

УДК 621.793.74: 621.793.02  
ГРНТИ 55.09.43

На правах рукописи



**БОБКОВА Татьяна Игоревна**

**РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСО-  
СТОЙКИХ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ НАНОСТРУКТУРИРО-  
ВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ**

Специальность: 05.16.09-  
материаловедение (машиностроение)

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

Санкт-Петербург-2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук,  
доцент

**Фармаковский Борис Владимирович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор, Национальный исследова-  
тельский технологический университет  
«МИСиС», ведущий научный сотрудник

**Глезер Александр Маркович**

доктор технических наук, Санкт-Петер-  
бургский политехнический университет  
Петра Великого, профессор кафедры тех-  
нологии и исследования материалов

**Толочко Олег Викторович**

**Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
"Санкт-Петербургский горный университет"**

Защита состоится «27» сентября 2017 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии центральном научно-исследовательском институте конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 191015 г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, дом 49, ауд. 312.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте <http://dissovet.crismprometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=17>

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2017г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д411.006.01

Заслуженный деятель науки РФ

доктор технических наук, профессор

Малышевский В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В мировой практике широко используют технологии, основанные на изготовлении изделия из недорогого, хорошо обрабатываемого материала и последующего нанесения на него покрытия для обеспечения требуемых поверхностных свойств (твердости, износостойкости). Также весьма актуальным является нанесение покрытия для ремонта и восстановления работоспособности изношенных узлов трения машин, судопроводной арматуры и поверхностей аппаратов химических производств. Нанесение покрытий с помощью газотермических методов позволяет формировать покрытия с высокой адгезией (выше 60 МПа), но относительно невысокой твердостью (250-300 HV), либо с высокой твердостью (500-600 HV) и низкой адгезией (менее 35 МПа), из-за различия коэффициентов термического расширения материалов подложки (сплавы железа, алюминия, титана, меди) и напыляемого твердого керамического покрытия (оксидного, боридного, карбидного). В машиностроительной отрасли ведутся работы по минимизированию разницы между коэффициентами термического расширения за счет применения в качестве напыляемого материала механических смесей их матричных порошков, схожих по составу с материалом подложки, и армирующих компонентов (микронные порошки фракции 5-40 мкм и нанопорошки (менее 100 нм) оксидов, карбидов, нитридов, карбонитридов). Данный подход позволяет получить слои с адгезией 50 МПа и твердостью до 450 HV. Проблема в нанесении таких покрытий заключается в невозможности контролируемого и равномерного распределения армирующего компонента в покрытии, вследствие чего образуются обширные зоны с пониженной твердостью, состоящие только из напыленных матричных порошков.

В диссертационной работе предложено решение проблемы за счет создания единой механической системы из микронного матричного порошка и армирующих тонкодисперсных и наночастиц твердых фаз (карбидов, оксидов, карбонитридов). Предложен и практически реализован метод закрепления армирующих частиц на матричном порошке за счет применения операции высокоскоростного механосинтеза, в ходе которого твердые наночастицы внедряются в пластичный матричный. Разработаны наноструктурированные композиционные порошки конгломериро-

ванного типа (по ГОСТ 28377-89), поверхностно армированной и объемно-легированной конфигурации. Для решения проблемы нанесения толстослойных покрытий с высокой микротвердостью (до 12 ГПа) и адгезией не ниже 50 МПа, предложен технологический подход формирования функционально-градиентных покрытий (ФГП) с послойным изменением свойств за счет комбинирования композиционных порошков для напыления различных составов и методов напыления.

Целью работы является разработка технологических приемов формирования износостойких градиентных покрытий на базе вновь созданных наноструктурированных композиционных порошковых материалов.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать комбинации матричных и наноразмерных армирующих компонентов для получения композиционных порошков, а также методы газотермического напыления износостойких градиентных покрытий на их основе.

2. Разработать композиционные порошки, получаемые с помощью механосинтеза на основе металлов и сплавов широкого промышленного применения, армированных наноразмерными и тонкодисперсными оксидами, карбидами, нитридами и карбонитридами металлов, обеспечивающие равномерное распределение армирующих компонент в напыляемом на их основе покрытии.

3. Разработать комплекс технологических приемов получения функциональных и функционально-градиентных износостойких покрытий с регулируемой микротвердостью с использованием методов микроплазменного и сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления.

4. Провести комплексное исследование структуры и свойств полученных покрытий (микротвердости, пористости, износостойкости, коррозионной стойкости) и выдать рекомендации по их практическому использованию.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Экспериментально установлено, что формирование композиционных порошков на основе матрицы титана, поверхностно-армированной нанопорошками карбида вольфрама и карбонитрида титана, применимых для напыления функциональных покрытий с равномерной по сечению микротвердостью до 12 ГПа, происходит при скоростных режимах механосинтеза 1400-2000 об/мин.

2. Предложен подход формирования функционально-градиентных покрытий из композиционных порошков на основе матриц титана и сплава железа, армированных нанопорошками карбида вольфрама, карбонитрида титана и нитрида титана, заключающийся в комбинировании микроплазменного и сверхзвукового «холодного» газодинамического методов, что обеспечивает получение покрытий с микротвердостью (до 12 ГПа), коррозионной стойкостью I класса «Совершенно стойкие» и массовой интенсивностью изнашивания  $1,36 \cdot 10^{-8}$  г/м.

