

На правах рукописи

УДК 621.793.7  
ГРНТИ 81.35.33



**ГЕРАЩЕНКОВ Дмитрий Анатольевич**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ  
ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ «ХОЛОДНОГО» ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО  
НАПЫЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АРМИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ  
СИСТЕМЫ Al-Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»

Научный консультант: доктор технических наук, доцент  
Орыщенко Алексей Сергеевич

Официальные оппоненты:  
Толочко Олег Викторович доктор технических наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, профессор кафедры технологии и исследования материалов

Орданьян Сукяс Семенович доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), профессор кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов

Ведущая организация: АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «16» декабря 2015 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» по адресу: 191015 г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, дом 49

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.cris-m-prometey.ru/Theses.aspx?type=1>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь:

Диссертационного совета Д411.006.01  
Заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор



Малышевский В. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Ужесточение условий эксплуатации и усложнение конструкции рабочих элементов и узлов машиностроительной техники требуют создания эффективных средств защиты. Большинство изделий машиностроения изготовлено из сталей различного класса, при этом защита от агрессивных внешних воздействующих факторов обеспечивается за счет нанесения функциональных покрытий и модификации поверхности, что является экономически целесообразным. Учитывая современные темпы развития техники, конструкторы выдвигают новые требования к повышению удельных характеристик материалов, в частности к контактным поверхностям.

Одной из важнейших проблем в настоящее время является разработка функциональных покрытий для пар трения. Основными материалами для получения антифрикционных покрытий являются сплавы системы Al-Sn. Наиболее широко такие системы используются при производстве подшипников скольжения, которые изготавливаются методом штамповки из биметаллических листов системы сталь – алюминий, полученных методом совместной прокатки. Применение технологии нанесения покрытий системы Al-Sn позволит значительно расширить область эксплуатации пар трения за счет гибкого регулирования свойств исходных материалов (управление их химическим составом) и более оперативного проведения ремонтно-восстановительных работ. В перспективе при проведении соответствующих НИОКР появится возможность изготавливать с высокой степенью точности подшипники более сложной формы.

При традиционных высокотемпературных методах получения таких покрытий имеет место возникновение остаточных термических напряжений в сопряженных поверхностях, деградация структуры напыляемого материала, изменение химического состава, а также значительные технологические сложности при нанесении алюминиевых и легкоплавких материалов.

Наиболее перспективным методом, позволяющим значительно снизить воздействие температурного поля потока (частицы переносятся в твердом, нерасплавленном состоянии), является метод «холодного» газодинамического напыления (ХГДН), основанный на эффекте формирования прочного металлического слоя при набегании двухфазного сверхзвукового потока на поверхность за счет образования адгезионных связей между деформированной частицей и подложкой. Метод ХГДН позволяет наносить покрытия из пластичных материалов (в т.ч. сплавов системы Al-Sn) на поверхности различных изделий, состоящих из сталей, сплавов на основе никеля, алюминия, меди и т.д.

Чтобы получить функциональные покрытия с высокой твердостью и высокими антифрикционными свойствами, недостаточно сформировать гомогенную структуру покрытия – необходимо создать композиционную структуру, основу которой составляют так называемые «скелетные» структуры, где несущий каркас строится из пластичного матричного материала, а повышенная твердость (износостойкость) обеспечивается армирующими частицами.

При реализации метода ХГДН широко используют порошковые механические смеси на основе пластичных матричных и твердых армирующих частиц, которые готовятся предварительно и далее подаются непосредственно в транспортирующий газовый поток, образуя гетерогенную взвесь (смесь частиц, обладающих различными физико-химическими свойствами, фракционным составом и т.д.). Необходимо учитывать, что каждый материал обладает своими уникальными физико-химическими свойствами, следовательно, оптимальные характеристики потока также индивидуальны. Поэтому структура таких покрытий неравномерна из-за образования агломератов, что, как правило, ведет к увеличению пористости, снижению однородности и когезионной прочности, а наличие твердой армирующей составляющей в зоне контакта покрытия и подложки снижает величину адгезии по сравнению с гомогенным покрытием, состоящим из пластичного материала.

Снизить пористость и повысить однородность состава покрытия, возможно при использовании для напыления композиционных порошков, представляющих собой единую механическую систему с пластичной матрицей и армирующей компонентой в виде твердых дисперсных частиц. В последнее время существенно возрос интерес к композиционным порошковым материалам, сочетающим разнородные компоненты с четкой границей раздела между фазами, получаемыми в результате механохимического синтеза.

Сочетая явные преимущества гомогенной и композиционной структуры функциональных покрытий, можно повысить их адгезионную прочность, сохранив при этом высокую микротвердость за счет создания многослойного покрытия (МП) или функционально-градиентного покрытия (ФГП). Такие покрытия отличаются высокой адгезионной и когезионной прочностью за счет совместного использования для напыления порошка пластичного матричного материала и композиционного порошка, помещаемых в отдельные дозаторы. Получение требуемой структуры – при использовании системы дозаторов – обеспечивается специальной системой управления расходом порошков в широком диапазоне по заданному закону.

### **Цель работы:**

Разработка новых композиционных порошков системы Al-Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и технологии их получения с помощью механосинтеза и создание на их основе функционально-градиентных покрытий с высокой адгезионной прочностью и микротвердостью для пар трения и проведения ремонтно-восстановительных работ машиностроительной техники.

### **Задачи:**

1. Выбор химического состава матричного и армирующего порошков.
2. Изучение особенностей создания армированных композиционных порошковых материалов системы «металл – неметалл» и разработка базовой технологии получения порошков системы Al-Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с помощью механосинтеза.
3. Определение температурно-скоростных параметров гетерофазного потока при получении функциональных покрытий методом «холодного» газодинамического напыления и оптимизация режимов напыления применительно к порошковым композициям системы Al-Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

4. Установление закономерности влияния структуры на микротвердость и адгезионную прочность в зависимости от условий формирования композиционного покрытия.
5. Разработка технологии получения многослойных и функционально-градиентных покрытий с регулируемой микротвердостью.
6. Практическая реализация результатов экспериментального исследования применительно к созданию пар трения и проведения ремонтно-восстановительных работ деталей и узлов машиностроительной техники.

**Научная новизна:**

1. Оптимизирован химический состав матричного материала системы Al-Sn и обосновано введение в состав цинка в качестве пластификатора для получения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления.
2. На основании изучения особенностей формирования поверхностно-армированных порошковых материалов впервые предложен способ получения композиционного порошка системы Al-Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с помощью механосинтеза.
3. Установлено, что температура частиц в гетерофазном потоке при напылении покрытий методом ХГДН из сплавов на основе алюминия не превышает 55°C, при этом оптимальная скорость гетерофазного потока составляет 600 м/с, а температура торможения газа находится в пределах 450°C, что обеспечивает получение практически беспористых покрытий.
4. На основании изучения функциональных зависимостей «структура – свойства» определено влияние армирующей компоненты Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на основные характеристики функционального покрытия – адгезионную прочность, микротвердость, пористость и показано, что использование для напыления композиционного порошка С9И70 (состава Al-9%Sn-3%Zn+70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) позволяет повысить микротвердость в 4 раза, при этом снижается адгезионная прочность на 13% и возрастает пористость до 0,8% по сравнению с гомогенным покрытием С9 (состава Al-9%Sn-3%Zn.)
5. Впервые экспериментально показано, что использование специально разработанного модуля с программируемой системой дозаторов, обеспечивающего подачу порошковых материалов по заданному закону в поток транспортирующего газа, позволяет получать функционально-градиентные покрытия на основе алюминия, сочетающие высокую адгезионную прочность (до 60 МПа) с высокой микротвердостью периферийных слоев (до 240HV).
6. Установлено, что использование композиционных порошков системы Al-Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при напылении покрытий позволяет повысить контактные давления в узле трения более, чем в пять раз по сравнению с покрытием системы Al-Sn, имеющим гомогенную структуру.

