

Государственное научное учреждение  
«Физико-технический институт НАН Беларуси»

УДК 669:621.762

**ФЕДОСЕНКО**  
**Алексей Сергеевич**

**ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ  
ИЗ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ  
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, НИКЕЛЯ И ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности  
05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Минск 2018

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Научный руководитель **Ловшенко Григорий Федорович**,  
доктор технических наук, профессор, ректор  
Белорусской государственной академии  
авиации, г. Минск

Официальные оппоненты: **Волочко Александр Тихонович**,  
доктор технических наук, профессор,  
начальник отдела материаловедения  
и литейно-деформационных технологий  
ГНУ «Физико-технический институт НАН  
Беларуси», г. Минск

Оппонирующая организация **Белоцерковский Марат Артемович**,  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий лабораторией газотермических  
методов упрочнения деталей машин  
ГНУ «Объединенный институт  
машиностроения НАН Беларуси», г. Минск  
**ГНУ «Институт порошковой  
металлургии»**, ГНПО порошковой  
металлургии НАН Беларуси, г. Минск

Защита состоится «15» марта 2018 г. в 14.00 на заседании специализированного совета по защите диссертаций Д01.18.01 при ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» по адресу: Республика Беларусь, 220141, г. Минск, ул. Купревича, 10. Тел.: +375 017 267-60-10 (приемная), +375 017 237-06-05 (ученый секретарь совета), факс: +375 017 263-76-93, e-mail: phti@belhost.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси».

Автореферат разослан «\_\_\_» февраля 2018 г.

Ученый секретарь совета  
кандидат технических наук

С. Д. Латушкина

## ВВЕДЕНИЕ

Плазменные покрытия широко используются в различных отраслях промышленности Республики Беларусь, включая химическую и горнодобывающую, нефтепереработку, машино- и авиастроение, сельское хозяйство, и находят применение на большинстве крупных промышленных предприятий страны.

Основной причиной, ограничивающей применение данного способа упрочнения, является отсутствие эффективных напыляемых материалов требуемого состава и свойств. В Беларуси промышленный выпуск большинства из них не освоен и при получении плазменных покрытий, как правило, используются импортные материалы. В этой связи весьма актуальна разработка новых конкурентоспособных материалов для покрытий, обладающих требуемым комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств, отличающихся в первую очередь высокой твердостью и износостойкостью.

В результате научных исследований, проведенных в последние десятилетия в Белорусско-Российском университете, установлена возможность направленного модифицирования структуры и свойств плазменных покрытий за счет использования механически легированных композиционных порошков. Реакционное механическое легирование (РМЛ) позволяет получить новые составы композиционных порошков и тем самым существенно расширить возможности создания новых типов покрытий, в том числе для повышения износостойкости высоконагруженных пар трения, работающих в агрессивных средах или в условиях абразивного изнашивания.

Представленная работа является комплексным исследованием, направленным на установление закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств плазменных покрытий из механически легированных порошков на основе железа, никеля и керамики. В ней теоретически обоснована и экспериментально подтверждена перспективность использования РМЛ для производства композиционных порошков для напыления. Установлены природа и кинетика протекания механически и термически активируемых структурно-фазовых превращений в базовых системах сплавов на всех этапах их формирования. Оптимизированы составы шихты, условия ее обработки в механореакторе. Установлены режимы плазменного напыления, позволившие получить покрытия со структурой основы субмикро- и/или микрокристаллического типа, стабилизированной синтезированными ультрадисперсными упрочняющими фазами соединений. Созданы технологии получения порошков и покрытий из них, исследованы их свойства. Показано, что плазменные покрытия из новых материалов по основным физико-механическим и эксплуатационным свойствам до 2-х раз превосходят аналоги.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 и на 2016–2020 годы, утвержденным постановлениями Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585 и от 12.03.2015 г. № 190.

Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках:

– задания 3.07 ГПНИ «Материалы в технике» (ГБ-061ф, 2007–2010 гг.), № ГР 20064612;

– задания 2.03/4 ГППНИ «Композиционные материалы» (ГБ-094ф, 2009–2011 гг.), № ГР 20093035.

### **Цель и задачи исследования**

**Цель работы** – установить закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств износостойких плазменных покрытий из механически легированных композиционных порошков на основе железа, никеля и оксидной керамики, а также разработать и освоить технологические процессы получения механически легированных порошков и плазменных покрытий из них.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.**

1. Установить базовые системы составов, перспективных для напыления износостойких плазменных покрытий из механически легированных композиционных порошков, и определить предельное содержание реагирующих компонентов в них.

2. Установить интервалы изменения основных технологических факторов обработки шихты в механореакторе, обеспечивающих получение механически легированных субмикроструктурных комплексно упрочненных порошков требуемого гранулометрического состава для нанесения износостойких плазменных покрытий.

3. Исследовать кинетику и факторы, влияющие на протекание механически и термически активируемых структурно-фазовых превращений, имеющих место в базовых системах на всех технологических этапах получения механически легированных порошков и покрытий.

4. Установить зависимости фазового состава, структуры и свойств покрытий от состава шихты и параметров ее обработки, провести оптимизацию составов и режимов обработки шихты в механореакторе.

5. Разработать и в условиях мелко- и/или среднесерийного производства освоить конкурентоспособные типовые технологические процессы получения субмикроструктурных механически легированных порошков и износостой-

ких плазменных покрытий, превосходящих по своим характеристикам аналоги, на договорной основе с промышленными предприятиями изготовить и реализовать мелко- или среднесерийные партии созданной продукции.

### **Научная новизна**

1. Получены результаты термодинамического анализа, а также экспериментальных исследований процесса механосинтеза перспективных композиций, позволившие установить интервалы изменения химического состава шихты и основных технологических факторов ее обработки в механореакторе, обеспечивающие безопасную реализацию процесса получения композиционных субмикрорекристаллических комплексно упрочненных и гомогенных по химическому составу порошков для износостойких плазменных покрытий на основе систем Fe–Al, Ni–Al, Fe–Cr–C, Fe–Ni–Cr–C, Fe–Al–MoO<sub>3</sub>, Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni–Al–MoO<sub>3</sub>, Ni–Al–Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>–Ni–Al со средними размерами частиц 30–100 мкм (для порошков на металлической основе) и 5–10 мкм (на керамической), имеющих близкую к сферической форму.

2. Показано, что протекающие в механореакторе фазовые превращения приближают обрабатываемую шихту к равновесному состоянию. Полнота механически активированного взаимодействия реагирующих компонентов определяется химическим составом композиций, а также длительностью механосинтеза и составляет 10–90 % от термодинамически равновесного состояния. Синтезированные порошки являются термодинамически неравновесными терморреагирующими композициями, структура основы которых формируется по механизму динамического возврата и относится к субмикрорекристаллическому типу с размером зерен  $\leq 100$  нм, разделенных на блоки величиной  $\leq 20$  нм.

3. Выявлено, что процессы термически активируемых фазовых превращений при отжиге механически легированных порошков начинаются при температурах 470–520 К, реализуются по бездиффузионному механизму и превращают их из терморреагирующих в термонеutralные. Показано, что фазовый состав порошков достигает близкого к равновесному состояния после отжига при температурах 970–1030 К, при этом они имеют субмикро- и/или микрорекристаллический тип структуры основы, характеризующийся комплексным упрочнением, сочетающим твердорастворное, дисперсионное, зернограничное и дисперсное при решающей роли двух последних.

4. Исследовано влияние основных факторов напыления порошков на пористость плазменных покрытий, определены наиболее значимые из них, получены математические зависимости, описывающие области оптимума. Установлено, что пористость сформированных по оптимальному режиму покрытий не превышает 5 %, покрытия имеют субмикро- и/или микрорекристаллический тип структуры основы с равномерно распределенными в ней синтезированными

ми фазами и наследуют характерное для механически легированных порошков комплексное упрочнение, обеспечивающее их высокую стойкость к длительным высокотемпературным воздействиям, достигающим 1170 К.