3. Установлена на примере системы Ti/WC возможность повышения класса коррозионной стойкости покрытия (с III «Стойкие» до I «Совершенно стойкие») при использовании для армирования плакированного титаном нанопорошка карбида вольфрама, с сохранением твердости, соизмеримой с твердостью покрытия, напыляемого из композиционного порошка титана, армированного нанопорошком карбида вольфрама (878 HV).

4. Впервые получен композиционный армированный порошковый материал на основе бронзовой матрицы и твердофазных включений оксида алюминия и нанопорошка карбида вольфрама для напыления износостойких покрытий на контактные поверхности судопроводной арматуры с ресурсом работы свыше 6000 циклов срабатывания (открытие-закрытие).

5. Впервые получен наноструктурированный конгломерированный порошок на основе системы Al/TiCN, позволяющий при напылении формировать покрытия с равномерной микротвердостью на уровне 14 ГПа и низкой пористостью (менее 1 %).

6. Впервые разработан сплав на основе системы «никель-хром», позволяющий получать порошковые композиции и функциональные покрытия на их основе с микротвердостью не ниже 4 ГПа, сохраняющие уровень своих свойств при температуре до 400 °С.

Объектами исследования являются композиционные наноструктурированные порошки для напыления; функциональные и функционально-градиентные покрытия, полученные напылением композиционных наноструктурированных порошков; функционально-градиентные покрытия, полученные оптимизированным способом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись современные методы исследования структуры и свойств материалов: оптическая и электронная микроскопия; сканирующая зондовая, совмещенная с атомно-силовой микроскопией, рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализы, лазерная дифракция, измерение удельной поверхности по методу БЭТ, методы анализа твердости и микротвердости, а также обработка экспериментальных данных с применением статистических методов анализа результатов на ЭВМ.

Достоверность результатов исследования, основных положений и выводов обеспечивается обоснованным выбором цели исследования, использованием аттестованного аналитического оборудования, воспроизводимостью полученных результатов, применением методов математической статистики для обработки данных, корреляцией результатов с другими исследователями. Достоверность определяется документальными свидетельствами внедрения готовых изделий с покрытиями в области судостроения, ремонта и восстановления реакторов химической промышленности, узлов трения и деталей машин.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Экспериментально установленные комбинации матричных порошков (Al, Ti, сплавов на основе Fe, Cu, Ni) микронных размеров и наноразмерных армирующих компонентов ( $Al_2O_3$ , WC, TiCN, TiN) и технологические режимы получения на их основе композиционных порошков с применением технологических операций высокоскоростного механосинтеза.

2. Технологические приемы получения на основе разработанных композиционных порошков функциональных и функционально-градиентных покрытий с регулируемой микротвердостью, высокой стойкостью к износу и коррозионному воздействию методами микроплазменного и сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления.

3. Рекомендации по практическому использованию разработанных функциональных и функционально-градиентных покрытий и реализация их применительно к изделиям судостроения, машиностроения и химической промышленности.

Личный вклад автора заключается в:

-обосновании и выборе составов матричных и наноразмерных армирующих компонентов для композиционных наноструктурированных порошков армированного и конгломерированного типов и технологий газотермического напыления функциональных покрытий на их основе;

-отработке технологических параметров (скорости, времени) механосинтеза композиционных порошков на основе бронзы, алюминия, титана, сплавов систем железо-хром-алюминий, алюминий-цинк, никель-хром, армированных наноразмерными и тонкодисперсными оксидами, карбидами, нитридами и карбонитридами металлов;

-разработке технологических операций получения функциональных и функционально-градиентных покрытий с регулируемой микротвердостью с использованием методов механосинтеза, плазмохимического синтеза, газотранспорта и гетерофазного переноса, а также оптимизация ведения процесса сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления;

-проведении комплексного исследования структуры и свойств полученных покрытий и выдаче рекомендации по их практическому использованию.

Диссертация является законченной научной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Основная роль в получении и обработке экспериментальных данных, а также при анализе и обобщении результатов принадлежит автору работы. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны наноструктурированные композиционные порошки с использованием метода высокоскоростного механосинтеза на основе бронзы марки БрАЖНМц 8.5-1.5-5-1.5, объемно-упрочненной частицами электрокорунда и наноразмерного карбида вольфрама (патент РФ № 2573309) для сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления покрытий с твердостью 602 HV.

2. Разработаны конгломерированные композиционные порошки из пластичной матрицы Al и наноразмерной армирующей компоненты TiCN для напыления

защитных покрытий с равномерной микротвердостью до 14,24 ГПа и высокой износостойкостью  $1,24 \cdot 10^{-8}$  г/м (патент РФ № 2568555)

3. Разработан способ получения функциональных покрытий с пониженной пористостью, повышенными показателями твердости и износостойкости при рабочих температурах до 400 °С на основе композиционных порошков и сплава на основе системы никель-хром с оптимизированным составом (патенты РФ № 2561627 и № 2551037).

4. Разработаны практические рекомендации по напылению композиционных покрытий и повышению коррозионной стойкости за счет применения плакированного нанопорошка карбида вольфрама в качестве армирующего компонента в титановой матрице применены для продления срока эксплуатации титанового реактора синтеза на базе ИХФ РАН.