**Практическая значимость работы:**

Диссертация выполнялась в соответствии с планом основных научных работ ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», реализованных в рамках договорных обязательств с одним из подразделений корпорации Toyota (2002–2005), по Государственным контрактам № 35.663.11.0065 от 15.05.2002 г., шифр «Функциональность»,

№ ОВ/07/458/НТБ/К от 26.07.2007 г., шифр «Гера», № 12411.1007499.09.155 от 18.09.2012 г., шифр «Эльбрус», № 13411.1007499.09.045 от 29.03.2013 г., шифр «Буран».

По результатам указанных контрактов разработана следующая нормативная документация: «Технологический регламент (инструкция) на опытную партию порошков, предварительно обработанных методом механоактивационного синтеза», 2009 г.; «Технология получения композиционных порошковых материалов для метода сверхзвукового ХГДН» (№ 35.378.03.13.ТР от 18.10.2013 г.); «Компьютеризированная технология получения композиционных армированных порошковых материалов» (№ 35.378.02.14.ТИ от 25.06.2014 г.); «Технологическая инструкция. Процесс получения функциональных покрытий методом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления «ХГДН»; Технологический регламент «Процесс нанесения многослойных антикоррозионных покрытий на постоянные магниты методом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления», Технологическая инструкция (РД5.АЕИШ.3447-2007); Технологический регламент «Технологический процесс получения функционально-градиентных покрытий с регулируемой твердостью по толщине покрытия» (РД5.УЕИА.3473-2008); «Нанесение покрытий», Технологическая инструкция (РД5.УЕИА.3653-2014).

Методом ХГДН изготовлены и переданы заказчику (фирма Toyota) опытные партии вкладышей подшипников скольжения.

Разработанные материалы и технологии использованы на предприятиях: ОАО «Уралхиммаш», ООО «Элефант», ОАО «СУ №2», АО «ЦНИИ Курс» при: производстве биметаллических листов сталь – титан и сталь – алюминий для нанесения промежуточного слоя, обеспечивающего высокую адгезию; восстановлении вкладышей подшипников скольжения ДВС газовой электростанции мощностью 4000 кВт; восстановлении посадочных поверхностей подшипников качения крышки демпфера бульдозера Komatsu D65 – EX15; ремонте головки блока цилиндров двигателя А01М-03 передвижной установки АСТ-4А; ремонте радиатора системы охлаждения двигателя Komatsu SAA6D1102E2 экскаватора РС-200.

Практические результаты диссертационной работы позволили при создании научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» оперативно запустить в эксплуатацию современное технологическое оборудование и в соответствии с разработанной технической документацией освоить на нем производство композиционных порошковых материалов методами высокоскоростного механосинтеза и получение на их основе многослойных и функционально-градиентных покрытий методом ХГДН.

### **Методы исследования**

В работе использовались современные методы исследования структуры и свойств порошков и покрытий:

– рентгенофлуоресцентная спектрометрия для определения химического состава (NITON XL3t 900);

– дифракционное рассеяние света от частиц (дифракционная картина) для определения гранулометрического состава (лазерный дифракционный анализатор Malvern Zetasizer Nano-ZS+Malvern Mastersizer 2000);

– оптическая и просвечивающая электронная микроскопия для проведения металлографических исследований (Leica DM-2500 оптический микроскоп и Tescan VEGA 3 растровый электронный микроскоп);

– рентгеноструктурный качественный и количественный фазовый анализ (Rigaku UltimaIV);

– рентгеноспектральный микроанализ элементного состава (РСМА) (энергодисперсионный микроанализатор Inca X-Max, встроенный в растровый электронный микроскоп Tescan Vega);

– анализ изображений структуры для обнаружения и количественной оценки статистических особенностей структурных состояний (программа Image Expert Pro);

– определение размеров отпечатка, полученного вдавливанием алмазной пирамидки в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу» для определения микротвердости (ПМТ-3, AFFRI);

– отрыв штифта от нанесенного на него исследуемого покрытия для определения адгезионной прочности (Instron 1000);

– определение коэффициента трения и интенсивности изнашивания по схеме неподвижный испытуемый образец – вращающийся диск (контртело), в соответствии с рекомендациями Р 50-54-62-88 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод ускоренной оценки износостойкости материалов трущихся поверхностей».

Интерпретация результатов исследований базируется на современных представлениях о структуре и свойствах гетерофазных материалов, механизмах трения и изнашивания.

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

1. Экспериментально обоснованная композиция порошкового материала с использованием в качестве пластичного матричного материала сплава системы Al-Sn и армирующей компоненты  $Al_2O_3$  с высокой микротвердостью и технология его получения.
2. Экспериментально установленные значения температурно-скоростных параметров гетерофазного потока при напылении покрытий на базе выбранных материалов с использованием установки «Димет-403».
3. Основные закономерности влияния структуры на микротвердость и адгезионную прочность функционально-градиентного покрытия, полученного с использованием созданной, программируемой системы дозаторов.
4. Обоснование повышения работоспособности разработанных функциональных покрытий с композиционной структурой по методу ускоренной оценки износостойкости в условиях граничного (сухого) трения.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Обеспечивается использованием для исследований аттестованного аналитического оборудования, воспроизводимостью полученных результатов, корреляцией результатов

с результатами других исследователей. Достоверность и эффективность предложенных технических решений подтверждается успешной эксплуатацией образцов готовых изделий с покрытиями в различных областях техники.

**Результаты диссертационной работы** докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2005 г., 2006 г., 2008 г., 2009 г., 2014 г., 2015 г.; Харьковская нанотехнологическая Ассамблея, г. Харьков, 2006 г. и 2007 г.; Четвертая международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», СПбГУВК, 2007 г.; Ежегодная научная сессия МИФИ «Ультрадисперсные (нано-) материалы», 2008 г., 2009 г.; 10-я международная научно-практическая конференция «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», 2008 г.; 28-я международная конференция «Композиционные материалы в промышленности», г. Ялта, 2008 г.; Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» ФГУП «ЦНИИ чермет им. И. П. Бардина» 25-26 февраля 2015 г.

Разработка «Универсальный технологический модуль для производства однородных и композиционных порошковых материалов и нанесения наноструктурированных покрытий» награждена дипломом первой степени и золотой медалью в номинации «Лучший инновационный проект в области передовых технологий машиностроения» на Международной выставке-конгрессе «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. ИНВЕСТИЦИИ» 22–25 сентября 2008 г., г. Санкт-Петербург.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследования, разработке параметров технологического процесса получения композиционных порошков и покрытий на их основе, организации и проведении комплексных экспериментальных, технологических и диагностических исследований, разработке универсального технологического модуля для получения композиционных порошков и функциональных покрытий, разработке требований к созданию новейшей системы дозаторов и их реализация на конкретном оборудовании научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», подготовке статей и докладов по теме диссертации.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 25 работ, из них 4 в журналах, рекомендуемых перечнем ВАК РФ. Получено 8 патентов РФ. Разработано: 5 Технологических инструкций, 3 Руководящих документа, 5 Ноу-хау.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация объемом 172 страницы состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, содержит 112 рисунков, 32 таблицы, 154 библиографические ссылки и 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обозначена научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы, в котором описано современное состояние исследований и разработок в области композиционных порошковых материалов, износостойких покрытий и антифрикционных покрытий для пар трения.

