000 мН, у композиционных покрытий  $\text{Ni-P+SiO}_2$  и  $\text{Ni-P+SiO}_2 / \text{ПТФЭ}$  не наблюдается резкого возрастания сил трения и скорости изнашивания покрытия, что свидетельствует об отсутствии протекания трибохимических реакций окисления матрицы композиционного материала. Результаты анализа элементного состава частиц износа и материала покрытия на следе трения показали более низкую концентрацию кислорода в них по сравнению с исходными  $\text{Ni-P}$  покрытием. Анализ химического состава продуктов износа на вторично-ионном масс-спектрометре подтвердил снижение интенсивности пиков, приписываемых к сложным линейным и циклическим металл-фосфатным структурам. Морфология частиц износа свидетельствует о механизме усталостного разрушения. Разрушение покрытия протекает с образованием микротрещин и последующим отслоением частиц, представляющих собой агломераты из меньших по размеру (0,1–0,5 мкм) фрагментов.

Оценка адгезионной прочности, показала, что разработанные покрытия обладают высокой адгезией к подложке (класс 1 по стандарту CN/TS 1071-8). На всех покрытиях, вне зависимости от материала подложки обнаружены лишь отдельные радиальные трещины без участков отслоения. Определено что коррозионная стойкость композиционного покрытия  $\text{Ni-P+SiO}_2$  на 25–30% выше исходного  $\text{Ni-P}$  покрытия.

Таким образом, предположение о ведущей роли трибохимических процессов в механизмах трения никель-фосфорных покрытий, а также методов их снижения подтверждено. Учет этих факторов позволил решить задачу по существенному снижению коэффициента трения (от 30 до 80%) никель-фосфорных покрытий и их практическому внедрению.

**Пятая глава** посвящена описанию практического использования результатов исследований. Разработаны композиционные  $\text{Ni-P}$  покрытия для элементов газодинамических опор турбогенераторов МГД-20-01 производимых ООО «НТЦ Микротурбинные технологии» (РФ). Изготовлена опытно-промышленная партия элементов из прецизионного сплава 36НХТЮ с триботехническими покрытиями, (Договор И-92/2012). Представлены результаты ускоренных стендовых испытаний разработанных композиционных антифрикционных покрытий  $\text{Ni-P+SiO}_2$ ,  $\text{Ni-P+MoS}_2$  и  $\text{Ni-P+ ПТФЭ}$ . Показано, что их использование позволило увеличить количество циклов пуск–остановка турбогенератора более чем 20 раз.



Предложены методические рекомендации по формированию триботехнических композиционных покрытий с улучшенными триботехническими характеристиками на основе Ni-P+SiO<sub>2</sub> и последующей обработкой ПТФЭ. По результатам исследований разработаны методика №003-2009, технологические инструкции № 65-2011, 66-2011, 67-2011, программы и методики ПМИ № 004-2008, ПМИ № 005-2010, ПМИ № 006-2010, ПИМ № 022-2012.

Осуществлена опытная апробация использования разработанных триботехнических покрытий на направляющих приборов работающих в условиях открытого космоса, созданных в рамках союзных программ «Космос-СГ», и «Космос-НТ», по результатам которых они рекомендованы к использованию в научном приборостроении. Разработано и внедрено испытательное оборудование для проведения триботехнических исследований тонких пленок и покрытий. (Договор И-85-2005). Разработано и внедрено испытательное оборудование для анализа поверхности в учебный процесс (Договор И-45-2010).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Установлены закономерности контактного взаимодействия никель-фосфорных покрытий с адгезионным подслоем на металлическом основании, позволившие определить, что оптимальная толщина покрытий лежит в диапазоне 1-10 мкм, обеспечивая благоприятное для условий сухого трения упруго-пластическое взаимодействие системы покрытие-подложка с контртелом в зоне трения [3, 6].
2. Выявлены зависимости триботехнических характеристик никель-фосфорных покрытий от их состава, физико-механических свойств и режимов испытаний, свидетельствующие, что предельная нагрузка покрытия в 350–450 МПа при трении на воздухе ограничивается пирофорностью частиц износа никеля, образованием легкоплавкого фосфатного стекла и его переносе на поверхность контртела, что приводит к резкому повышению коэффициента трения (3–4 раза) и износу до двух раз [1, 2, 4, 7, 8, 11, 12].
3. Показано, что формирование композиционных покрытий из суспензий с 7-10 мас.% дисперсной фазы подавляет дендритный рост покрытий, снижая размер зерен до 1-3 мкм, гомогенизирует микроструктуру, повышает микротвердость матрицы в 1,3-1,7 раз, что приводит к увеличению износостойкости композиционных покрытий в 3-4 раза [10].
4. Предложены методы получения антифрикционных металлополимерных композиционных никель-фосфорных покрытий, заключающиеся во введении в покрытие одновременным соосаждением от 7 до 10% мелкодис-