5. Разработаны рекомендации по практическому использованию вновь созданных композиционных порошков и покрытий на их основе, с использованием которых были созданы роботизированные участки ведения восстановительных работ на узлах трения тяжелой строительной техники для ОАО «Специализированное управление №2» и ООО «ИТ Концепт».

6. Разработаны и оформлены технологические инструкции и руководящие документы на технологические процессы получения исходных композиционных порошковых материалов и нанесения функциональных покрытий на их основе (№35.343.05.13.ТИ, № 35.378.03.14.ТИ, № 35.378.02.14.ТИ, № РД5.УЕИА.3653-2014, части 1 и 2, № 35.343.02.13.ТИ).

7. Проведен анализ и выбор судовой арматуры, требующей нанесения износ- и коррозионностойких покрытий, изготовлены и испытаны образцы конструкционно-функциональных элементов на базе наноструктурированных композиционных покрытий на контактную кольцевую поверхность узлов трения затворов судовой трубопроводной арматуры для АО ЦТСС КБ «Армас».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: XI, XII, XIII, XIV конференциях молодых ученых и специалистов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.); международной научной конференции «Плазменные



технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы» (г. Казань, 2012г.); V-й Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО-2013» (г. Звенигород, 2013г); 2-й Всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием "ИННОВАЦИИ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ" (г. Москва, 2015 г.); XIII Российско-Китайском симпозиуме «Новые материалы и технологии», (г. Казань 2015г.); Научно-практической конференции «Современные полифункциональные композиционные материалы и покрытия на их основе» (г. Санкт-Петербург 2016 г.); 12-й Международной конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (г. Минск, Республика Беларусь 2016г.); Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (г. Санкт-Петербург 2016 г.).

Публикации по теме диссертации. Самостоятельно и в соавторстве по теме диссертации опубликовано 27 работ, из них 8 работ в журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых базой данных SCOPUS, получено 4 патента РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация имеет объём 186 страниц, содержит 95 рисунков, 33 таблицы и 4 приложения; состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, содержащего 187 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы существующие виды покрытий, а также методы их нанесения. Подробно рассмотрено состояние исследований и разработок в области нанесения износостойких покрытий, а также пути повышения эксплуатационных характеристик за счет введения в покрытия наноразмерных армирующих компонент. Показано, что все больший интерес вызывают многокомпонентные наноструктурированные покрытия, обладающие высокими физико-механическими и коррозионными свойствами. Установлено, что для повышения твердости и износостойкости покрытия применяются тонкодисперсные (0,5-10 мкм) порошки и нанопорошки (менее 100 нм) оксидов, карбидов, боридов, карбонитридов.

Показано, что немаловажным является не только возможность достижения высоких свойств в напыляемом покрытии, но и обеспечение их равномерности распределения по всему объёму покрытия. За счет неравномерного распределения наноразмерного наполнителя по объёму матрицы, появляется разброс свойств готового изделия. Поэтому одной из проблем при разработке нанокompозитов является эффективное диспергирование и стабилизация наночастиц в матричном материале. Основываясь на данных о промышленном применении, установлено, что в качестве матричных материалов при создании композиционных наноструктурированных порошков для напыления целесообразно использовать порошки из алюминия, титана, сплавов типа Cu-Sn, Al-Sn, Ni-Cr, Fe-Cr-Al. Для минимизации температурного воздействия на наноструктуру напыляемого материала и исключения её проплавления и деградации, необходимо применять методы микроплазменного (МПН) и сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления (ХГДН). Выявлено, что стабильно высокие эксплуатационные свойства упрочненных деталей достигаются при благоприятном сочетании толщины упрочненного слоя и прочности основы. Максимальные значения по изгибным напряжениям пластинчатых образцов с покрытием получают при толщине слоя покрытия, равного 0,1 от толщины подложки. В тоже время контактные напряжения, которые характеризуются пределом контактной выносливости и противодействуют износу рабочих поверхностей, а также питингу и микропитингу, достигают максимальных значений при толщине упрочненного слоя более 0,25 от толщины подложки. Для высоконагруженных изделий, работающих при высоких контактных нагрузках и подвергающихся значительному износу, твердость упрочненного слоя не должна превышать твердость основы более, чем на 40 %. В связи с этим, перспективным направлением совершенствования изделий с покрытиями представляется разработка многофункциональных покрытий и ФГП из композиционных порошков, позволяющих наиболее полно учитывать сложные условия эксплуатации деталей и узлов судостроения, машиностроения и аппаратов химической промышленности.

Во второй главе дано описание использованных материалов, экспериментального, аналитического и технологического оборудования, приведены методики исследования.