Приведены основные характеристики современных функциональных покрытий, полученных методом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления, и отражен тот уровень требований, который предъявляется к покрытиям потребителями.

Постоянное ужесточение требований к парам трения по скоростям скольжения, удельным нагрузкам, теплопроводности и эксплуатации при ограниченном смазывании (моменты пуска или аварийные ситуации) заставляет инженеров и производителей добиваться повышения микротвердости контактных поверхностей, прежде всего за счет их модифицирования. Наиболее перспективным в этом смысле является метод ХГДН. Низкое температурное воздействие при напылении позволяет получать композиционные покрытия высокого качества при одновременном напылении разнородных материалов с различными коэффициентами термического расширения, например, пары металл – оксид металла.

Представлен анализ того, какие перспективные материалы могут применяться в качестве пластичного матричного материала системы Al–Sn и твердой армирующей компоненты  $Al_2O_3$  для создания исходных порошковых материалов. Проведено рассмотрение способов получения порошков состава Al–Sn+ $Al_2O_3$  в виде механической смеси и поверхностно армированных композиций и проанализированы достоинства и недостатки указанных способов. Обоснован выбор использования для напыления композиционных покрытий армированного порошка, полученного с применением трех способов обработки: ударно-дезинтеграторно-активаторной обработки, обработки в планетарной мельнице и обработке в чашечном истирателе. В качестве варианта эффективного повышения механических характеристик композиционного покрытия предложено сочетать оптимальные адгезионные характеристики и высокую микротвердость.

**Во второй главе** дано описание исходных материалов, методик исследования и оборудования, используемых для решения поставленных задач.

В ходе работы по созданию композиционных функциональных покрытий на основе алюминия методом ХГДН был обоснован выбор порошковых материалов – матричной и армирующей составляющей.

### **Исходные порошковые материалы для получения функциональных покрытий**

Для создания функциональных композиционных покрытий методом ХГДН были использованы следующие материалы (Таблица 1).

Таблица 1. Химический состав и способ получения исходных порошковых материалов

№	Название	Химический состав порошков, вес. %	Способ получения порошков
1	Корунд	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	В соответствии с ТУ 1711-001-00658716-99
2	МСП9	Al-9%Sn-3%Zn	Механическая смесь порошков ПА-ВЧ, ПЦ1, ПО1
3	МЛ9	Al-9%Sn-3%Zn	Механическое легирование ПА-ВЧ, ПЦ1, ПО1
4	С3*	Al-3%Sn-9%Zn	Высокоскоростное эжекторное распыление из сплава
5	С6*	Al-6%Sn-6%Zn	
6	С9*	Al-9%Sn-3%Zn	
7	С9МС5	Al-9%Sn-3%Zn+5%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Механическая смесь матричного порошка и порошка Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
8	С9МС10	Al-9%Sn-3%Zn+10%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
9	С9МС20	Al-9%Sn-3%Zn+20%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
10	С9МС40	Al-9%Sn-3%Zn+40%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
11	С9Д30**	Al-9%Sn-3%Zn+30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Обработка в дезинтеграторе ДЕЗИ-15
12	С9Д70**	Al-9%Sn-3%Zn+70%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
13	С9М30***	Al-9%Sn-3%Zn+30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Обработка в планетарной мельнице МПП1-2
14	С9М70***	Al-9%Sn-3%Zn+70%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
15	С9И30	Al-9%Sn-3%Zn+30%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Обработка в чашечном истирателе ИВЧ-3
16	С9И70	Al-9%Sn-3%Zn+70%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	

\*Получен патент № 2413024С1 «Износостойкий сплав на основе алюминия для наноструктурированных покрытий».

\*\*Получен патент № 2439198С2 «Способ получения износостойкого композиционного наноструктурированного покрытия».

\*\*\*Получен патент № 2434713С2 «Способ получения композитного порошка системы Al-Zn-Sn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>».

### Используемое технологическое оборудование и режимы обработки

Для получения матричного порошка МСП9, состоящего из механической смеси исходных порошков чистых металлов, использовали смеситель СМ-2, смешивание происходило в течение 30 мин.

Механолегированный матричный порошок МЛ9 получали при обработке смеси порошков в чашечном истирателе ИВЧ-3 в течение 5 мин, 15 мин, 30 мин.

Матричный порошковый материал, представляющий собой сплав системы Al-Sn-Zn, получали методом высокоскоростного распыления расплава на установке высокоскоростного эжекторного распыления МРС (г) 3800.

Для получения композиционных порошков методом механического синтеза использовали следующее оборудование: для порошков С9Д30 и С9Д70 дезинтеграторно-активаторную установку ДЕЗИ-15, обработку производили при различных скоростях вращения роторов от 5000 до 15 000 об/мин. Для порошков С9М30 и С9М70 использовали планетарную мельницу МПП1-2 при вариации времени обработки 15 мин, 30 мин, 1 час. Для порошков С9И30 и С9И70 применялся чашечный истиратель ИВЧ-3, время обработки составило 15 мин, 30 мин, 1 час.

Все порошки предварительно просушивались в сушильном шкафу Memmert V500 в течение 30 мин при температуре 120°C.

Нанесение функциональных покрытий методом ХГДН производилось в специальной камере с использованием установки «Димет-403», оснащенной роботом манипулятором Kawasaki-FS003.

В качестве подложки для нанесения покрытий использовался лист Ст3.

**В третьей главе** с помощью экспериментов обоснован выбор химического состава исходных порошковых материалов и методов получения композиционных порошков с пластичной матрицей и твердой армирующей компонентой.

Для экспериментального исследования по этому направлению была выбрана перспективная композиция на основе пластичной алюминиевой матрицы системы Al–Sn (традиционный антифрикционный материал) и армирующая компонента с высокой твердостью  $Al_2O_3$ . Это согласуется с правилом Шарпи, согласно которому в пластичном материале должны присутствовать твердые включения, обеспечивающие повышение прочностных характеристик. Например, наличие свободных включений интерметаллидов в пределах 15-20% увеличивает износостойкость более чем в 1,5 раза.

В качестве матричного порошка системы Al–Sn был опробован для напыления порошок сплава Al–12%Sn, однако, как было установлено экспериментально, получить покрытие толщиной более 10 мкм методом ХГДН не представляется возможным. Это связано с тем, что олово в составе сплава с алюминием не образует твердых растворов и присутствует в виде самостоятельной фазы. Это объясняет высокие антифрикционные свойства сплавов алюминий – олово, но при этом является основным препятствием при напылении покрытий из этих сплавов. Поэтому было опробовано введение пластификатора, подготовлены механические смеси порошка Al–12%Sn и порошков пластификаторов (Al, Zn, Sn, Cu, Ni) с различной концентрацией от 2,0% до 20%. Проверка на технологичность показала, что наилучшие результаты, с точки зрения устойчивости технологического процесса и вариации толщины покрытия, были достигнуты при добавлении цинка.