5. Проведена оптимизация составов и продолжительности обработки шихты в механореакторе по комплексному показателю эксплуатационных свойств формируемых из механически легированных порошков покрытий (твердости, износостойкости, прочности сцепления с основой и вязкости). Установлено, что плазменные покрытия из разработанных механически легированных порошков по исследованным свойствам существенно превосходят аналоги из промышленно выпускаемых материалов, в том числе по твердости — в 1,15–1,7 раза, по износостойкости — в 1,4–1,8 раза, по прочности сцепления с основой — в 1,5–2,4 раза и по вязкости (металлокерамические покрытия) — до 2-х раз.

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

На защиту выносятся следующее.

1. Результаты термодинамического анализа, а также экспериментальных исследований процесса механосинтеза перспективных композиций, позволившие определить интервалы изменения химического состава шихты и основных технологических факторов ее обработки в механореакторе, обеспечившие безопасность процесса получения механически легированных порошков на основе систем Fe–Al, Ni–Al, Fe–Cr–C, Fe–Ni–Cr–C, Fe–Al–MoO<sub>3</sub>, Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni–Al–MoO<sub>3</sub>, Ni–Al–Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>–Ni–Al с размерами частиц 30–100 мкм (для порошков на металлической основе) и 5–10 мкм (на керамической), имеющих гомогенное на субмикроструктурном уровне распределение компонентов и близкую к сферической форму.

2. Результаты экспериментальных исследований структурно-фазовых превращений, протекающих в процессе механического легирования порошков, позволившие установить, что в ходе механосинтеза формируются термодинамически неравновесные композиции, полнота завершения взаимодействий между компонентами в которых регулируется в пределах 10–90 % изменением состава шихты и временем её обработки, а структура основы формируется по механизму динамического возврата и относится к субмикроструктурному типу с размером зерен  $\leq 100$  нм, разделенных на блоки величиной  $\leq 20$  нм.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры отжига механически легированных порошков на структурно-фазовые превращения в них, позволившие установить, что нагрев до 470–520 К сопровождается преобразованием материалов из терморреагирующих в термонеутральные, реализующимся путем формирования первичных упрочняющих фаз с низкой энергией активации по бездиффузионному механизму, а также последующим приближением при 970–1030 К фазового состояния к равновесному с сохранением

при этом субмикро- и/или микрокристаллической структуры основы материалов, комплексно упрочнённых преимущественно по зернограничному и дисперсному механизмам, что обуславливает повышение твердости частиц порошков на 20–80 % при отжиге в интервале 550–900 К.

4. Результаты экспериментальных исследований структуры, фазового состава и свойств износостойких плазменных покрытий, позволившие определить оптимальные значения технологических параметров процесса напыления, обеспечившие формирование субмикро- и/или микрокристаллической структуры их основы с размером зерен не более 1 мкм, разделенных на блоки величиной до 50 нм, и пористостью  $\leq 5$  %, и установить, что они наследуют характерное для порошков комплексное упрочнение ультрадисперсными включениями интерметаллидов, оксидов и карбидов, повышающих твердость и износостойкость покрытий.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния химического состава шихты и режимов ее механического легирования на свойства плазменных покрытий, позволившие с использованием метода математического планирования определить оптимальные содержание легирующих компонентов и время обработки, обеспечившие получение плазменных покрытий, существенно превосходящих аналоги по твердости, износостойкости, прочности сцепления с основой и вязкости. Технологические процессы получения композиционных порошков и плазменных покрытий из них, а также способ подачи порошков в плазменную струю, отличающийся циклическим режимом их дозирования.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Соискателю принадлежит постановка задач и разработка методик исследований, непосредственное их проведение, анализ и интерпретация результатов исследований, оптимизация технологических режимов получения механически легированных композиционных материалов и покрытий из них, разработка технологических процессов получения порошков и напыления плазменных покрытий. Изложенные в работе результаты экспериментальных и теоретических исследований получены как лично соискателем, так и при участии соавторов совместно опубликованных работ – научного руководителя д-ра техн. наук, проф. Г. Ф. Ловшенко и д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения работы доложены и обсуждены на 30-й ежегодной международной конференции «Композиционные материалы в промышленности» (г. Ялта, 2010 г.); Международной научно-практической конференции молодых ученых (г. Брянск, 2010 г.); 2-м Белорусско-Корейском форуме (г. Минск, 2013 г.); международных научно-технических конференциях по прогрессивным

материалам, оборудованию и ресурсосберегающим технологиям (г. Могилев, 2007–2017 гг.); международных научно-технических конференциях молодых ученых (г. Могилев, 2006–2017 гг.).

### **Опубликование результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 47 научных работ, в том числе 16 статей в рецензируемых журналах и сборниках, включенных в перечень ВАК (объем – 10,6 авторского листа), 30 материалов конференций, 1 заявка на патент. Общее число страниц опубликованных материалов – 168 страниц.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Структура работы обусловлена последовательностью решения задач для достижения поставленной цели.

Полный объем диссертации составляет 381 страницу, в том числе 111 страниц основного текста, 116 рисунков на 55 страницах, 17 таблиц на 6 страницах, 13 приложений на 187 страницах, 213 библиографических ссылок на 15 страницах и список публикаций соискателя из 47 наименований на 7 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Во **введении** и **общей характеристике работы** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены основные способы напыления газотермических покрытий. Проанализировано влияние характеристик плазменных покрытий на их физико-механические и эксплуатационные свойства. Установлено, что наибольшее влияние на работоспособность покрытий оказывают прочность сцепления с основой, структура, их химический и фазовый состав. Рассмотрено влияние на данные характеристики параметров напыляемых порошков, определены наиболее значимые из них (твердость, состав, размеры и форма частиц).

Проведен анализ основных групп порошков для напыления, который показал, что наиболее перспективными являются композиционные материалы. Однако способы их получения имеют целый ряд недостатков, включая сложность технологических процессов, низкую производительность, наличие токсичных отходов и другие. Отмечено, что большинства недостатков, присущих промышленно используемым технологиям, лишен способ, базирующийся на методе реакционного механического легирования (РМЛ). Анализ работ, посвящен-



ных газотермическим покрытиям из таких материалов, показал, что их применение на сегодняшний день сдерживается рядом факторов, основными из которых являются недостаточная изученность процесса и отсутствие промышленной технологии получения механически легированных порошковых материалов для плазменных покрытий. Это обусловило необходимость постановки настоящей работы, определило ее цель и задачи.

**Во второй главе** рассмотрены технологии получения механически легированных композиционных порошков и нанесения покрытий из них. Представлены методы исследования физико-механических свойств, микроструктуры, морфологии и фазового состава экспериментальных материалов и покрытий, применяемое оборудование и приборы.

Исходными компонентами для получения разрабатываемых материалов служили стандартные порошки: железа – ПЖРВ (ГОСТ 9849–86), никеля – ПНК – ОНТ2 (ГОСТ 9722–79), железо-хромистого сплава – ПХ30–1 (ГОСТ 13084–88), технического углерода – ПМ – 100 (ГОСТ 7885–86), алюминия – ПА – 4 (ГОСТ 6058–73). Использовались также порошки марки «Ч»: марганца, оксида железа  $Fe_2O_3$  (ГОСТ 4173–77), оксида никеля  $Ni_2O_3$  (ТУ 6–09–02–274–78); порошкообразные отходы белого чугуна ( $C = 3,2$  мас. %). Исходными материалами для керамических покрытий служили электрокорунд марки М10 по ГОСТ 28818–90 и диоксид титана (рутил) по ГОСТ 9808–84.

Металлографический анализ проводили с помощью оптического металлографического комплекса МКИ – 2М (Беларусь), а также сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II SBH (Чехия). Исследование элементного состава выполняли на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II SBH (Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 350/XT с детектором X-Act ADD. Тонкую структуру материалов исследовали с помощью просвечивающих электронных микроскопов Tesla BS – 540, ЭМ – 12 и ЭМ – 125К. Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН – 3М. Микротвердость порошков и плазменных покрытий измеряли по стандартной методике по методу Виккерса с помощью микротвердомеров Indentec ZHV (Германия), Micromer – 2 (Швейцария).