Для создания композиционных наноструктурированных порошков использовались порошки сплава на основе железа марки ПВ-Х20Ю6ИТ, порошок титана марки ПТОМ-1, порошок бронзы марки БрАЖНМц 8.5-1.5-5-1.5, порошок гидрида титана производства ОАО «Полема» (г. Тула); порошок сплава на основе алюминия марки А-80-13 производства ДИМЕТ (г. Москва); нанопорошок алюминия производства ООО «Передовые порошковые технологии» (г. Томск); порошок диоксида кремния (Кварц) марки BL1032 производства BULL INDUSTRY CO., LIMITED (Китай); порошок карбида вольфрама с кобальтом марки ВК-15 производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (г. Кировоград, Свердловская обл.); порошок электрокорунда белого марки 25А производитель ОАО «РУСАЛ Бокситогорск» (г. Бокситогорск, Ленинградская обл.); нанопорошок оксида алюминия производства ООО «Нанокорунд» (г. Саров); плазмохимические нанопорошки карбида вольфрама, карбонитрида титана производства ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова. Для выплавки опытной партии сплава на основе системы никель-хром использовались никель марки Н2, хром марки Х99Н2, вольфрам марки ШВЧ, рений марки Ре-0, лигатуры  $Mn_2Si$ ,  $MnSn$ ,  $Ce-Y-La$  производитель ТК «Урал-металл» (г. Екатеринбург). Для напыления функциональных и функционально-градиентных покрытий применялись подложки из Ст3, ВТ 1-0, бронза марки БрАЖНМц9-4-4-1.

Для определения износостойкости покрытий использовались: «Машина для испытания материалов на трение 2168 УМТ», для измерения адгезии штифтовым методом- установка для испытаний на разрыв INSTRON ElectroPuls E1000.

Для исследований структуры использовались: оптический микроскоп Leica DM-2500, рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Advance, сканирующий электронный микроскоп VEGA 3 TESCAN.

Снятие поляризационных кривых для расчета коррозионной стойкости покрытий производилось с помощью потенциостата IPC-Pro M.

Для измерения удельной поверхности порошков использован анализатор низкотемпературной адсорбции азота TriStar 3020. Измерение дисперсности порошковых материалов производилось на лазерном дифракционном анализаторе Malvern Mastersizer 2000 и лазерном анализаторе размера наночастиц Malvern Zetasizer Nano. Исследование механических свойств проводилось на твердомере Zwick/ Roell ZHU 750 top и на сканирующем нанотвердомере «НаноСкан 3Д».

Для выплавки сплава на основе системы никель-хром использовалась индукционная печь типа УИП16-10-003. Для дробления слитка использовалась щековая дробилка ДЩ-4. Для измельчения и активации поверхности порошка использовался дезинтегратор Дези-15.

Для высокоскоростного механосинтеза композиционных порошков (армированных и конгломерированных) применялась атриторная установка ИВЧ-3. Для напыления покрытий применялись методы МПН и ХГДН на установках УГНП-2/2270 и Димет-403 с использованием роботизированного комплекса KAWASAKI FS003.

В третьей главе приведены результаты исследования специфических особенностей процесса механосинтеза композиционных порошков на основе матричных порошков сплава Fe-Cr-Al (фракция 50-90 мкм) и бронзы марки БрАЖНМц 8.5-1.5-5-1.5 (фракция 20-40 мкм), армированных тонкодисперсными (0,5-40 мкм) порошками карбида вольфрама и корунда, нанопорошками карбида вольфрама и корунда.

Установлено, что при скоростях обработки 1400-2000 об/мин в течение 6 минут формируются композиционные порошки с поверхностным армированием. В процессе высокоскоростного механосинтеза армирующие субмикро- и наночастицы под давлением коаксиально установленных рабочих органов (чашек) соударяются с матричными частицами микронного размера и частично (на глубину от 1/3 до 1/2 своего диаметра) внедряются в них. Внешний вид частиц поверхностно-армированных композиционных порошков приведен на рисунке 1.

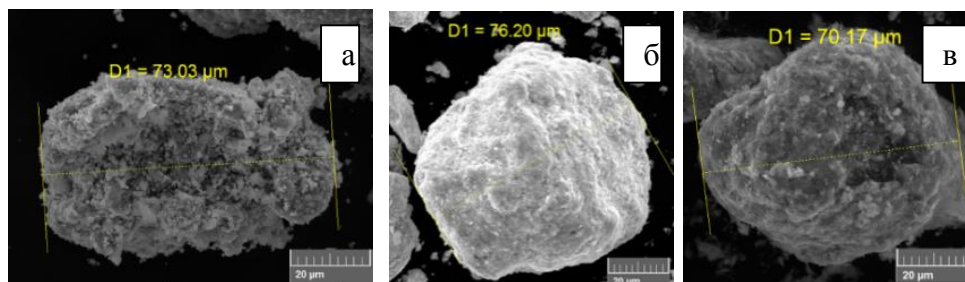


Рисунок 1. Изображение частиц композиционных порошков, полученных на основе порошка сплава системы Fe-Cr-Al, армированного 20% масс.: а- микронным (0,5-15 мкм) порошком WC ; б- нанопорошком WC (52 нм); в- нанопорошком Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (менее 100 нм).

В процессе механосинтеза произошло изменение гранулометрического состава композиционного порошка в сторону уменьшения среднего диаметра частиц композиционного порошка по сравнению со средним диаметром матричного по-

рошка, вероятно за счет пластической деформации матричного материала. Распределение частиц по размерам композиционного поверхностно-армированного порошка показано на рисунке 2. Установлено, что в композиционном порошке после механосинтеза отсутствует механически не связанные с матричным порошком частицы армирующей компоненты, об этом говорит характер гистограммы распределения размеров, на которой присутствует один пик. Средний диаметр композиционных частиц 58 мкм.