При исследовании химического состава этих покрытий было установлено, что при использовании в композиции цинка (Al–12%Sn)+Zn (с содержанием цинка 8% и 10%) содержание олова составляет 6% и 9% (этим значениям соответствуют отечественные антифрикционные сплавы АО6 и АО9). На основании этого для дальнейших исследований была определена тройная система Al–Sn–Zn.

### **Получение и исследование матричных порошков**

Для получения сравнительных исходных данных о свойствах порошков только из матричного материала предварительно были подготовлены перспективные порошковые композиции трех видов.

Получение порошка МСП9, состава Al-9%Sn-3%Zn, осуществляли **методом механического смешивания** исходных порошков алюминия ПА-ВЧ, цинка ПЦ1 и олова ПО1 в смесителе типа «пьяная бочка».

Порошок МЛ9, состава Al-9%Sn-3%Zn, получали **методом механического легирования**, основанным на обработке предварительно перемешанных порошков

в чашечном истирателе, что позволяет получить механически однородную систему в составе одной частицы порошка. Химический состав полученных матричных порошков соответствует исходным составляющим с содержанием примесей не более 3%. При этом происходит прилипание частиц порошков олова и цинка к порошку алюминия. Эффект конгломерации дисперсных частиц в истирателе наблюдается после 10 мин обработки.

Рентгеноструктурный фазовый анализ полученных таким образом частиц порошка показал, что они представляют собой матричный алюминий (основная линия в рентгеновском спектре), на поверхности которого присутствуют олово и цинк. Результаты свидетельствуют, что химического взаимодействия между элементами при этом не происходит и новые химические соединения не образуются.

Основным достоинством данного метода является относительная простота и оперативность получения порошков заданного состава. Существенным недостатком является неравномерность химического состава порошка по сечению частицы, отрицательно влияющая, как показали эксперименты, на получение гомогенного химического состава покрытия.

Ввиду невозможности получения равномерного состава покрытия с использованием порошков на основе смесевой механической композиции исходных чистых металлов и механического легирования, обоснованно выбрана для дальнейшего исследования технология получения матричных порошков методом **эжекторного распыления из сплава** и охлаждения его в газообразной среде со скоростью  $10^3 \div 10^4 \text{ K}^{-1}$ . Основное внимание было уделено исследованию порошков: С3 (состава Al–3%Sn–9%Zn), С6 (состава Al–6%Sn–6%Zn), С9 (состава Al–9%Sn–3%Zn).

Химический состав порошков, полученных распылением, определяется методом рентгенофлуоресцентного анализа (Таблица 2).

Качественный рентгеноструктурный фазовый анализ порошков показал наличие в них твердого раствора Al и Zn и самостоятельные фазы  $\beta$ -Sn.

Результаты гранулометрического анализа показали, что в состоянии поставки порошки С3, С6, С9 по фракции удовлетворяют требованиям установки «Димет-403» 20-60 мкм, армирующая компонента (корунд) имеет средний размер 3-5 мкм (Рисунок 1).

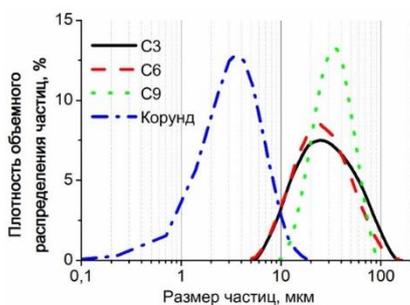


Таблица 2. Результаты химического анализа матричных порошков

	Al, % вес	Sn, % вес	Zn, % вес	Примеси
С9	86,0	9,5	4,0	остальное
С6	86,0	7,9	5,8	остальное
С3	87,0	3,5	9,2	остальное

Результаты исследования микротвердости матричного порошка показали, что микротвердость порошка С3 составляет 73 HV, порошка С6 - 69 HV, а порошка С9 - 62 HV.

На основании технологической пробы на стабильность процесса напыления был выбран наиболее перспективный матричный порошок С9 состава Al-9%Sn-3%Zn.

### **Получение и исследование композиционных порошков**

Для повышения микротвердости опробовано несколько вариантов получения армированных порошков с использованием выбранного матричного материала.

Механическую смесь матричного порошка С9 и армирующей компоненты  $Al_2O_3$  заданного состава получали в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 30 мин. Рассматривали четыре композиции с различным содержанием матричной и армирующей составляющих: МС5, МС10, МС20, МС40 (Таблица 1).

Для получения композиционного порошка по технологии механического синтеза использовали три перспективных способа обработки: ударно-дезинтеграторно-активаторная обработка (УДА), обработка в планетарной мельнице и обработка в чашечном истирателе. Получение композиционного порошка с использованием технологии механического синтеза проводили для двух составов с содержанием армирующей составляющей 30% и 70% соответственно.

С использованием УДА обработки были получены композиционные порошки С9Д30 и С9Д70 при скорости вращения роторов 6000 об/мин и 15 000 об/мин соответственно (Таблица 1)

Композиционные порошки С9М30 и С9М70 получали обработкой в планетарной мельнице, и было установлено, что после 30 минут обработки с частотой 35,2 Гц полученные порошки не отличаются по своим исследуемым характеристикам от порошков, обработанных в течение 1 часа. Работы по получению порошков со временем обработки более 1 часа не проводились (Таблица 1).

Композиционные порошки С9И30 и С9И70 изготавливались в чашечном истирателе, время обработки – не более 1 часа. Сравнительный анализ полученных порошков показал, что после 30 мин обработки свойства композиционных порошков не изменяются (Таблица 1).

Результаты гранулометрического анализа порошков, обработанных в дезинтеграторе и планетарной мельнице, показали наличие двух фракций, корунда и композиционного порошка, т. е. в процессе обработки не произошло полного армирования матричных частиц порошка армирующей составляющей (Рисунок 2).

Исследования гранулометрического состава порошков, обработанных в чашечном истирателе, показали наличие трех фракций, корунда, композиционного порошка и «спёков» (третья основная фракция на графиках, пик более 100 мкм) (Рисунок 2). Таким образом, в процессе обработки в чашечном истирателе полного механического легирования не наблюдалось.

Композиционный порошок представляет собой сферические частицы фракции порядка 50 мкм, поверхность которых армирована частицами корунда фракции от 0,5 мкм до 4,0 мкм, а также свободные частицы корунда (Рисунок 3).

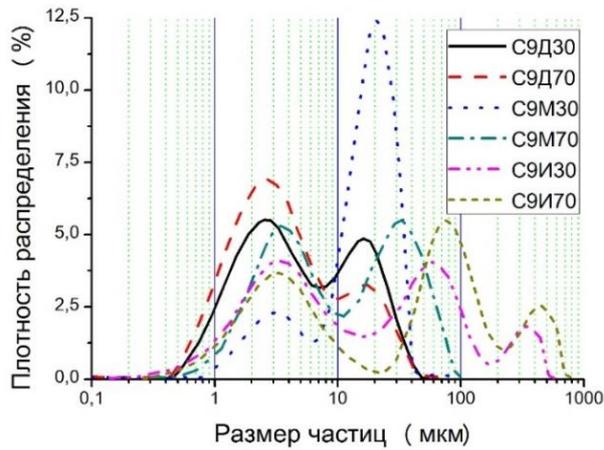


Рисунок 2. Результаты исследования гранулометрического состава композиционных порошков

Таким образом, исследование композиционных порошков показало, что при использовании различных методов обработки полного армирования матричного порошка не происходит, при этом наиболее эффективным является метод обработки в чашечном истирателе.