**В третьей главе** обоснован выбор наиболее перспективных систем порошков для плазменных покрытий. Изучены процессы формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных порошков.

Композиции условно разделены на три группы (таблица 1). Группа 1 – порошки на основе железа для покрытий с повышенными твердостью и износостойкостью; группа 2 – материалы на основе системы Ni–Al для покрытий с повышенными твердостью и прочностью сцепления с основой; группа 3 – порошковые композиции металлизированной оксидной керамики для покрытий с повышенными износостойкостью и вязкостью.

Таблица 1. – Базовые композиции и их условное обозначение

Химический состав, мас. %	Условное обозначение
Группа 1 – Материалы на основе железа	
Fe – 13 % Cr – 0,4 % C	40X13
Fe – 18 % Cr – 10 % Ni – 0,12 % C	12X18H10
(1-x)[Fe – 18 % Cr – 10 % Ni – 0,12 % C] – x (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al)	12X18H10 – ДУ 1(6)
Fe – 30 % Al	ЖА30
(1-x)[Fe – 30 % Al] – x (7,9 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2,7 % Al)	ЖА30 – ДУ1(5)
Группа 2 – Материалы на основе никеля	
Ni – 10 % Al	H10Ю90
(1-x)[Ni – 10 % Al] – x (9,8 % Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3,2 % Al)	H9Ю10 – ДУ 2(6)
Группа 3 – Материалы на основе керамики	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 12 % TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 12 % TiO <sub>2</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 12 % TiO <sub>2</sub> – 10 % Ni	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 12 % TiO <sub>2</sub> – 10 % Ni

В первые две группы, за исключением системы Fe–Cr–C, с целью повышения основных свойств покрытий из синтезируемых материалов (твердости, износостойкости, прочности сцепления) дополнительно вводили взятые в стехиометрическом соотношении оксиды с относительно низкой термодинамической стабильностью (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MoO<sub>3</sub>), а также металл-восстановитель – алюминий, продуктом взаимодействия которых является необходимое (расчетное) количество оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

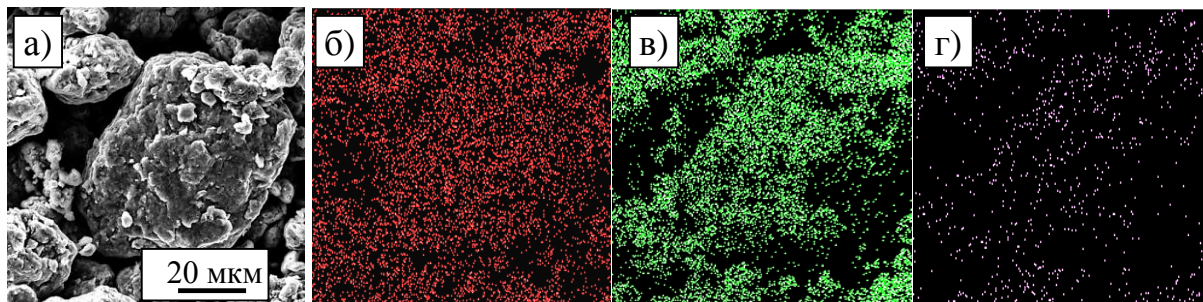
Предполагалось, что в этих композициях должен иметь место механически и термически активируемый синтез ультрадисперсных частиц оксидов алюминия, вызывающий дисперсное упрочнение (ДУ). В условном обозначении материалов, например, ЖА30 – ДУ1(5), первая группа букв и цифр – ЖА30 – показывает состав основы композиции (Fe + 30 мас. % Al), первая цифра после ДУ – вводимый оксид (1 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 – Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – MoO<sub>3</sub>), а цифра в скобках – расчетное содержание в разрабатываемом композиционном порошке оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в мас. %.

Отмечено, что отсутствие постоянного контакта (тепловых мостиков) между композиционными частицами обрабатываемой в механореакторе шихты позволяет увеличить максимальную концентрацию легирующих компонентов (алюминия и легирующего оксида), исключая протекание процесса в режиме СВС, по сравнению с расчетной, полученной для отдельной композиционной частицы, в 3–5 раз.

Определены условия и режимы, обеспечивающие получение механически легированных композиций требуемого гранулометрического состава: радиус и частота круговых колебаний помольной камеры составляют 6 мм и 25,0 с<sup>-1</sup>, что соответствует ускорению размалывающих тел  $a_n = 135 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ; степень запол-

нения помольной камеры шарами  $\varepsilon = 75 \%$ ; время обработки  $t = 8$  ч; отношение объемов размалывающих тел и шихты  $k = 12$ ; температура в камере –  $< 320$  К.

Механически синтезированные порошки большинства систем имеют близкую к сферической форму частиц, отличающихся низкой пористостью ( $\leq 5\%$ ), а также гомогенным, на субмикрористаллическом уровне, распределением химических элементов (рисунок 1).



а – топография поверхности частиц; б – Fe; в – Al; г – O

**Рисунок 1. – Топография поверхности частиц порошка ЖА30 – ДУ 1(5) (СЭМ), распределение интенсивности рентгеновского излучения основных элементов в нем**

Установлено, что структура основы синтезируемых материалов, независимо от состава шихты, формируется по механизму динамического возврата. Она относится к субмикрористаллическому типу с размером зерен не более 100 нм, разделенных на блоки величиной до 20 нм.

Анализ фазового состава полученных порошков (таблица 2) указывает на то, что при обработке шихты в механореакторе протекают механически активируемые превращения, приближающие исследуемые системы к термодинамическому равновесию.

Степень развития превращений, в зависимости от природы реагирующих компонентов, находится в интервале 10–90 %.

В композициях, содержащих оксиды ( $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ) и Al, окислительно-восстановительные превращения получают значительное развитие и в системах с  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Ni}_2\text{O}_3$  они достигают 50–70 %, а в системах с  $\text{MoO}_3$  – до 90 %.

Таким образом, установлено, что механически легированные порошки являются термодинамически неравновесными термореагирующими системами, теплосодержание которых зависит от исходного состава шихты и условий ее обработки в механореакторе.

Механическое легирование снижает температуру начала взаимодействия на 250–300 К. Оно начинается при температурах 470–520 К и происходит по бездиффузионному механизму.

Установлено, что возрастание длительности обработки шихты в механореакторе с 6 до 12 ч и отжиг полученного материала в интервале температур 550–900 К повышают содержание ультрадисперсных упрочняющих фаз, обес-

печивая увеличение твердости порошка, в зависимости от его состава, на 20–80 %.

Таблица 2. – Фазовый состав механически легированных порошков

Обозначение	Химический состав шихты, мас. %	Фазовый состав порошков	
		равновесный	механически легированных
40X13	Fe – 13 % Cr – 0,4 % C	$\text{Fe}_\alpha(\text{Cr}); \text{Cr}_7\text{C}_3$	$\text{Fe}_\alpha; \text{Fe}_\alpha(\text{C}); \text{Fe}_\gamma(\text{C}); (\text{Fe}, \text{Cr}); \text{Fe}_2\text{C}$
12X18H10	Fe – 18 % Cr – 10 % Ni – 0,12 % C	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni}); \text{Cr}_7\text{C}_3$	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni}); \text{Fe}_\alpha(\text{Ni}); \text{Fe}_\alpha(\text{C}); (\text{Fe}, \text{Cr}); \text{FeNi}_3; \text{Fe}_2\text{C}; \text{Ni}$
ЖА30 – ДУ 1(9)	81 % [Fe – 30 % Al] – 19 % (14,2 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$ + 4,8 % Al)	$\text{FeAl}; \text{Fe}_3\text{C}; \text{Al}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-Fe}(\text{C}, \text{Al}); \text{FeAl}; \text{Fe}_3\text{Al}; \text{Fe}_2\text{O}_3; \text{Al}$
H90Ю10 – ДУ 2(6)	87 % [Ni – 10 % Al] – 13 % (9,8 % $\text{Ni}_2\text{O}_3$ + 3,2 % Al)	$\text{Ni}(\text{Al}); \text{Ni}_3\text{Al}; \text{Al}_2\text{O}_3; \text{Al}_4\text{C}_3;$	$\text{Ni}(\text{Al}); \text{Ni}_3\text{Al}; \text{NiAl}; \text{Ni}; \text{Al}; \text{Ni}_2\text{O}_3$
78 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ – 12 % $\text{TiO}_2$ – 10 % Ni	78 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ – 12 % $\text{TiO}_2$ – 10 % Ni	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3; \text{TiO}_2; \text{Ni}$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3; \text{TiO}_2; \text{Ni}; \text{Al}_2\text{TiO}_5; \text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$