персного оксида кремния, нанесением на поверхность полученного покрытия низкомолекулярного ПТФЭ и его последующей термообработки при температуре 330-350°C в течении 1 часа, что в совокупности обеспечивает снижение коэффициента трения от 30 до 80% по сравнению с исходным [9].

5. Разработана технологическая схема получения двухслойного композиционного покрытия никель-фосфор / ультрадисперсный диоксид кремния и никель-фосфор / ПТФЭ (с вариантами), обеспечивающие реализацию предложенных технологических решений получения композиционных никель-фосфорных износостойких антифрикционных покрытий с увеличенной в 1,3 твердостью и уменьшенным в 1,8 раз коэффициентом трения [5].

Новизна полученных результатов подтверждается 4 патентами Республики Беларусь [25–28].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты научных исследований химически осажденных Ni-P покрытий модифицированных мелкодисперсными частицами SiO<sub>2</sub> и покрытий с дополнительной обработкой ПТФЭ могут быть использованы при создании узлов трения работающих в диапазоне скоростей  $1 \times 10^{-3}$  – 15 м/с и контактных давлений 135 – 625 МПа, в условиях трения без смазывающего материала и при воздействии агрессивных сред.

Достигнутые механические и триботехнические характеристики образцов с разработанными покрытиями позволяют рекомендовать их к применению в приборостроении, химической промышленности, механизмах, работающих в условиях безвоздушного пространства.

Соискатель:

Д.М. Гуцев

## Список работ опубликованных автором по теме диссертации

### Главы в монографиях

1. Мышкин, Н. К. Многофункциональные Ni-P покрытия / Н. К. Мышкин, А. Я. Григорьев, Д. М. Гуцев; под. ред. В.В. Клубовича // Перспективные материалы и технологии. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 4 – С. 77–94

### Статьи в рецензируемых журналах

2. Триботехнические свойства тонких гальванических и химически осажденных Ni-P покрытий на меди / Н. К. Мышкин, А. Я. Григорьев, Д. М. Гуцев, М. Игнат, Э. Чайнет, В. Грандваллет, Дж. Саутел // Трение и износ. – 2010, № 6. – С. 544–551.
3. Моделирование фрикционного взаимодействия композиционных покрытий триботехнического назначения / И. Г. Горячева, Н. К. Мышкин, Е. В. Торская, Ю. В. Корнев, Д. М. Гуцев, В. Г. Кудрицкий, И. Н. Ковалева // Трение и износ. – 2012. – Т. 33, № 6. – С. 557–565.
4. Myshkin, N. K. Friction of thin electroless NiP and NiP-SiO<sub>2</sub> coatings on aluminum alloy substrate / N. K. Myshkin, A. Ya. Grigoriev, D. M. Gutsev // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 527. – P. 92–97.
5. Effect of SiO<sub>2</sub> and PTFE additives on dry sliding of NiP electroless coating / D. Gutsev, M. Antonov, I. Hussainiva, A.Ya. Grigoriev // Tribology International. – 2013. – Vol 65. – P. 295–302.
6. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 / А.Я. Григорьев, Д.М. Гуцев, А.П. Зозуля, И.Н. Ковалева, В.Г. Кудрицкий, Н.К. Мышкин, М.С. Семенюк // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, №6. – С. 664–370.

### Статьи в сборниках трудов и материалов конференций

7. Исследование контактных и внутренних напряжений в металл-металлоидных покрытиях при их фрикционном нагружении / И.Г. Горячева, А.Н. Любичева, Е.В. Торская, Н.К. Мышкин, Д.М. Гуцев, А.Я. Григорьев // Актуальные проблемы механики сплошной среды: труды II международной конференции, Дилижан, Армения, 4–8 октября. – Ер.: ЕГУАС, 2010. – Т. 1 – С. 192–195.
8. Гуцев, Д. М. Триботехнические свойства тонких гальванических и химических Ni-P покрытий на меди / Д. М. Гуцев, А. Я. Григорьев // 9-ая международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы,