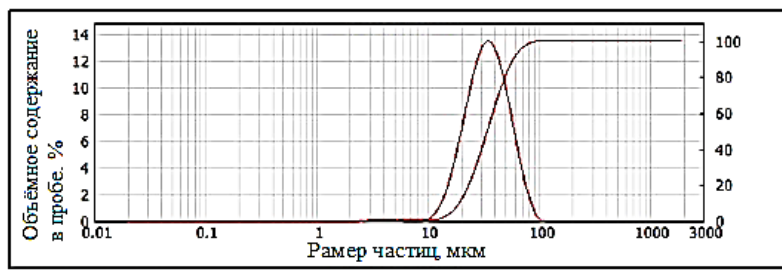


Рисунок 2. Распределение частиц по размерам для композиционного поверхностно-армированного порошка системы Fe-Cr-Al/нанопорошок WC.

Исследован процесс МПН композиционных порошков систем, приведенных на рисунке 1, на подложки Ст3. Композиционные порошки, полученные высокоскоростным механосинтезом, соответствуют требованиям по фракционному составу и пригодны к напылению непосредственно после синтеза. Установлено, что для напыления композиционных порошков пригоден режим напыления, характерный для МПН традиционного порошка системы Fe-Cr-Al, с уменьшением дистанции напыления с 7 см до 5,5 см, это позволяет сократить время пребывания композиционного порошка в плазменной струе и сохранить наноструктуру в покрытии без расплавления. Наноструктура покрытия, полученного напылением композиционного порошка системы Fe-Cr-Al/ наноWC приведена на рисунке 3. В областях скопления наночастиц (светлые точки на рисунке 3) наблюдается равномерное их распределение, что позволяет получить равномерную микротвердость.

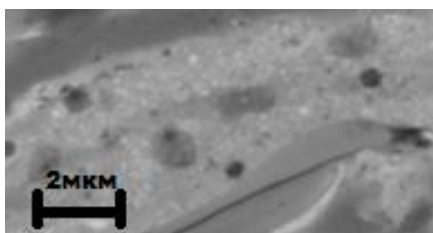


Рисунок 3. Наноструктура сформированная нанопорошком WC в покрытии, полученном микроплазменным напылением композиционного порошка системы Fe-Cr-Al/ нано WC.

Области скопления наночастиц образуют трехмерную сетку армирования в покрытии, формирующуюся в процессе напыления и деформации композиционных порошков, что повышает интегральную твердость. Проведены исследования микротвердости, твердости, пористости, адгезии, коррозионной стойкости покрытий. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследования свойств композиционных покрытий

Материал покрытия	Твердость покрытия, HV	Адгезия, МПа	Весовой износ, мг	Скорость коррозии, мм/год
Fe-Cr-Al	162	60	165	0,05
Fe-Cr-Al/микроWC	446	55	110	0,10
Fe-Cr-Al/наноWC	509	58	95	0,08
Fe-Cr-Al/наноAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	343	57	113	0,06

Установлено, что наиболее эффективным для повышения интегральной твердости покрытия при механосинтезе композиционного армированного порошка для напыления является введение нанопорошка WC.

Изучены особенности процесса механосинтеза композиционного порошка на основе бронзы марки БрАЖНМц 8.5-1.5-5-1.5, объемно-упрочненной частицами электрокорунда и наноразмерного карбида вольфрама. Внешний вид частицы и увеличенный фрагмент ее поперечного шлифа приведены на рисунке 4. Данные локального химического анализа показывают, что состав частицы: 14,9 % (масс.) карбида вольфрама, 5 % (масс.) корунда, остальное бронза. (спектр 2 рисунок 4 а), темные включения идентифицируются как корунд (спектр 1 рисунок 4а), спектр 2 рисунок 4б), светлые включения- частицы нанопорошка карбида вольфрама (спектры 1 и 3 рисунок 4б).

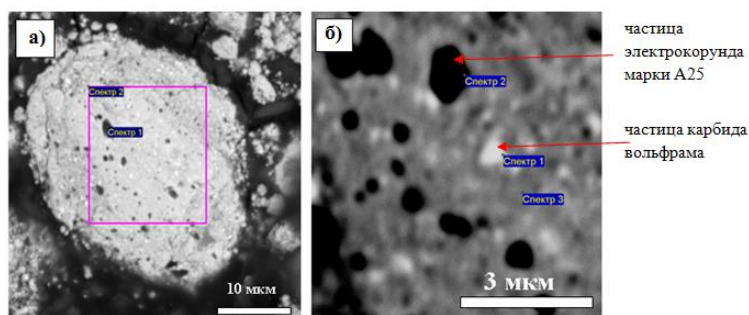


Рисунок 4. Изображение частицы композиционного порошка основе бронзы марки БрАЖНМц8.5-1.5-5-1.5, объемно-упрочненной частицами электрокорунда и наноразмерного карбида вольфрама –а); увеличенный фрагмент поперечного шлифа частицы –б)

Установлено, что для формирования композиционного объёмно-упрочнённого порошка указанной системы необходимо производить обработку в течение 30 мин, при скоростях вращения 1400-2000 об/мин (контроль режимов осуществляется с помощью компьютерной программы). Экспериментально установлено необходимое соотношение размеров компонентов и их содержание в смеси для механо-синтеза, для формирования композиционных порошков. Тонкодисперсный порошок оксида добавляется в количестве 5-10% масс. с размером частиц 20-40 мкм, при этом размер частиц матричного порошка выбирают из соотношения

$$D_1 = (0,5-1,0) D_2, \quad (1)$$

где  $D_1$  - размер частиц матричного порошка,

$D_2$  - размер частиц тонкодисперсного порошка.