После отжига при температурах 970–1030 К в структуре, наряду с равновесными фазами, присутствуют и неравновесные, основные из которых – продукты неполного взаимодействия между исходными компонентами. При этом порошки имеют субмикро- и/или микрокристаллический тип структуры основы и являются комплексно упрочнёнными преимущественно по зернограничному и дисперсному механизмам. По твердости они в 1,5–2,6 раза превосходят аналоги.

В четвертой главе отражены результаты исследований фазового состава, структуры и свойств плазменных покрытий из механически легированных порошков.

Показано, что покрытия из разработанных порошков однородны по химическому составу, наследуют субмикро- и/или микрокристаллический тип структуры основы последних, имеют равномерное распределение механически и термически синтезированных фаз и обладают комплексным упрочнением.

Выявлено, что отжиг порошков в температурном интервале 550–900 К приводит к приросту твердости у плазменных покрытий на 15–25 %. В то же время на никелевых системах показано, что, в отличие от твердости, отжиг порошков негативно влияет на прочность сцепления покрытий с основой, снижая ее. Максимальную адгезионную прочность сцепления с основой имеют покрытия, полученные напылением терморреагирующих механически легированных порошков, не подвергавшихся отжигу. По величине этого параметра данные покрытия до 2,4 раза превосходят полученные из порошков марок ПТ – НА – 01

и ПН85Ю15. При этом прочность сцепления покрытий из механически легированных порошков, даже после их отжига, в 1,1–1,4 раза выше, чем у покрытий из промышленно выпускаемых аналогов.

Установлено, что применение разработанных механически легированных металлокерамических порошков на основе  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , содержащих порядка 10–12 мас. % никеля и/или алюминия, обеспечивает примерно двукратное увеличение вязкости покрытий. Это приводит к возрастанию стойкости покрытий к трещинообразованию, изменяет характер их разрушения. Показано, что повышение вязкости обусловлено формированием в покрытии демпфирующих микропрослоек никеля с субмикроструктурными включениями в них соединений  $\text{NiAl}$  и  $\text{Ni}_3\text{Al}$ .

Покрытия на основе металлов, как и порошки, из которых они получены, имеют неравновесный фазовый состав (таблица 3).

Таблица 3. – Фазовый состав плазменных покрытий

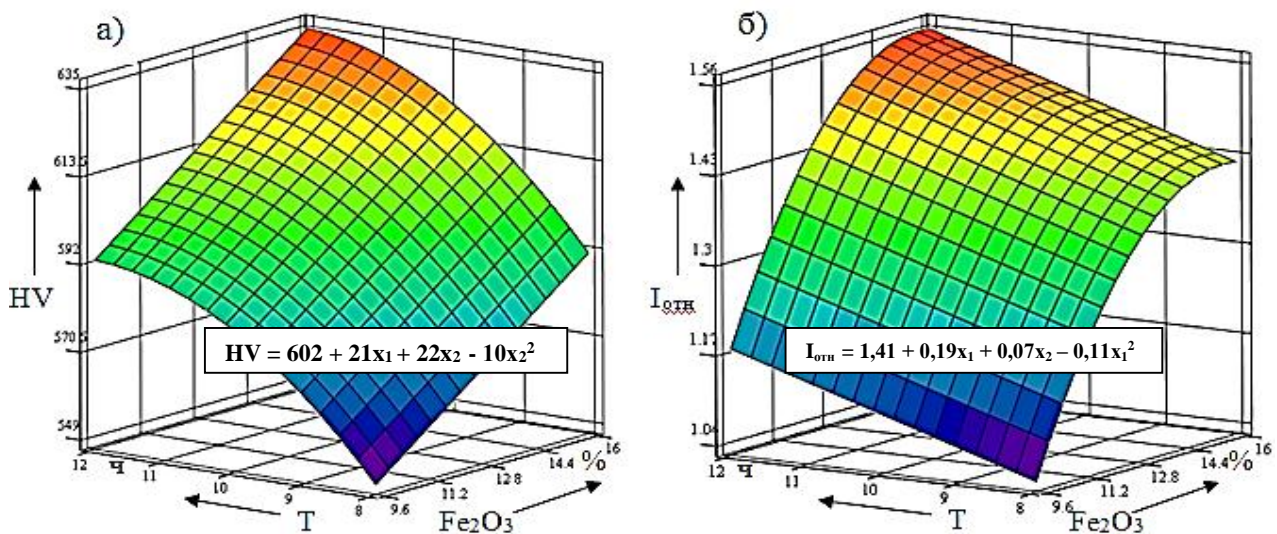
Обозначение	Фазовый состав покрытий		
	равновесный	из МЛ порошков	из отожженных порошков
40X13	$\text{Fe}_\alpha(\text{Cr});$ $\text{Cr}_7\text{C}_3$	$\text{Fe}_\alpha, \text{Fe}_3\text{O}_4, \text{FeO}, \text{FeC}, \text{CrC}$	$\text{Fe}_\alpha, \text{Fe}_3\text{O}_4, \text{FeO}, \text{FeC}, \text{CrC}$
12X18Н10	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni});$ $\text{Cr}_7\text{C}_3$	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni}); \text{FeCr}_2\text{O}_4;$ $\text{NiAlO}_2; \text{Cr}_2\text{O}_3; \text{Fe}_2\text{O}_3; \text{FeO};$ $\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni}); \text{FeCr}_2\text{O}_4; \text{NiAlO}_2;$ $\text{Cr}_2\text{O}_3; \text{Fe}_2\text{O}_3; \text{FeO}; \text{Fe}_3\text{O}_4$
ЖА30 – ДУ 1(9)	$\text{FeAl}; \text{Fe}_3\text{C};$ $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeAl}; \alpha\text{-Fe}(\text{C}, \text{Al}); \text{Fe}_3\text{Al};$ $\text{Fe}_2\text{O}_3; \text{FeO}; \text{Fe}_3\text{O}_4; \text{Al}; \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeAl}; \alpha\text{-Fe}(\text{C}, \text{Al}); \text{Fe}_3\text{Al};$ $\text{Fe}_2\text{O}_3; \text{FeO}; \text{Fe}_3\text{O}_4; \text{Al}_2\text{O}_3$
Н90Ю10 – ДУ 2(6)	$\text{Ni}(\text{Al});$ $\text{Al}_2\text{O}_3; \text{Al}_4\text{C}_3$	$\text{Ni}(\text{Al}); \text{Ni}_3\text{Al}, \text{Al}; \text{Ni}_2\text{O}_3; \text{NiO}$ $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Ni}(\text{Al}); \text{Ni}_3\text{Al}; \text{Ni}_2\text{O}_3; \text{NiO};$ $\text{Al}_2\text{O}_3$
$\text{Al}_2\text{O}_3 - 12\% \text{TiO}_2 -$ $10\% \text{Ni}$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3;$ $\text{TiO}_2; \text{Ni}$	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3; \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3; \text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti});$ $\text{Al}_2\text{TiO}_5$	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3; \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3; \text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti});$ $\text{Al}_2\text{TiO}_5$

Главным отличием состава от равновесного является наличие широкой гаммы разновалентных оксидов металла основы и легирующих элементов, включая и комплексные, образующиеся в процессе напыления. Причем в случае использования порошков, не подвергавшихся отжигу, в качестве неравновесных фаз могут частично сохраняться исходные компоненты, например, Fe и Al, свидетельствующие о незавершенности процессов механически активируемых фазовых превращений.