- защитные покрытия, сварка». – Минск, 29–30 сентября 2010 г. – Минск: Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ, 2010. – С.197–198.
9. Гуцев, Д. М. Триботехнические характеристики химически осажденных покрытий NiP-SiO<sub>2</sub> / Д. М. Гуцев // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции / под общей редакцией Е. А. Памфилова. – Вып. 13. – Брянск: БГИТА, 2011. – С. 17–20.
  10. Гуцев, Д. М. Модификация защитных химических Ni-P покрытий SiO<sub>2</sub> / Д. М. Гуцев // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 мая 2014 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2014. – С. 315–317.
  11. Григорьев, А. Я. Трение стали ШХ15 по тонким Ni-P покрытиям на меди / А. Я. Григорьев, Д. М. Гуцев, И. Н. Ковалева // VI Белорусский космический конгресс: материалы конгресса. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – Т. 1. – С. 36–39.
  12. Гуцев, Д. М. Триботехнические свойства тонких Ni-P покрытий на медных подложках / Д. М. Гуцев, А. Я. Григорьев // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: материалы науч.-техн. конф., Гродно, 5–6 окт. 2016 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. И. Свириденко (гл.ред) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 164–170.

#### **Тезисы докладов конференций**

13. Гуцев, Д. М. Метод обнаружения износа пары трения в микротрибометре и устранение его влияния на результаты исследования / Д. М. Гуцев, А. П. Зозуля // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. IV-й Гомельской региональной конф. мол. уч., Гомель, 23-24 сент. 2008г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: И.Н. Ковалева [и др.]. – Гомель, 2008. – С. 137–138.
14. Evaluation of mechanical and tribological properties of Ni-P coatings used in sliding contacts / D.M. Gutsev, V.G. Kudritski, A.Ya. Grigoriev, N.K. Myshkin, M. Ignat, E. Chainet // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Междунар. Науч.-техн. конф., Гомель, 22-25 Июня 2009 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: В.А. Смуругов [и др.]. – Гомель, 2009. – С. 9–10.
15. Гуцев, Д. М. Трение тонких Ni-P покрытий на медной подложке / Д. М. Гуцев, А. Я. Григорьев // XXI Всероссийское совещание по температу-

- роустойчивым функциональным покрытиям. – СПб., 2010. – С. 87–88.
16. Оборудование, материалы и методики испытаний на трение и износ в космосе и имитационных условиях / А.Я. Григорьев, Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий, Н.К. Мышкин // Современные проблемы трибологии: международная научно-техническая конференция. – Киев, 2010. – С. 9–10.
  17. Гуцев, Д. М. Оптимизация состава и толщины Ni-P антифрикционных покрытий на медной подложке / Д. М. Гуцев, В. Г. Кудрицкий, И. Н. Ковалева // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. Республ. научн.-техн. конф. мол. уч., Гомель, 5–7 октября 2010 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: Р.А. Шулдыков [и др.]. – Гомель, 2010. – С. 100–102.
  18. Триботехнические характеристики Ni-P покрытий модифицированных SiO<sub>2</sub> и ПТФЭ / Д.М. Гуцев, Л.Ф. Иванов, Е.В. Торская, А.Н. Любичева // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Междунар. Науч.-техн. конф., Гомель, 27-30 Июня 2011 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: В.А. Смуругов [и др.]. – Гомель, 2011. – С. 81–82.
  19. Гуцев, Д. М. Коррозионная стойкость стали с химически осажденными покрытиями Ni-P и Ni-P-SiO<sub>2</sub> / Д. М. Гуцев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. Республ. научн.-техн. конф. мол. уч., Гомель, 2–4 октября 2012 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: Р.А. Шулдыков [и др.]. – Гомель, 2012. – С. 24–26.
  20. Металлополимерные Ni-P + ПТФЭ покрытия для высокоскоростных узлов трения / Д.М. Гуцев, Иванов Л.Ф., Григорьев А.Я., Гракович П.Н. // Химия фтора: тезисы докладов 9-ой Всероссийской конференции, Москва, 22 – 26 октября 2012 г. – М., 2012. – С. Р47.
  21. Гуцев, Д. М. Ni-P+ПТФЭ покрытия в слабонагруженных узлах трения / Д. М. Гуцев // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Междунар. Науч.-техн. конф., Гомель, 24-27 Июня 2013 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: И.Н. Ковалева [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 149.
  22. Гуцев, Д. М. Влияние химических Ni-P-SiO<sub>2</sub> покрытий на коррозионную стойкость стали / Д. М. Гуцев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: тез. докл. Республ. научн.-техн. конф. мол. уч., Гомель, 4–6 ноября 2014 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: В.В. Шевченко [и др.]. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2014. – С. 25–27.