**В четвертой главе** приводятся результаты экспериментального определения температурно-скоростных параметров гетерофазного потока в процессе напыления покрытий методом ХГДН на установке «Димет-403».

В качестве базы сравнения использовали порошковые материалы, обладающие различной плотностью и теплоемкостью: алюминиевый порошок марки ПА-ВЧ-1 и порошок железа ПЖР-1.

Совместно с группой специалистов СПбГУ во главе с профессором И. Ч. Машеком разработан уникальный измерительный стенд, позволяющий оперативно измерять скорость и температуру гетерофазного потока.

Измерение температуры торможения рабочего газа производили термоэлектрическими зондами с камерой торможения, обеспечивающей коэффициент восстановления скорости газа, зависящий от критериев Маха ( $M$ ), Рейнольдса ( $Re$ ) и Кнудсена ( $Kn$ ), зонды перемещались вдоль оси потока (Рисунок 4 и Рисунок 5).

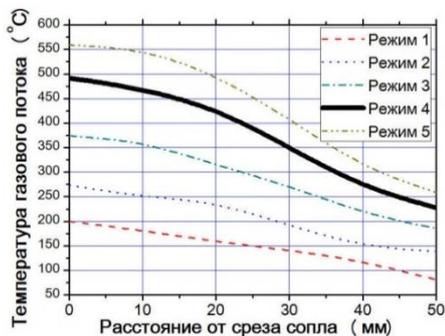


Рисунок 4. Зависимость температуры торможения газового потока от расстояния до среза сопла при различных режимах (1–5)

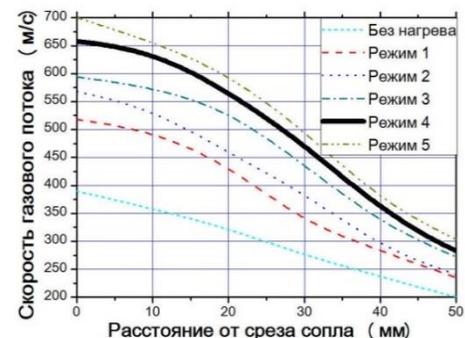


Рисунок 5. Зависимость скорости газового потока от расстояния до среза сопла при различных режимах (1–5)

Из предыдущего опыта напыления различных порошковых материалов было установлено, что для порошков на основе алюминия оптимальным является Режим 4

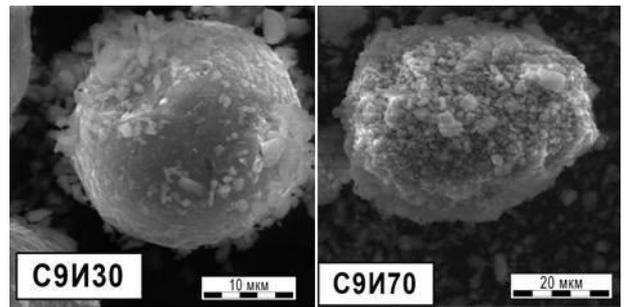


Рисунок 3. Частицы порошков С9И30 и С9И70

(Рисунок 4). В соответствии с этим, определение статической температуры порошка в гетерофазном потоке проводили на данном режиме при расходе порошка 1,0 г/с; 1,75 г/с и 2,0 г/с.

При сверхзвуковых скоростях потока реальным способом измерения температуры частиц является радиометрический метод. Максимум спектральной плотности в собственном тепловом излучении частиц в таком потоке лежит в районе длин волн 10–15 мкм. Для уверенного приема лучистой энергии от частиц потока, служащей мерой их температуры, требуются приемники с высокой обнаруживающей способностью и соответствующим спектральным диапазоном. В связи с этим был создан эталон порошковой взвеси с заданными значениями концентрации и температуры для калибровки инфракрасного радиометра. Калибрующим объектом в данном случае является электродинамический дисперсный модуль (ЭДМ).

Положительные результаты калибровки радиометра позволили достоверно определить температуру частиц порошка в гетерофазном потоке. Для порошка на основе алюминия она лежит в пределах от 25°C до 55°C, а для порошка на основе железа от 65°C до 95°C (Рисунок 6).

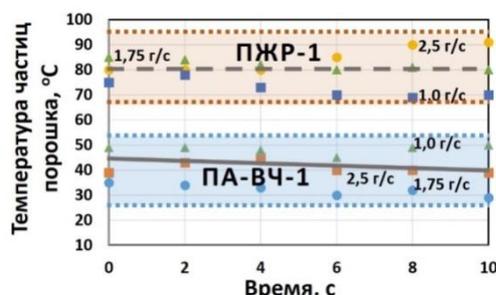


Рисунок 6. Температура порошка в гетерофазном потоке при расходе порошкового материала 1,0 г/с; 1,75 г/с; 2,5 г/с

Анализ данных, полученных для порошков ПЖР-1 и ПА-ВЧ-1, показал, что влияние концентрации порошка в потоке на его температуру незначительное (Рисунок 6). Экспериментально установленные усредненные скорости частиц, определенные на расстояниях от среза сопла 15 мм и 50 мм при работе установки в Режиме 4, показали, что при снижении концентрации порошка в потоке возрастает скорость частиц (Таблица 3).

Таблица 3. Измеренные значения скорости частиц порошка

Расстояние от среза сопла, мм	Расход порошка, г/с	Усредненная скорость порошка, м/с	
		ПЖР-1	ПА-ВЧ
15	2,0	142,6	286,3
	1,75	207,3	308,1
	1,0	224,7	316,9
50	2,0	139,1	141,3
	1,75	184,3	177,3
	1,0	217,7	220,7

Таким образом, установлено, что температура частиц порошка алюминия ниже температуры частиц порошка железа, т.к. их скорость движения выше, за счет этого время нахождения в потоке меньше. Это является основанием для вариации параметров процесса напыления покрытий из разнородных материалов, например, введение напыляемых порошков в различные зоны газового потока. Определено, что при



Затем были опробованы для нанесения механические смеси матричного порошка С9 и  $Al_2O_3$  различных составов. Покрытия, получаемые из механической смеси порошков, наносили при температуре  $450^\circ C$  и скорости газового потока 600 м/с (Рисунок 9). На всех представленных снимках заметно отсутствие протяженных волнообразных пор.

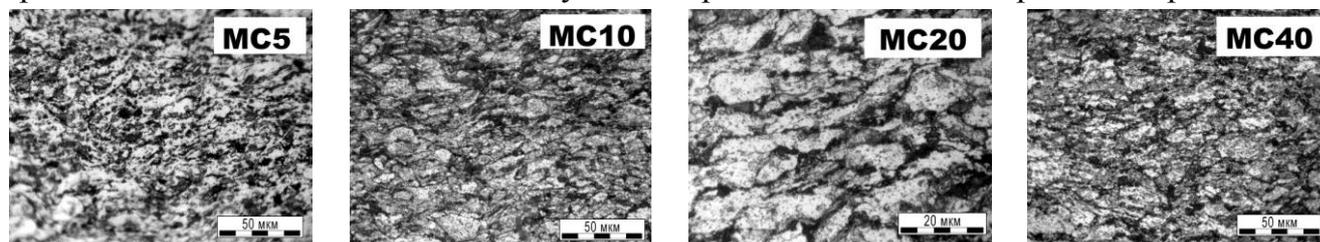


Рисунок 9. Поперечное сечение композиционных покрытий, полученных из механической смеси матричного порошка и армирующей компоненты

Далее производилось напыление покрытий из композиционных порошков при температуре газового потока  $450^\circ C$  и скорости потока 600 м/с (Рисунок 10). По результатам исследования структуры установлено, что все покрытия имеют равномерную структуру, трещины и отслоения не наблюдаются.