Армирующий нанопорошок вводится в количестве до 50% к массе матричного и тонкодисперсного порошка. На приведенное выше техническое решение получен патент РФ № 2573309.

Исследован процесс ХГДН композиционного порошка на основе бронзы марки БрАЖНМц 8.5-1.5-5-1.5, объёмно-упрочнённой частицами электрокорунда и нанопорошка карбида вольфрама, и механических смесей аналогичного состава на подложки из бронзы марки БрАЖНМц9-4-4-1. Микроструктура покрытия, полученного напылением композиционного порошка, приведена на рисунке 5.

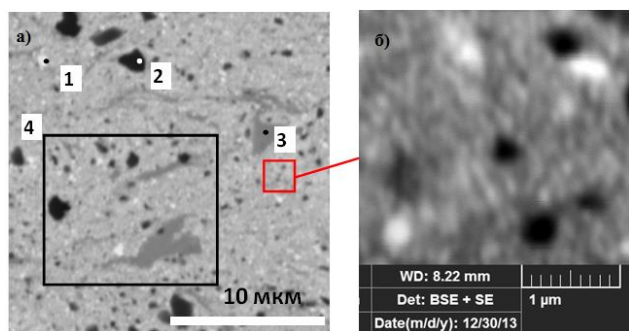


Рисунок 5. Микроструктура композиционного наноструктурированного покрытия на основе бронзы марки БрАЖНМц 8.5-1.5-5-1.5, объёмно-упрочнённого частицами электрокорунда и наноразмерного карбида вольфрама-а); наноструктура покрытия-б).

В структуре покрытия идентифицируются частицы корунда – точка 2 рисунок 5а); области скопления и сами наночастицы карбида вольфрама-точка 1 рисунок 5а); интерметаллид  $Al_4Cu_9$  точка 3 на рисунке 5а); отчетливо видно равномер-

ное распределение армирующих тонкодисперсных и наноразмерных частиц (черные и белые точки на рисунке 5 б соответственно), которое было создано на этапе механосинтеза и перенесено в покрытие без деградации за счет применения ХГДН.

Показано, что использование композиционного порошка для напыления позволяет снизить пористость покрытия с 4,9% до уровня 1,8% с одновременным повышением твердости с 449 HV до 602 HV, по сравнению с покрытиями на основе механических смесей аналогичного состава.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов по определению влияния содержания нанопорошка в композиционном порошке на свойства покрытий, напыляемых на их основе, с целью определения возможности расчета оптимального количества армирующей компоненты в смеси для механосинтеза.

Получены опытные партии композиционных порошков с различными количествами вводимых нанопорошков WC (72 нм) и TiCN (45 нм) в порошковую смесь для армирования матрицы Ti ( $\leq 40$  мкм) с помощью операции высокоскоростного механосинтеза. Экспериментально установлено, что для формирования поверхностно армированных композиционных порошков систем Ti/WC и Ti/TiCN необходимо производить механосинтез при скоростях вращения 1400-1600 об/мин в течение 9 минут. Предложено для определения оптимального количества наноразмерной компоненты в смеси для армирования использовать данные по площади удельной поверхности матричного порошка и эквивалентного диаметра армирующей компоненты. Используя данные допущения, оптимальное количество армирующей наноразмерной компоненты можно рассчитать по формуле (2):

$$\omega_H = \frac{4 * S_{уд.М}}{S_{уд.Н} + S_{уд.М}}, \quad (2)$$

где  $\omega_H$ - массовая доля нанопорошка в смеси с микронным, необходимого для армирования матричного порошка (для систем Ti/WC (14,5%) и Ti/TiCN (3,4%);

$S_{уд.М}$  и  $S_{уд.Н}$  - удельные площади поверхности матричного порошка микронного размера и наноразмерного порошка соответственно, измеренные на TriStar 3020, м<sup>2</sup>/г.

Проведены серии экспериментов по МПН покрытий на основе композиционных порошков систем Ti/WC и Ti/TiCN с количествами вводимого наноразмер-



ного компонента соответствующими рассчитанному по формуле 1, а также превышающими и пониженными. В таблице 2 приведены свойства покрытий системы Ti/TiCN.

Таблица 2. Зависимость свойств напыляемых покрытий от содержания армирующей компоненты в системе Ti/TiCN.

Номер партии	Доля нанопорошка, % масс.	Микротвердость покрытия, ГПа	Пористость покрытия, %	Интенсивность изнашивания, $10^{-8}$ г/м
1	0	3,04	9	4,63
2	2	9,46	4,3	1,49
3	3,4	12,00	2,9	1,36
4	5	11,47	3,1	1,77
5	10	11,14	3,8	2,04
6	20	8,67	4,3	2,31

Установлено, что наилучшим комплексом свойств обладают покрытия, полученные напылением поверхностно армированных порошков, полученных механосинтезом с добавлением оптимального- рассчитанного по формуле 2 количества армирующей компоненты. Это объясняется тем, что с превышением определенного количества нанопорошка, после механосинтеза в партиях композиционных порошков остаются агломераты наноразмерной фазы, механически несвязанной с матричным порошком (показано на рисунке 6).