23. Измерение микротвердости Ni-P покрытий методом склерометрии / Д.М. Гуцев, А. Ковалев, В.Г. Кудрицкий, М. Антонов, И. Хуссаинова // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Междунар. Науч.-техн. конф., Гомель, 23-26 Июня 2015 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: В.Н. Адери́ха [и др.] . – Гомель, 2015. – С. 257.
24. Ni-P покрытия в высокоскоростных узлах трения / Д.М. Гуцев, Л.Ф. Иванов, Е.Э. Дмитриченко, А.Я. Григорьев // Полимерные композиты и трибология: тез. докл. Междунар. Науч.-техн. конф., Гомель, 27-30 Июня 2017 г. / Ин-т механики металлополимерных систем НАН Беларуси; редкол.: В.Н. Адери́ха [и др.] . – Гомель, 2017. – С. 154.

### **Патенты на изобретения**

25. Модульный трибометр: пат. ВУ 6041 / Гуцев Д. М., Кудрицкий В. Г., Ковалева И. Н. – Оpubл. 28.02.2010.
26. Система нагружения образцов при триботехнических исследованиях малыми нагрузками: пат. ВУ 5603 / Д. М. Гуцев, М. С. Семенюк, А. П. Зозуля, В. Г. Кудрицкий, А. Я. Григорьев, Н. К. Мышкин. – Оpubл. 30.10.2009.
27. Электролит для химического осаждения композитных покрытий никель–фосфор–фторопласт (варианты): пат. ВУ 18117 / Д. М. Гуцев, А. Я. Григорьев, Н. К. Мышкин. – Оpubл. 30.04.2014.
28. Электролит для химического осаждения композиционных покрытий никель–фосфор–диоксид кремния: пат. ВУ 21068 / Д. М. Гуцев. – Оpubл. 30.06.2017.

## РЭЗІЮМЭ

### Гуцаў Дзмітрый Міхайлавіч

«Заканамернасці шаравання кампазіцыйных нікель-фосфарных пакрыццяў»

**Ключавыя словы:** Ni-P пакрыцці, дробнадысперсныя мадыфікатары, політэтрафторэтылен, дыяксід крэмнію, трыбатэхнічныя характарыстыкі, машынабудаванне, прыладабудаванне.

**Аб'ект даследавання:** кампазіцыйныя Ni-P пакрыцці.

Прадмет даследавання: заканамернасці фрыкцыйнага ўзаемадзеяння ў звязцы з фізіка-механічнымі ўласцівасцямі, структурай, выглядам і канцэнтрацыяй напаўняльніка кампазіцыйных Ni-P пакрыццяў.

**Мэта працы:** вывучэнне механізмаў шаравання Ni-P пакрыццяў для вызначэння метадаў іх мадыфікацыі і стварэння кампазіцыйных матэрыялаў вузлоў шаравання з палепшанымі трыбатэхнічнымі характарыстыкамі.

**Метады даследавання:** растравая электронная і аптычная мікраскапія, дыферэнцыяльна-сканавальная каларыметрыя, рэнтгенаструктурны аналіз, стандартныя метадыкі вызначэння трыбатэхнічных і фізіка-механічных характарыстык.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Вызначаны заканамернасці кантактнага ўзаемадзеяння нікель-фосфарных пакрыццяў, якія дазволілі вызначыць аптымальныя параметры пакрыццяў. Усталяваны механізмы шаравання нікель-фосфарных пакрыццяў, якія сведчаць, што лімітавая нагрузка пакрыцця на паветры абмяжоўваецца пірафорнасцю часцінак зносу нікелю, што фарміруюць на паверхні пласты з высокім каэфіцыентам шаравання. Распрацаваны склады электраліту для хімічнага фармавання кампазітных Ni-P пакрыццяў, напоўненых дробнадысперснымі часцінкамі рознага складу. Атрыманы новыя эксперыментальныя дадзеныя па ўздзеянню мадыфіцыруючых дадаткаў (дыяксіду крэмнію, дысульфіду малібдэну, вугляроду ў розным алатрапічным стане, політэтрафторэтылену), якія ўводзяцца ў пакрыцці на механічныя і трыбатэхнічныя характарыстыкі, што дазволіла вызначыць аптымальныя мадыфікатары і тэхналагічныя рэжымы фарміравання пакрыцця для забеспячэння найлепшых эксплуатацыйных характарыстык.