**Пятая глава** посвящена оптимизации химического состава, условий механосинтеза порошков и режимов плазменного напыления покрытий. Приведены результаты исследований структуры покрытий, полученных по оптимальным режимам.

Установлено, что условия и режимы напыления, обеспечивающие формирование плазменных покрытий с пористостью менее 5 %, находятся в следующих пределах: средний размер частиц порошка — 45–125 мкм (для металлокерамических — 5–10 мкм); мощность плазменного потока — 40–50 кВт; дистанция напыления — 120–250 мм; диаметр подающей трубки — 1,6–2,1 мм.

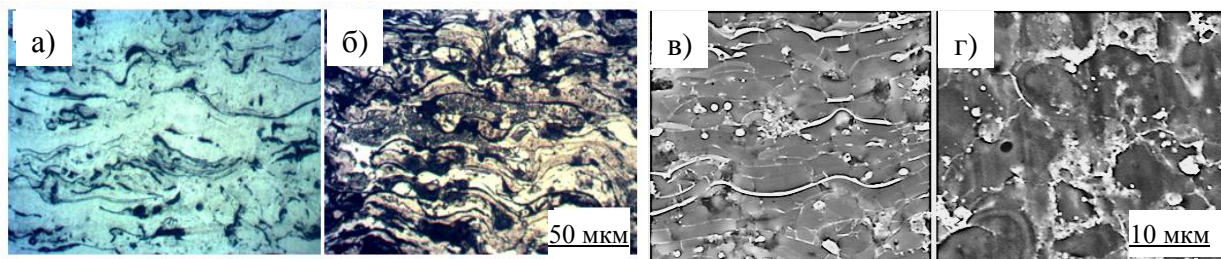
Для порошков всех перспективных систем получены математические зависимости, описывающие влияние компонентного состава шихты и времени ее обработки в механореакторе на свойства формируемых покрытий. В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты оптимизации состава материалов системы ЖАЗО – ДУ 1.



**Рисунок 2.** – Зависимость твердости (а) и относительной износостойкости (б) покрытий системы ЖАЗО – ДУ 1 от количества  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в исходной шихте и времени механосинтеза

Установлены оптимальные продолжительность обработки шихты в механореакторе и компонентные составы шихты для покрытий разного назначения, превосходящие аналоги по следующим свойствам: 40X13 – по твердости в 1,35 и износостойкости в 1,65 раза; 79 % [Fe – 30 % Al] – 21 % (15,7  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  + 5,3 % Al) — по твердости в 1,5 и износостойкости в 1,8 раза; Ni – 15 % Al — по твердости в 1,15 и прочности сцепления в 1,5 раза; 91,2 % [Ni – 10 % Al] – 8,8 % (6,6 %  $\text{Ni}_2\text{O}_3$  + 2,2 % Al) — по прочности сцепления в 2,4 раза; 87,3 % [Fe – 18 % Cr – 10 % Ni – 0,12 % C] – 12,7 % (9,5 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 3,2 % Al) — по твердости в 2 и износостойкости в 1,4 раза; 86,2 % [ $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 13 %  $\text{TiO}_2$ ] – 13,8 % (10 % Ni – 3,8 % Al) — по износостойкости в 1,7 и вязкости в 2 раза.

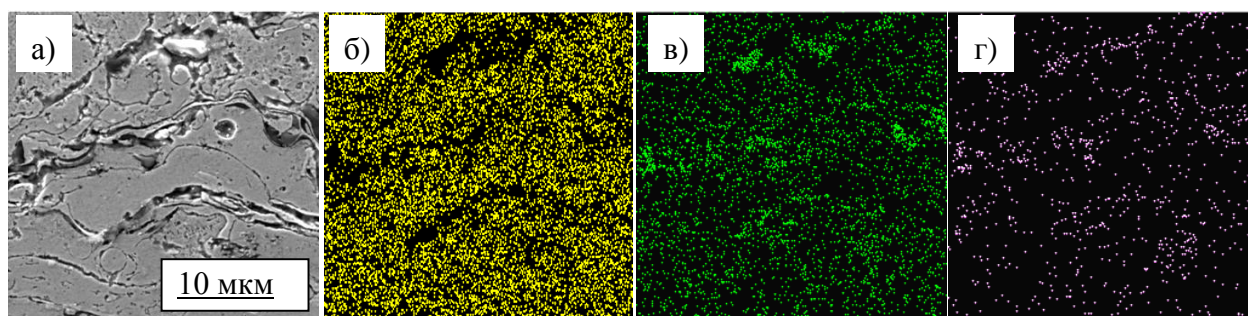
Разработанные покрытия имеют классическое слоистое строение. Они состоят из пластин, которые в поперечном сечении имеют толщину слоя 5–20 мкм и ширину 40–80 мкм (рисунок 3).



**а, б – Н85Ю15 (а – нетравленное, б – после травления);  
в, г – 86,2 % [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 13 % TiO<sub>2</sub>] – 13,8 % (10 % Ni – 3,8 % Al)  
(в – поперечный шлиф, г – продольный)**

**Рисунок 3. – Микроструктура плазменных покрытий**

Для покрытий характерен субмикро- и/или микрокристаллический тип структуры с размером зерен не более 1 мкм, разделенных на блоки размерами до 50 нм. Легирующие элементы и синтезированные упрочняющие фазы имеют равномерное распределение (рисунок 4). Предполагается, что их размер не превышает 10 нм.



**а – электронное изображение; б – Ni; в – Al; г – O**

**Рисунок 4. – Распределение элементов в плазменном покрытии, полученном напылением порошка Н85Ю15 (МРСА)**

Разработаны: прерывистый способ подачи мелкодисперсных и плохотекучих порошков, что позволяет повысить производительность процесса напыления в 1,7–2,1 раза; технологический процесс изготовления композиционных порошков на основе железа, никеля и оксидной керамики, покрытия из которых отличаются повышенным комплексом свойств; технологический процесс плазменного напыления, обеспечивающий формирование покрытий из разработанных порошков с пористостью не более 5 %.

В рамках проведенных исследований выполнено более 30 договорных работ по упрочнению и восстановлению рабочих поверхностей деталей с применением разработанных технологий, в том числе с ОАО «Белорусский металлургический завод», ОАО «КуйбышевАзот», ОАО «Могилевхимволокно», ЗАО «Ремеза», ОАО «НАФТАН», ОАО «Можелит» и др., общая сумма которых, в переводе на иностранную валюту, соответствует более 127 тыс. долл. США.

По итогам работы получены 2 акта о практическом использовании результатов исследований, 2 акта производственных испытаний, 2 справки о возможности использования результатов, положительное решение на выдачу патента по заявке а2140014.

Результаты производственных испытаний, проведенных на предприятиях Республики Беларусь и России, показали, что срок службы деталей с плазменными покрытиями из разработанных порошков до 2-х раз выше, чем у покрытий на основе промышленно выпускаемых аналогов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность использования реакционного механического легирования порошков для напыления износостойких плазменных покрытий на основе железа, никеля и металлооксидной керамики следующих систем: Fe–Al, Ni–Al, Fe–Cr–C, Fe–Ni–Cr–C, Fe–Al–MoO<sub>3</sub>, Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni–Al–MoO<sub>3</sub>, Ni–Al–Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>–Ni–Al. Определены максимально допустимые концентрации реагирующих компонентов в исходной шихте, исключающие возможность реализации процессов СВС, а также интервалы изменения основных технологических факторов ее обработки в механореакторе, в том числе ускорения рабочих тел — от 135 до 145 м·с<sup>-2</sup>, отношения объемов рабочих тел и шихты — от 10 до 12, степени заполнения помольной камеры рабочими телами — от 70 до 80 % и длительности обработки в механореакторе — от 8 до 10 ч, обеспечивающие получение механически легированных порошков с размерами частиц 30–100 мкм (для порошков на металлической основе) и 5–10 мкм (на керамической), имеющих пористость ≤ 5 % и близкую к сферической форму [2, 4–14, 18, 23, 25, 27, 29, 30, 32–35, 37–39, 43, 45, 46].