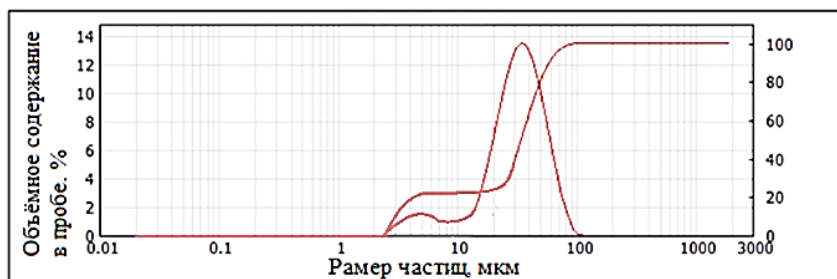


Рисунок 6. Распределение частиц по размерам для композиционного поверхностно-армированного порошка системы Ti/нанопорошок TiCN (№6 таблицы 2).

При напылении смесей композиционных порошков и не внедренных нанопорошков в покрытия обнаруживаются зоны скопления агломератов, снижается твердость, увеличивается пористость и снижается износостойкость. Тем самым подтверждено предположение о возможности расчета оптимального количества армирующего нанопорошка в смеси для механосинтеза на основе размерных данных матричного и армирующего компонентов.

Полученные данные по влиянию содержания нанопорошка карбида вольфрама в смеси для механосинтеза композиционного порошка системы Ti/WC, повторяют зависимость, выявленную на примере системы Ti/TiCN. Установлено, что для системы Ti/WC при оптимальном содержании нанопорошка в смеси для механосинтеза 14,5 % масс. (рассчитано по формуле 2) твердость покрытий равна 925,4 HV, пористость-3,5%. Типичная микроструктура покрытия напыленного МПН из композиционного порошка системы Ti/WC приведена на рисунке 7.

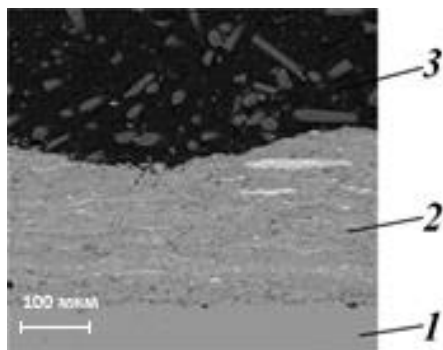


Рисунок 7. Поперечный шлиф покрытия, полученного микроплазменным напылением композиционного порошка системы Ti/WC, 1 – подложка VT 1-0, 2 – покрытие системы Ti/WC, 3 – токопроводящая смола

Из изображения на рисунке 7 видно, что в покрытии практически отсутствуют поры, само покрытие сплошное без отслоений и трещин. Экспериментально установлено, что введение нанопорошка карбида вольфрама в титановый порошок для повышения твердости приводит к снижению коррозионной стойкости напыляемых покрытий за счет проявления электрохимической коррозии. Выявленная зависимость приведена на рисунке 8.

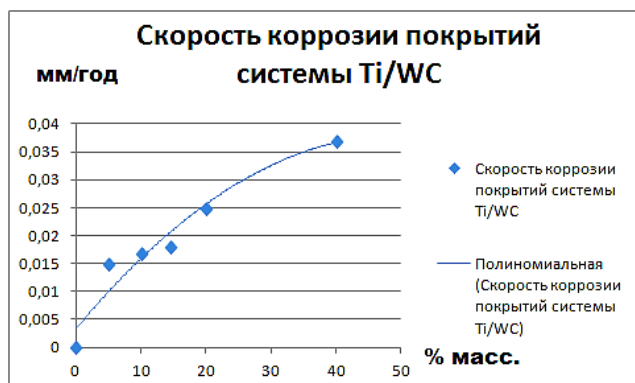


Рисунок 8. Зависимость скорости коррозии покрытий, полученных на базе армированных порошков, от содержания армирующей компоненты в исходной смеси системы Ti/WC.

С целью повышения коррозионной стойкости без значительного снижения твердости, предложено использовать принципиально новый вид армирующего материала- наноразмерный порошок карбида вольфрама, плакированный слоем титана, для изолирования контакта между карбидом вольфрама и электролитом.

Эксперименты по йодотранспортному плакированию проводились совместно СПбГТИ(ТУ). Для плакирования нанопорошка WC титаном были составлены порошковые смеси титана и нанопорошка карбида вольфрама с расчетной толщиной плакирующего слоя титана 4, 10 и 15 нм. Выявлено, что в результате йодотранспортного синтеза формируются агломераты нанопорошка карбида вольфрама, плакированного титаном. Внешний вид агломератов представлен на рисунке 9.