**Вобласць ужывання:** вузлы трыбаспалучэнняў якія працуюць ў шырокім дыяпазоне хуткасцяў і нагрузак, ва ўмовах шаравання без змазвальнага матэрыялу і пры ўплыве агрэсіўных асяроддзяў.

**РЕЗЮМЕ****Гуцев Дмитрий Михайлович****«Закономерности трения композиционных  
никель-фосфорных покрытий»**

**Ключевые слова:** Ni-P покрытия, мелкодисперсные модификаторы, политетрафторэтилен, диоксид кремния, триботехнические характеристики, машиностроение, приборостроение.

**Объект исследования:** композиционные Ni-P покрытия.

**Предмет исследования:** закономерности фрикционного взаимодействия в связи с физико-механическими свойствами, структурой, видом и концентрацией наполнителя композиционных Ni-P покрытий.

**Цель работы:** изучении механизмов трения Ni-P покрытий для определения методов их модификации и создания композиционных материалов узлов трения с улучшенными триботехническими характеристиками.

**Методы исследования:** растровая электронная и оптическая микроскопии, дифференциально-сканирующая калориметрия, рентгеноструктурный анализ, стандартные методики определения триботехнических и физико-механических характеристик.

**Полученные результаты и их новизна:** Определены закономерности контактного взаимодействия никель-фосфорных покрытий, позволившие определить оптимальные параметры покрытий. Установлены механизмы трения никель-фосфорных покрытий, свидетельствующие, что предельная нагрузка покрытия на воздухе ограничивается пирофорностью частиц износа никеля, формирующих на поверхности слои с высоким коэффициентом трения. Разработаны составы электролита для химического формирования композитных Ni-P покрытий наполненных мелкодисперсными частицами различного состава. Получены новые экспериментальные данные по влиянию модифицирующих добавок (диоксида кремния, дисульфида молибдена, углерода в различном аллотропическом состоянии, политетрафторэтилена) вводимых в покрытия на механические и триботехнические характеристики, что позволило определить оптимальные модификаторы и технологические режимы формирования покрытия для обеспечения наилучших эксплуатационных характеристик.

**Область применения:** узлы трибосопряжений, работающие в широком диапазоне скоростей и нагрузок, в условиях трения без смазывающего материала и при воздействии агрессивных сред.



## SUMMARY

**Gutsev Dzmitry Mihailovich**

«Regularities of the friction of composite nickel-phosphoric coatings »

**Keywords:** Ni-P coatings, fine-dispersed modifying additives, polytetrafluorethylene, silicone dioxide, tribotechnical characteristics, machine building, tool engineering.

**Object of investigations:** composite metal-polymer Ni-P coatings.

**Subject of investigations:** regularities of the frictional interaction depending on the physical-mechanical properties, structure, type and concentration of the filler of the composite Ni-P coatings.

**The purpose is** study of friction mechanisms of Ni-P coatings to determine methods for their modification and creation of composite materials for friction units with improved tribotechnical characteristics.

**Research methods:** scanning electronic and optical microscopies, differential scanning calorimetry, X-ray structure analysis, standard techniques for determining tribotechnical and physico-mechanical characteristics.

**The obtained results and their novelty.** Regularities of contact interaction of nickel-phosphorus coatings are determined that allows defining the optimal coatings' parameters. The established friction mechanisms of nickel-phosphorus coatings indicate that the ultimate load of the coating in air is limited by the pyrophoricity of nickel wear particles forming the layers with a high friction coefficient on the surface. Electrolyte compositions for the chemical formation of composite Ni-P coatings filled with various fine-dispersed particle particles have been developed. New experimental data on the effect of modifying additives (silicon dioxide, molybdenum disulphide, carbon in various allotropic states, polytetrafluorethylene) introduced into coatings on the mechanical and tribotechnical characteristics have been obtained, that has allowed to determine the optimum modifying additives and technological modes of coating formation to ensure the best performance characteristics.

**Application fields:** nodes of tribocoupling working in a wide range of speeds and loads, at dry friction and with the influence of aggressive media.



Научное издание

*Гуцев Дмитрий Михайлович*

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
НИКЕЛЬ-ФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Подписано в печать 07.08.2018 г. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс. Напечатано на ризографе.  
Усл. Печ. Л. 1,4. Тираж 60 экз. Зак. № 07-18

---

ИММС НАНБ, 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32-а  
Регистрация №1/244 от 25.03.14