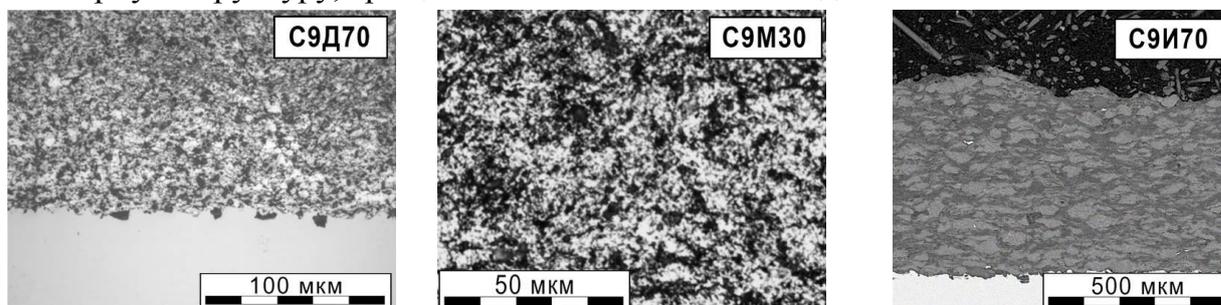


Рисунок 10. Поперечное сечение покрытий, полученных из композиционных порошков

Результаты проведенных РСМА и рентгеноструктурного качественного анализа показали, что химический и фазовый состав покрытия сохраняется после напыления и соответствует исходному порошковому материалу (Рисунок 11 и Таблица 4).

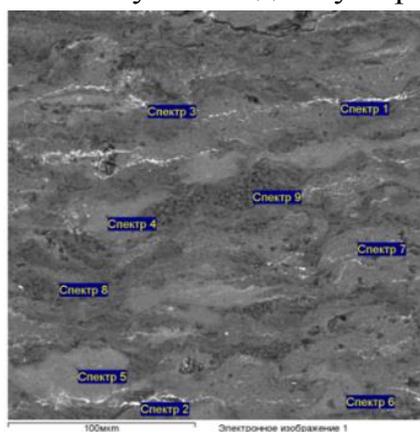


Рисунок 11. Поперечное сечение покрытия С9И70

Таблица 4. Результаты рентгеноспектрального микроанализа покрытия С9И70

Все результаты в весовых %												
Сп	O	Al	Si	S	Cl	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	
Сп 1	36.8	20.9				3.5	13.2	2.1		1.2	22.4	
Сп 2	53.1	20.3					0.2			0.6	25.8	
Сп 3	40.6	22.1	0.3	0.3	0.5		0.8			0.9	34.6	
Сп 4		90.1								3.9	6.0	
Сп 5		88.0					0.7			3.9	7.5	
Сп 6		90.2					0.7			3.7	5.4	
Сп 7		94.4								3.1	2.6	
Сп 8	48.9	46.9								1.3	3.0	
Сп 9	40.9	55.4							1.9	0.7	1.2	

### Результаты комплексного исследования функциональных покрытий

Результаты испытаний функциональных покрытий показали, что наибольшей адгезионной прочностью обладает покрытие, состоящее из матричного материала С9, а максимальной микротвердостью – композиционное покрытие С9И70 (Таблица 5).

Таблица 5. Результаты комплексного исследования функциональных покрытий

Покрытие	Микротвердость, НВ	Адгезия, МПа	Общая пористость, %	Средний размер пор, мкм
МСП9	43	41	2,2	17,5
МЛ9	49	40	3,0	16,2
С9	53	60	0,6	8,0
С6	55	51	0,3	12,5
С3	56	48	0,5	10,3
МС5	78	57	7,3	10,5
МС10	84	53	10,2	10,3
МС20	86	49	13,4	13,8
МС40	85	39	18,3	28,8
С9Д30	98	54	1,1	10,8
С9Д70	122	50	1,2	11,4
С9М30	92	55	0,7	11,2
С9М70	124	51	0,9	13,4
С9И30	120	56	0,7	9,8
С9И70	240	52	0,8	12,1

Очевидно, что для получения покрытий с высокой адгезионной прочностью и высокой микротвердостью необходимо создать ФГП, имеющее у подложки состав матричного материала, а на периферийном слое – состав композиционного армированного порошка.

#### Исследование функционально-градиентных покрытий

Совместно с ООО ОЦПН (г. Обнинск) был разработан специальный модуль с автоматизированной системой дозаторов, обеспечивающий введение используемых порошковых материалов в поток транспортирующего газа по заданной программе.

Для создания ФГП из порошков С9 и С9И70 с регулируемой микротвердостью по толщине покрытия была использована линейная зависимость подачи порошков (Рисунок 12).

Результаты исследования микротвердости и РСМА указывают на ярко выраженный градиент химического состава с постепенным увеличением содержания  $Al_2O_3$  к периферийному слою (Рисунок 13).

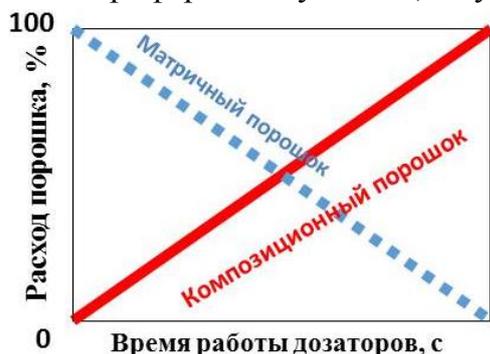


Рисунок 12. Схема работы дозаторов при получении ФГП

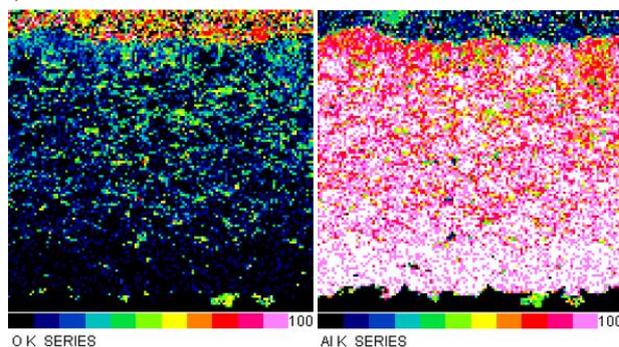


Рисунок 13. Результаты РСМА ФГП, полученного из порошков С9 и С9И70

Использование специального модуля, обеспечивающего работу дозаторов по заданной программе, позволило получить ФГП с адгезионной прочностью 60 МПа, что соответствует адгезионной прочности матричного покрытия, и микротвердостью периферийного слоя 240 НВ.

## Результаты испытаний покрытий

Оценка работоспособности разработанных ФГП проводилась в соответствии с ускоренной оценкой износостойкости сопряжений в условиях граничного трения.