2. Экспериментальными исследованиями структурно-фазовых превращений, протекающих в процессе механического легирования порошков, а также дифференциальным термическим анализом установлено, что в результате механосинтеза формируются термодинамически неравновесные композиции, полнота завершения взаимодействий между компонентами в которых регулируется в пределах 10–90 % изменением состава шихты и времени её обработки. Выявлено, что основой композиции системы Fe–Al(10–30) является феррит с включениями Fe<sub>3</sub>Al и FeAl, системы Fe–Cr–C — феррит с включениями мартенсита, аустенита и карбидов Fe<sub>2</sub>C и Fe<sub>3</sub>C, системы Fe–Cr–Ni–C — аустенит с включениями мартенсита, σ-фазы и FeNi<sub>3</sub>, системы Ni–Al10 — твердый раствор Al в Ni с включениями Ni<sub>3</sub>Al и NiAl. В металлокерамических композициях на основе α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub>, содержащих Ni, Al и Fe, протекает синтез соединений



$\text{Al}_2\text{TiO}_5$  и  $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$ . Структура основы всех композиций относится к субмикроструктурному типу с размером зерен  $\leq 100$  нм, разделенных на блоки величиной  $\leq 20$  нм [4, 7, 10, 13, 14, 31, 37].

3. Экспериментальными исследованиями влияния термической обработки механически легированных порошков на их фазовый состав, структуру и свойства установлено, что отжиг синтезированных материалов в интервале температур 470–520 К сопровождается преобразованием их из термореагирующих в термонеutralные, реализующимся путем формирования первичных упрочняющих фаз с низкой энергией активации кристаллизации по бездиффузионному механизму. Отжиг при температурах 970–1030 К приводит к формированию близкого к равновесному фазового состояния порошков, достигающегося за счет образования наиболее термодинамически стабильных соединений, с сохранением при этом субмикроструктуры и/или микрокристаллической структуры основы, комплексно упрочнённой преимущественно по зернограничному и дисперсному механизмам. Завершение фазовых превращений при отжиге обуславливает повышение твердости синтезированных порошковых материалов на 20–80 % [7–10, 13, 14, 38, 39, 42, 44].

4. В результате экспериментальных исследований влияния режимов напыления на структуру износостойких плазменных покрытий определены наиболее значимые из них и с использованием центрального композиционного ортогонального планирования получены математические зависимости, описывающие области оптимума, обеспечивающие формирование плазменных покрытий с пористостью  $\leq 5$  % и находящиеся для всех составов напыляемых порошков в следующих интервалах: мощность плазменной струи — 40–50 кВт; расстояние от среза сопла до выходного отверстия подающей трубки — 5 мм; диаметр отверстия подающей трубки — 1,6–2,1 мм; дистанция напыления — 120–250 мм [12].

5. По результатам экспериментальных исследований фазового состава плазменных покрытий установлено, что основой покрытий состава ЖА30 является интерметаллид  $\text{FeAl}$ , состава 12Х18Н10 — аустенит с включениями мартенсита, сплавов Н90Ю10 — твердый раствор  $\text{Al}$  в  $\text{Ni}$  и Н85Ю15 — интерметаллид  $\text{Ni}_3\text{Al}$  с включениями твердого раствора  $\text{Al}$  в  $\text{Ni}$ . Основой покрытий из порошков композиции  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni(Fe)-Al}$  выступает высокотемпературная фаза  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  с включениями низкотемпературной фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$ , присутствуют также интерметаллидные фазы никеля —  $\text{AlNi}$ ,  $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$  и  $\text{Ni}$  или железа —  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $\text{FeAl}$  и  $\text{Fe}$ . Покрытия наследуют характерный для разработанных порошков субмикроструктурный и/или микрокристаллический тип структуры основы с равномерно распределенными в ней наноразмерными синтезированными фазами интерметаллидов, оксидов и карбидов, обладают комплексным упрочнением, обеспечивающим повышенные их твердости в широком интервале температур, верхнее значение которого достигает 1170 К [8, 9, 11, 13, 40, 41].

6. По результатам комплексного исследования разработаны составы механически легированных порошков для плазменных покрытий различного функционального назначения, которые по приоритетным свойствам значительно превосходят аналоги, в том числе покрытия состава 40X13 — по твердости в 1,35 и износостойкости в 1,65 раза; состава 79 % [Fe – 30 % Al] – 21 % (15,7 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 5,3 % Al) — по твердости в 1,5 и износостойкости в 1,8 раза; состава Ni – 15 % Al — по твердости в 1,15 и прочности адгезионного сцепления с основой в 1,5 раза; состава 91,2 % [Ni – 10 % Al] – 8,8 % (6,6 % Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2,2 % Al) — по прочности адгезионного сцепления с основой в 2,4 раза; состава 87,3 % [Fe – 18 % Cr – 10 % Ni – 0,12 % C] – 12,7 % (9,5 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,2 % Al) — по твердости в 2,0 и износостойкости в 1,4 раза; состава 86,2 % [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 13 % TiO<sub>2</sub>] – 13,8 % (10 % Ni – 3,8 % Al) — по износостойкости в 1,7 и вязкости в 2,0 раза. Проведены промышленные испытания деталей с плазменными покрытиями из механически легированных порошков в условиях интенсивного изнашивания, показавшие, что срок их службы в 1,5–2,0 раза выше, чем с покрытиями из промышленно изготавливаемых порошков-аналогов. Разработан способ подачи в высокотемпературную струю мелкодисперсных и трудно транспортируемых порошков, отличающийся циклическим режимом их дозирования [1, 3, 8, 9, 12, 15, 17, 19–22, 24, 26, 28, 36, 38, 39, 47].

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

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований разработаны и внедрены в производство технологические процессы изготовления композиционных порошков на основе железа, никеля и оксидной керамики и плазменного напыления покрытий из них, что позволило выполнить свыше 30 договорных работ, общая сумма которых, в переводе на иностранную валюту, составила более 127 тыс. долл. США.

Разработанные техпроцессы послужили основой для создания участков по производству механически легированных порошков, а также напыления покрытий из них и могут быть использованы на таких предприятиях республики, как ОАО «Могилевхимволокно», ОАО «ГродноАзот», Мозырьский и Новополоцкий НПЗ, ОАО «Беларуськалий», ОАО «Белорусский металлургический завод».

Разработанные составы порошков могут найти применение для упрочнения деталей нитепроводящей гарнитуры, упрочнения и восстановления штоков плунжерных насосов, роликов линий по производству металлокорда.

Полученные результаты могут служить базой для дальнейших исследований, в том числе создания самофлюсующихся композиций, предназначенных для напыления и наплавки.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Статьи в научных журналах*

1. Ловшенко, Г. Ф. Сравнительные исследования скорости нарастания плазменных покрытий при напылении в режимах с обычной и пульсирующей подачей плохотекучего композиционного керамического порошка / Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко, А. М. Старовойтов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2 (23). – С. 98–106.

2. Ловшенко, Ф. Г. Расчет максимальных концентраций реагирующих компонентов в шихте, подвергаемой реакционному механическому легированию / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 2 (31). – С. 64–75.

3. Ловшенко, Ф. Г. Повышение качества плазменных металлокерамических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко, А. М. Старовойтов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 3 (32). – С. 71–81.

4. Ловшенко, Ф. Г. Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиционных порошков на основе системы «железо – алюминий» и покрытий из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1 (34). – С. 36–50.

5. Ловшенко, Ф. Г. Термодинамическое моделирование физико-химических процессов и оптимизация технологии плазменного нанесения покрытий из механически легированных терморреагирующих порошков / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, Б. Б. Хина, З. М. Ловшенко, А. С. Федосенко // Литье и металлургия. – 2012. – № 2. – С. 116–128.

6. Ловшенко, Ф. Г. Оптимизация состава шихты механически легированных порошков для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2 (39). – С. 71–81.

7. Ловшенко, Ф. Г. Влияние механического легирования на фазовый состав и теплосодержание терморреагирующих порошковых композиций на основе железа и никеля для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Литье и металлургия. – 2014. – № 4 (77). – С. 99–108.

8. Ловшенко, Ф. Г. Структура, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из механически легированных терморреагирующих композиционных порошков системы «никель – алюминий» / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Литье и металлургия. – 2015. – № 2. – С. 109–121.

9. Ловшенко, Ф. Г. Структура, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из механически легированных терморреагирующих композиционных порошков системы «никель – алюминий – оксид никеля» / Ф. Г. Ловшенко,

Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3 (48). – С. 33–44.

10. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования структуры и фазового состава механически легированных композиционных порошковых материалов для газотермических способов напыления / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 1 (50). – С. 36–47.

11. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования фазового состава и структуры плазменных покрытий из механически легированных композиционных порошков / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–52.

12. Федосенко, А. С. Оптимизация условий получения механически легированных композиционных порошковых материалов для напыления износостойких плазменных покрытий / А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3 (52). – С. 107–120.

13. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности структурно-фазовых превращений в механически легированных порошках и плазменных покрытиях из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1 (54). – С. 31–46.

14. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования механически легированных порошков на основе металлов для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 2 (55). – С. 56–68.

15. Ловшенко, Ф. Г. Механохимический синтез металлизированных порошков системы  $Al_2O_3-TiO_2$  для газотермического напыления покрытий с высоким комплексом свойств / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // *Металлургия машиностроения*. – 2017. – № 5. – С. 26–31.

### ***Статьи в научно-технических сборниках***

16. Старовойтов, А. М. Технология напыления плазменных керамических покрытий с пульсирующей подачей труднотранспортируемых порошковых материалов / А. М. Старовойтов, А. С. Федосенко // *Сварка и родственные технологии* : сб. ст. – Минск, 2006. – № 8. – С. 91–94.

### ***Статьи в материалах конференций***

17. Ловшенко, Ф. Г. Оптимизация состава композиционных механически легированных наноструктурных порошков на основе никеля для газотермического напыления покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко

// Композиционные материалы в промышленности: материалы 30-й ежегодной междунар. конф., Ялта, 7–11 июня 2010 г. – Ялта, 2010. – С. 349–354.

18. Ловшенко, Ф. Г. Наноструктурные механически легированные порошки для газотермических методов напыления и покрытия из них / Ф. Г. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко // Наука. Инновации. Производство: сб. материалов 2-го Белорусско-Корейского форума. – Минск, 2013. – С. 44–45.

### *Тезисы докладов*

19. Федосенко, А. С. Улучшение охлаждения поверхности деталей машин в процессе плазменного напыления / А. С. Федосенко ; науч. рук. А. М. Старовойтов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев, 26 янв. 2006 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 111.

20. Федосенко, А. С. Исследование шероховатости поверхности плазменных керамических покрытий после напыления и механической обработки / А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсо-сберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 103.

21. Федосенко, А. С. Разработка технологии напыления плазменных покрытий в пульсирующем режиме / А. С. Федосенко; науч. рук. канд. техн. наук, доц. А. Н. Сеница // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 24–25 янв. 2007 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2007. – С. 54.

22. Федосенко, А. С. Питатель для подачи плохотекучих порошковых материалов / А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апр. 2008 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 2. – С. 103.

23. Федосенко, А. С. Определение количества энергии, расходуемой на нагрев порошкового материала в процессе плазменного напыления / А. С. Федосенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 20–21 нояб. 2008 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 75.

24. Старовойтов, А. М. Плазмотрон с воздушно-водяным охлаждением сопла для напыления покрытий с пульсирующей подачей порошка / А. М. Ста-

ровойтов, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч. 2. – С. 109.

25. Ловшенко, Г. Ф. Механически легированные порошки для плазменного напыления высокостойких покрытий / Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч. 2. – С. 48.

26. Федосенко, А. С. Исследование абразивного износа плазменных керамических и металлокерамических покрытий / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, Федеральное агентство по образованию, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 59.

27. Федосенко, А. С. Выбор порошкового материала для напыления плазменных покрытий на поверхность деталей волочильных машин / А. С. Федосенко, А. М. Старовойтов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 255.

28. Федосенко, А. С. Технология плазменного напыления покрытий из материалов, прошедших механическую обработку / А. С. Федосенко // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 11–13 окт. 2010 г. / М-во образования и науки РФ [и др.]; редкол.: И. А. Лагерева [и др.]. – Брянск, 2010. – С. 260–261.

29. Федосенко, А. С. Напыление плазменных покрытий из порошковых материалов с экзотермическим эффектом / А. С. Федосенко ; науч. рук. д-р техн. наук, доц. Г. Ф. Ловшенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. конф. молодых ученых, Могилев, 18–19 нояб. 2010 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2010. – С. 66.

30. Федосенко, А. С. Дисперсно-упрочненные порошковые материалы для газотермического напыления и покрытия из них / А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2011 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ.

Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2011. – Ч. 1. – С. 213.

31. Старовойтов, А. М. Напыление покрытий из порошковой смеси белого чугуна и алюминия / А. М. Старовойтов, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2011 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2011. – Ч. 1. – С. 203.

32. Федосенко, А. С. Порошковые материалы системы Fe–Al и газотермические покрытия из них / А. С. Федосенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 107.

33. Федосенко, А. С. Терморегулирующие газотермические порошки на основе железа / А. С. Федосенко, А. М. Старовойтов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 170–171.

34. Ловшенко, Г. Ф. Терморреагирующие механически легированные порошки / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 апр. 2013 г.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – Ч. 1. – С. 126–127.

35. Федосенко, А. С. Перспективные материалы для газотермических покрытий / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 30–31 окт. 2013 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – С. 87.

36. Ловшенко, Ф. Г. Исследование износостойкости газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 124–125.

37. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования высоколегированных порошков на основе железа и покрытия из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. /

М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 126–127.

38. Федосенко, А. С. Прочность сцепления газотермических покрытий из порошковых материалов системы Ni–Al / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 16–17 окт. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 90.

39. Федосенко, А. С. Прочность сцепления газотермических покрытий из композиционных порошков системы Ni–Al–Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 16–17 окт. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 91.

40. Ловшенко, Ф. Г. Влияние параметров процесса плазменного напыления на плотность газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 133–134.

41. Федосенко, А. С. Влияние параметров процесса плазменного напыления на плотность покрытий / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 22–23 окт. 2015 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 84.

42. Ловшенко, Ф. Г. Влияние термообработки на структуру и твердость механически легированных порошков для напыления / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования и науки Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2016. – С. 96–97.

43. Федосенко, А. С. Влияние ПАВ на грануляцию порошков системы Fe–Al в процессе РМЛ / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 27–28 окт. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2016. – С. 77.



44. Ловшенко, Ф. Г. Особенности кинетики протекания термически активируемых превращений в механически легированных композициях / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования и науки Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 136–137.

45. Федосенко, А. С. Плазменные покрытия из механически легированных порошков / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 26–27 окт. 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 3–6.

46. Федосенко, А. С. Плазменные покрытия из металлизированных порошков на основе системы  $Al_2O_3-TiO_2$  / А. С. Федосенко ; науч. рук. Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 26–27 окт. 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 108.

### ***Патент***

47. Шихта порошковой проволоки, образующая наноразмерные модификаторы : заявка а2140014 / А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко. – Оpubл. 30.08.2015.