В качестве образца контртела была выбрана сталь 20Х13. Испытания проводили при линейной скорости 1,0 м/с, в условиях граничного (сухого) трения (экстремальные условия работы – пуск и останов двигателя, прекращение подачи смазки). В ходе испытаний установлено, что при нагрузке 160 Н коэффициент трения снижается по мере роста содержания олова в покрытии, а с увеличением содержания армирующей компоненты происходит его увеличение (Рисунок 14). Покрытия, состоящие из матричных материалов С6 и С9, не выдержали испытаний при 160 Н более 5 мин. Контактное давление при данной нагрузке составило 5 МПа. Поэтому для дальнейших исследований было выбрано покрытие С9И70, как обладающее наибольшей микротвердостью.

Значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытия С9И70 показали, что с увеличением нагрузки (контактного давления) до 360 Н возрастают коэффициент трения и интенсивность изнашивания (Рисунок 15).

Для определения предельных нагрузок проводили испытания с постепенным увеличением нагрузки (Рисунок 16). Увеличение нагрузки более 1050 Н не производили, т.к. при указанной нагрузке были достигнуты предельные значения момента трения установки. Кроме того, при достижении 1050 Н произошел разогрев образца контртела до температуры свыше 600°С.

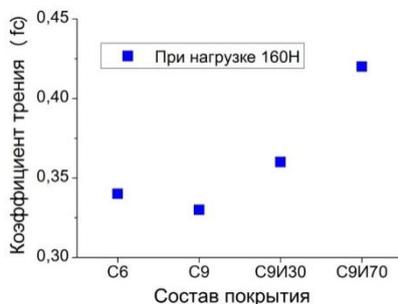


Рисунок 14. Значения коэффициента трения от состава покрытия

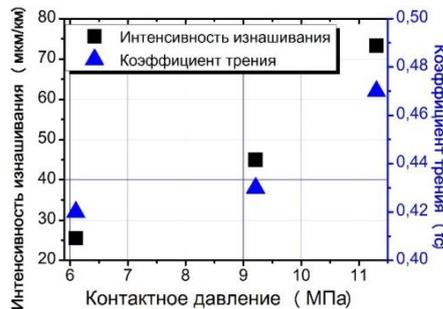


Рисунок 15. Значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания

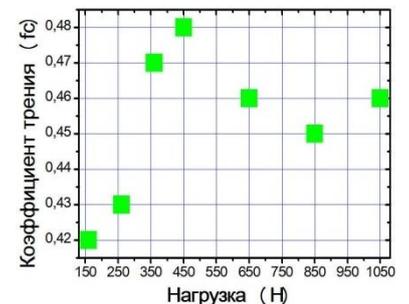


Рисунок 16. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для покрытия С9И70

С увеличением нагрузки от 160 Н до 450 Н происходит увеличение коэффициента трения от 0,42 до 0,48. Максимальное значение коэффициента трения находится в интервале нагрузки от 450 Н до 650 Н, затем снижается до значений 0,45–0,46.

По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что дифракционные максимумы фаз чистого алюминия и олова слабые и уширены, что свидетельствует о существенной деформации поверхностного слоя. В процессе трения происходит перенос материала контртела на образец с композиционным покрытием. Это вызвано тем, что при нагреве в зоне контакта до температуры свыше 600°С твердость поверхности стали 20Х13 значительно снижается с 580 НВ до 230 НВ по сравнению с твердостью поверхности композиционного покрытия.

Повышенные характеристики разработанных на основе композиционных армированных порошков ФГП делают их весьма перспективными при условии использования в качестве контртела более прочных материалов, что соответственно повышает эксплуатационные возможности узлов и деталей для транспортной, энергетической и машиностроительной техники в целом.

**В шестой главе** приводятся результаты практического применения разработанных функциональных покрытий с использованием композиционных порошковых материалов, как для пар трения, так и для более широкого использования.

В частности, изготовлены, испытаны и переданы заказчику коренные вкладыши двигателя внутреннего сгорания (ДВС); восстановлены вкладыши подшипников ДВС газовой электростанции; получены опытные образцы биметаллических листов сталь – титан и сталь – алюминий с промежуточным адгезионным слоем, с последующей прокаткой и сваркой взрывом; выполнены работы по нанесению многослойных защитных покрытий на партию постоянных редкоземельных магнитов; изготовлена опытная партия анодов для получения высокочистого никеля и кобальта; проведено нанесение функциональных покрытий для защиты сварных швов и внутренней поверхности секции райзера; выполнен ряд реставрационных работ; изготовлены паяные катоды для напыления вакуумными методами; выполнен комплекс ремонтно-восстановительных работ транспортной техники.

Таким образом, разработанная базовая технология получения функциональных покрытий методом ХГДН с использованием композиционных порошков позволяет выполнять широкий спектр задач, как для получения новых изделий, так и для проведения ремонтно-восстановительных работ различных узлов машиностроительной техники. Кроме того, разработанная и освоенная технология получения композиционных порошков весьма перспективна для выполнения актуальных задач в области аддитивных технологий.

## ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментальных исследований был обоснован выбор матричного материала сплава системы Al–Sn, оптимизирован его химический состав за счет введения цинка в качестве пластификатора для нанесения покрытий методом ХГДН, а в качестве армирующей компоненты для получения композиционных порошков определен  $Al_2O_3$ .
2. Изучены особенности получения армированных композиционных порошковых материалов системы «металл – неметалл» и разработана базовая технология получения порошков с помощью механосинтеза на примере системы Al-Sn+ $Al_2O_3$ .
3. Установлены оптимальные скорость и температура гетерофазного потока, обеспечивающие возможность получения практически беспористых покрытий, которые составляют – 600 м/с и 450°C соответственно.
4. Обоснована необходимость создания функционально-градиентных покрытий с регулируемой твердостью по толщине для обеспечения высокой адгезионной

прочности и высокой микротвердости на периферийных слоях покрытия с использованием специально разработанного модуля с программируемой системой дозаторов.

5. Установлено, что наибольшей адгезионной прочностью 60 МПа обладает покрытие состава Al-9%Sn-3%Zn из порошка, полученного методом эжекторного распыления из сплава.
6. Установлено, что покрытие, полученное из композиционного порошка С9И70 (состава Al-9%Sn-3%Zn+70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), обладает наибольшей микротвердостью, которая достигает 240 НV.
7. Определено влияние структуры на микротвердость и адгезионную прочность в зависимости от условий формирования композиционного покрытия. Показано, что при использовании механической смеси порошков матричной и армирующей составляющих (MC5, MC10, MC20, MC40) структура покрытия более пористая до 18% (средний размер пор 28 мкм) с образованием агломератов из частиц корунда в отличие от покрытий, полученных из композиционных порошков.
8. В соответствии с Р 50-54-62-88 было установлено, что использование композиционного порошка на основе системы Al-Sn, армированного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, позволяет повысить удельное давление на покрытие более чем в 5 раз по сравнению с гомогенным покрытием до 25 МПа и снизить интенсивность изнашивания.
9. Результаты работы нашли практическое применение: разработанная технология предложена как основная для производства вкладышей ДВС; получены положительные результаты при нанесении промежуточного (адгезионного слоя) при получении биметаллов; а также при проведении ремонтно-восстановительных работ узлов и элементов различных изделий машиностроения.

### **БЛАГОДАРНОСТЬ**

*Особенную благодарность за неоценимую помощь, оказанную при работе над диссертацией и поддержку на всех этапах исследований, выражаю Борису Владимировичу Фармаковскому, кандидату технических наук, доценту, ученому секретарю ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».*

### **Основные результаты диссертационной работы представлены в публикациях:**

1. Геращенко Д. А., Бурканова Е. Ю., Самоделкин Е. А., Маренников Н. В. Разработка технологических подходов получения наноструктурированных композиционных порошков методом сверхскоростного механосинтеза // Вопросы материаловедения. 2010. № 2(62). С. 64–67.
2. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Машек А. Ч. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. 2014. № 2(77). С. 87–96.

3. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. 2014. № 2(78). С. 103–117.
4. Геращенко Д. А., Орыщенко А. С. Алюмоматричные функциональные покрытия с высокой микротвердостью, полученные из композиционных порошков системы Al-Sn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. 2015. № 3(83). С. 100-107.
5. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф. Исследование распределения скорости и температуры газового и гетерофазного потоков процесса сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления (ХГДН) при нанесении функциональных покрытий // Труды конференции молодых ученых и специалистов ЦНИИ КМ «Прометей». СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2005. С. 11.
6. Геращенко Д. А., Юрков М. А., Васильев А. Ф. Разработка технологических процессов сверхзвукового гетерофазного переноса для получения наноматериалов в виде покрытий широкого спектра применения // Сб. докладов международного научно-практического симпозиума «Наноструктурные функциональные покрытия для промышленности» в рамках Харьковской нанотехнологической ассамблеи. Харьков: ННЦ «ХФТИ», ИПП «Контраст», 2006. Т. 1. С. 251–257.
7. Геращенко Д. А., Юрков М. А., Васильев А. Ф. Износо- и коррозионно-стойкие наноструктурированные покрытия с регулируемой твердостью, получаемые методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Сб. докладов международного научно-практического симпозиума «Наноструктурные функциональные покрытия для промышленности» в рамках Харьковской нанотехнологической ассамблеи. Харьков: ННЦ «ХФТИ», ИПП «Контраст», 2007. Т. 1. С. 258–265.
8. Геращенко Д. А., Юрков М. А., Фармаковский Б. В. Создание функционально-градиентных износостойких покрытий с регулируемой твердостью методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления для изделий машиностроения // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XIV международной научно-технической конференции, 17– 22 сентября 2007 г. Севастополь, 2007. Т. 1. С. 163–171.
9. Геращенко Д. А., Песков Т. В., Беляев И. В. Исследование и разработка технологии нанесения защитных антикоррозионных покрытий методом холодного газодинамического напыления на поверхность редкоземельных постоянных магнитов // Тезисы докладов VII конференции молодых ученых и специалистов ЦНИИ КМ «Прометей». СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2008. С. 3.
10. Геращенко Д. А., Юрков М. А., Маренников Н. В., Самоделкин Е. А., Сергеева О. С., Шолкин С. Е. Наноструктурные покрытия, получаемые методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления с использованием

- нанопорошков. Наноматериалы. Сб. докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи. Харьков: ННЦ «ХФТИ», ИПП «Контраст», 2008. Т. 2. С. 231–239.
11. Герашенков Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Маренников Н. В., Износостойкие покрытия с регулируемой твердостью, получаемые методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления с использованием армированных нанодисперсных частиц // Материалы Двадцать восьмой международной конференции «Композиционные материалы в промышленности», 2008. С. 482.
  12. Герашенков Д. А., Васильев А. Ф., Фармаковский Б. В., Юрков М. А., Вологжанина С. А., Замолоцкая Е. И. Наноструктурированные износостойкие покрытия для оборудования криогенной техники // Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2009. № 1. С. 152-154.
  13. Gerashchenkov D. A., Sholkin S. E., Kuznetsov P. A., Yurkov M. A. Perspective processes of supersonic heterophase transfer to wear- and corrosion-resistant coatings production for machine building industry competitive products, Abstracts of papers of second international workshop “Plasma and electron beam technologies for protective coatings”, Киев, 16–17 июня 2010 г. Киев: Изд-во «Росс», 2010. С. 27–28.
  14. Герашенков Д. А., Петрович С. Ю., Черепанов В. П., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф. Исследование технологии получения композиционного материала  $Al_2O_3/Al$ -сплав и износо-коррозионно-стойкого напыленного покрытия из него // Труды СПбГПУ. 2009. № 510. С. 96-104.
  15. Герашенков Д. А., Васильев А. Ф., Чашников Д. И. Холодное газодинамическое напыление металлических порошков и основные направления его реализации в промышленности // Станочный Парк. 2011. №8(85). С. 28-30.
  16. Герашенков Д. А. Результаты исследования адгезионной прочности композиционных покрытий системы «металл–неметалл» на стальном основании, полученных методом холодного газодинамического напыления // Сб. тезисов VI конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». ФГУП «ЦНИИ чермет им. И. П. Бардина». 25-26 февраля 2015 г. С. 14.
  17. Герашенков Д. А. Трибологические испытания функциональных покрытий, полученных из композиционных порошков системы  $Al-Sn+Al_2O_3$  методом «холодного» газодинамического напыления» // Тезисы докладов XIV международной конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», СПб., 2015. С. 38.

#### **Патенты РФ:**

1. Герашенков Д. А., Горынин И. В., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф. Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий. Патент РФ № 2354749С. Опубликовано 10.05.2009.
2. Герашенков Д. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Теплов А. А., Улин И. В. Способ нанесения наноструктурированных

- износостойких электропроводящих покрытий. Патент РФ № 2362839С1. Опубликовано 27.07.2009.
3. Геращенко Д. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Самоделкин Е. А. Маренников Н. В. Способ получения износостойкого композиционного наноструктурированного покрытия. Патент РФ № 2439198С2, Опубликовано 10.04.2010.
  4. Геращенко Д. А., Сомкова Е. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Износо-коррозионно-стойкий сплав на основе алюминия для наноструктурированных покрытий. Патент РФ № 2413024С1. Опубликовано 27.02.2011.
  5. Геращенко Д. А., Сомкова Е. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф. Аморфный, износостойкий наноструктурированный сплав на основе никеля системы Ni-Cr-Mo-WC. Патент РФ № 2418091С1. Опубликовано 10.05.2011.
  6. Геращенко Д. А., Сомкова Е. А., Быстров Р. Ю., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф. Способ получения композитного порошка системы Al-Zn-Sn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Патент РФ № 2434713С2. Опубликовано 27.05.2011.
  7. Геращенко Д. А., Бурканова Е. Ю., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Коркина М. А., Самоделкин Е. А. Способ получения композиционного катода. Патент РФ № 2486995С2. Опубликовано 10.04.2013.
  8. Геращенко Д. А., Геращенко Е. Ю., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Одерышев Д. А., Счастливая И. А. Способ получения многослойного материала, Заявка № 2013137303/2(056276) от 08.08.2013. Решение о выдаче патента на изобретение от 25.05.2015.

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Формат 60 × 48 1/16.  
Печать офсетная. Усл. п.л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,5.  
Тираж 90 экз. Заказ № \_\_\_\_\_  
Отпечатано в типографии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»  
191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49  
Лицензия на издательскую деятельность  
Лр № 020644 от 13 октября 1997 г.