## РЭЗІЮМЭ

**Федасенка Аляксей Сяргеевіч**

### **Фазавы састаў, структура і ўласцівасці зносастойкіх плазменных пакрыццяў з механічна легіраваных парашкоў на аснове жалеза, нікелю і аксіднай керамікі**

**Ключавыя словы:** рэакцыйнае механічнае легіраванне, газатэрмічнае напыленне, плазменныя пакрыцці, зносаўстойлівасць, трываласць счাপлення.

**Мэта працы:** устанавіць заканамернасці фарміравання фазавога саставу, структуры і ўласцівасцяў зносастойкіх плазменных пакрыццяў з механічна легіраваных кампазіцыйных парашкоў на аснове жалеза, нікелю і аксіднай керамікі, а таксама распрацаваць і асвоіць тэхналагічныя працэсы атрымання механічна легіраваных парашкоў і плазменных пакрыццяў з іх.

**Метады даследавання:** сканіруючая электронная мікраскапія, прасвечваючая электронная мікраскапія, мікрарэнтгенаспектральны аналіз, рэнтгенаўскі фазавы аналіз, дыферэнцыяльны тэрмічны аналіз, выпрабаванне на зносаўстойлівасць.

**Атрыманыя вынікі.** Вызначаны ўмовы апрацоўкі шыхты ў механарэактары:  $a_n = 135 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ;  $\varepsilon = 75 \%$ ;  $k = 12$ ;  $t_{\text{кам}} < 320 \text{ К}$ , якія забяспечваюць атрыманне механічна легіраваных парашкоў для плазменных пакрыццяў з сярэднім памерам часціц не больш за 100 мкм, маючых гамагеннае на субмікракрышталічным узроўні размеркаванне кампанентаў, порыстасць  $\leq 5 \%$  і блізкую да сферычнай форму. Устаноўлена, што сінтэзаваныя парашкі з'яўляюцца тэрмадынамічна нераўнаважнымі тэрмарэагуючымі кампазіцыямі з субмікракрышталічным тыпам структуры асновы з памерам зерняў  $\leq 100 \text{ нм}$ , падзеленых на блокі велічыней  $\leq 20 \text{ нм}$ , адпал парашкоў пры тэмпературах 570–870 К суправаджаецца павышэннем іх цвёрдасці на 20–80 %. Вызначаны аптымальныя саставы, час механасінтэзу, а таксама тэхналагічныя параметры працэса напылення, якія забяспечылі атрыманне комплексна ўмацаваных ультрадысперснымі ўключэннямі інтэрметалідаў, аксідаў і карбідаў плазменных пакрыццяў з порыстасцю  $\leq 5 \%$ , што дазволіла павысіць іх цвёрдасць на 15–100 % і зносаўстойлівасць у 1,4–1,8 раза ў параўнанні з аналагамі.

Распрацаваны тэхналагічныя працэсы атрымання механічна легіраваных парашкоў і плазменнага напылення пакрыццяў з іх.

**Ступень выкарыстання.** Вынікі даследаванняў апрабаваны на 11 прадпрыемствах і арганізацыях Рэспублікі Беларусь і Расійскай Федэрацыі. Агульная сума гаспадарчых дагавораў склала больш за 127 тыс. даляраў ЗША.

**Вобласць прымянення:** машынабудаванне.

## РЕЗЮМЕ

**Федосенко Алексей Сергеевич**

### **Фазовый состав, структура и свойства износостойких плазменных покрытий из механически легированных порошков на основе железа, никеля и оксидной керамики**

**Ключевые слова:** реакционное механическое легирование, газотермическое напыление, плазменные покрытия, износостойкость, прочность сцепления.

**Цель работы:** установить закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств износостойких плазменных покрытий из механически легированных композиционных порошков на основе железа, никеля и оксидной керамики, а также разработать и освоить технологические процессы получения механически легированных порошков и плазменных покрытий из них.

**Методы исследования:** сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ, рентгеновский фазовый анализ, дифференциальный термический анализ, испытание на износостойкость.

**Полученные результаты.** Определены условия обработки шихты в механореакторе:  $a_n = 135 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ;  $\varepsilon = 75 \%$ ;  $k = 12$ ;  $t_{\text{кам.}} < 320 \text{ К}$ , обеспечивающие получение механически легированных порошков для плазменных покрытий со средним размером частиц не более 100 мкм, имеющих гомогенное на субмикрорекристаллическом уровне распределение компонентов, пористость  $\leq 5 \%$  и близкую к сферической форму. Установлено, что синтезированные порошки являются термодинамически неравновесными термореагирующими композициями с субмикрорекристаллическим типом структуры основы с размером зерен  $\leq 100 \text{ нм}$ , разделенных на блоки величиной  $\leq 20 \text{ нм}$ , отжиг порошков при температурах 570–870 К сопровождается повышением их твердости на 20–80 %. Определены оптимальные составы, время механосинтеза, а также технологические параметры процесса напыления, обеспечившие получение комплексно упрочненных ультрадисперсными включениями интерметаллидов, оксидов и карбидов плазменных покрытий с пористостью  $\leq 5 \%$ , что позволило повысить их твердость на 15–100 % и износостойкость в 1,4–1,8 раза по сравнению с аналогами.

Разработаны технологические процессы получения механически легированных порошков и плазменного напыления покрытий из них.

**Степень использования.** Результаты исследований апробированы на 11 предприятиях и организациях Республики Беларусь и Российской Федерации. Общая сумма хозяйственных договоров составила более 127 тыс. долл. США.

**Область применения:** машиностроение.

## SUMMARY

**Fedosenko Aleksei Sergeevich**

### **Phase Composition, Structure and Properties of Wear-Resistant Plasma Coatings from Mechanically Alloyed Powders Based on Iron, Nickel and Oxide Ceramics**

**Key words:** reactive mechanical alloying, thermal spraying, plasma coatings, wear resistance, adhesion strength.

**Objective:** to establish regularities of formation of phase composition, structure and properties of wear-resistant plasma coatings from mechanically alloyed composite powders based on iron, nickel and oxide ceramics; to develop and implement technological processes of obtaining mechanically alloyed powders and plasma coatings from them.

**Methods of research:** scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray spectroscopy, X-ray phase analysis, differential thermal analysis, wear test.

**The results obtained.** The conditions for treatment of charge materials in the mechano-reactor are determined:  $a_H = 135 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;  $\varepsilon = 75 \%$ ;  $k = 12$ ;  $t_{\text{cam}} < 320 \text{ K}$ , these conditions ensure the production of mechanically alloyed powders for plasma coatings with an average particle size of not more than  $100 \mu\text{m}$  having a homogeneous distribution of components at the submicrocrystalline level, with porosity of less than  $5 \%$  and the shape being close to sphere. It has been established that the synthesized powders are thermodynamically nonequilibrium heat-reactive compositions with a submicrocrystalline structure of the base with grain size of  $\leq 100 \text{ nm}$  divided into blocks of  $\leq 20 \text{ nm}$ ; the process of annealing powders at temperatures of  $570\text{--}870 \text{ K}$  is accompanied by an increase in their hardness by  $20\text{--}80 \%$ . Optimal compositions, the time required to perform mechanosynthesis and technological parameters of the spraying process have been determined which ensure the production of hardened ultradispersed inclusions of intermetallic compounds, oxides and carbides of plasma coatings with porosity of  $\leq 5 \%$ , which made it possible to get an increase in their hardness by  $15\text{--}100 \%$  and wear resistance by  $1,4\text{--}1,8$  times in comparison with existing analogues.

Technological processes of obtaining mechanically alloyed powders and plasma spraying to produce coatings from them have been developed.

**Extent of application.** The research findings have been tested at 11 enterprises and organizations of the Republic of Belarus and the Russian Federation. The total value of economic contracts amounted to more than 127 thousand US dollars.

**Scope:** mechanical engineering.

**ФЕДОСЕНКО**  
Алексей Сергеевич

**ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ  
ИЗ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ  
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, НИКЕЛЯ И ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)