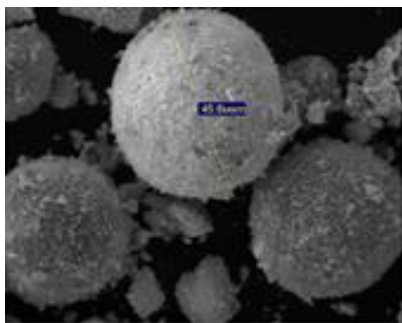


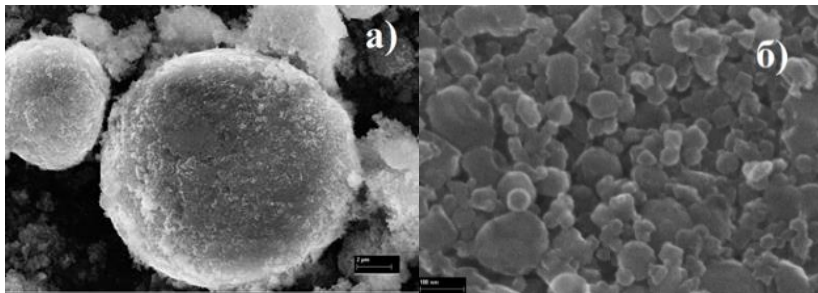
Рисунок 9. Изображения агломератов наночастиц, полученных плакированием Ti нанопорошка WC (толщина плакирующего слоя 10 нм).

Рентгенофазовый анализ показал содержание фаз карбида вольфрама (WC), карбида титана ( $TiC_{0,59}$ ) и твердого раствора вольфрама в титане ( $Ti_xW_{1-x}$ ), что говорит о полном переносе титана на поверхность нанопорошка карбида вольфрама. Синтезированный материал добавлялся в качестве армирующего при механосинтезе композиционного порошка системы Ti/(WC плакированный Ti) в количестве, определенном по формуле 2. Полученные композиционные порошки напылялись МПН на подложку VT1-0. Проведенные исследования показали, что применение плакированного нанопорошка WC позволяет повысить класс коррозионной стойкости покрытия (с III «Стойкие» до I «Совершенно стойкие») при незначительном снижении твердости (с 925 до 878 HV) по сравнению с покрытиями, полученными на основе порошков титана, армированных нанопорошком WC.

Предложен способ получения композиционного конгломерированного порошка из нанопорошков алюминия (90-100 нм) и карбонитрида титана (40-60 нм) для нанесения покрытий с равномерной твердостью и низкой пористостью. Способ

включает в себя диспергирование нанопорошка алюминия в среду изопропилового спирта посредством ультразвука, добавление в суспензию нанопорошка карбонитрида титана и сушку раствора с получением смеси для механосинтеза. Для формирования плотных композиционных частиц проводят операцию высокоскоростного механосинтеза при скоростях 1400-2000 об/мин в течение 30 минут.

Внешний вид композиционного порошка системы Al/TiCN приведен на рисунке 10. Результаты исследований показали, что для формирования частиц конгломерированного порошка необходимо, чтобы соотношение размеров наночастиц карбонитрида титана и алюминия было в пределах 1,0/(1,7-2,3). Только данный диапазон соотношения размеров обеспечивает формирование механических связей внедрения между алюминием и карбонитридом титана (показано на рисунке 10 б) и получение частиц конгломерированного порошка (рисунок 10 а), пригодных для напыления методом ХГДН.



*Рисунок 10. Внешний вид композиционных наноструктурных частиц а), радиальный шлиф частицы порошка б) составляющие кубической формы-наночастицы TiCN, круглой- Al.*

Проведена серия напылений композиционного порошка на основе системы Al/TiCN с помощью ХГДН. Установлено, что введение нанопорошка TiCN в смесь для механосинтеза в количестве 20-60 % масс. обеспечивает повышение микротвердости напыляемого покрытия с 4 до 14 ГПа, равномерной по всему сечению, при адгезии покрытия равной 54,2 МПа и пористости менее 1 %. способ получения наноструктурированного конгломерированного порошка получен патент РФ № 2568555.

В пятой главе приведены результаты экспериментов по формированию функционально-градиентных покрытий.

По технологии и на установке, разработанной в ИМЕТ РАН имени А.А. Байкова, получен нанопорошок нитрида титана для применения в качестве армирующей компоненты при формировании композиционных порошков на основе матриц

Fe-Cr-Al и Ti. Получены экспериментальные партии композиционных порошков для напыления из смесей с составами, указанными в таблице 3. Для формирования ФГП с помощью МПН послойно чередовались композиционные порошки на основе одной системы с целью получения наилучшей комбинации свойств (смеси 1,2,3 и 4,5,6 таблицы 3).

Таблица 3. Составы порошковых композиций для механосинтеза

№ смеси	Состав смесей						Время обработки, мин.	Метод напыления
	Матричный порошок		Армирующий нанопорошок		Армирующий тонкодисперсный порошок			
	Состав	%, масс	Состав	%, масс	Состав	%, масс		
1	Fe-Cr-Al	86,6	WC	13,4			5	МПН
2	Fe-Cr-Al	97,1	TiCN	2,9			5	МПН
3	Fe-Cr-Al	99	TiN	1			5	МПН
4	Ti	83,7	WC	16,3			3	МПН
5	Ti	96,1	TiCN	3,9			3	МПН
6	Ti	98,5	TiN	1,5			3	МПН
7	Al-Zn-Sn	45	TiCN	50	SiO <sub>2</sub>	5	30	ХГДН

Исследования микроструктуры поперечного шлифа ФГП показали, что микроструктура покрытия характеризуется плотным прилеганием к подложке- это обуславливает высокую адгезию, а плотный контакт слоев между собой обеспечивает высокую когезионную прочность.

Микроструктура сформированных ФГП приведена на рисунке 11.



Рисунок 11. изображения поперечных шлифов ФГП, полученных чередованием композиционных армированных порошков на основе матриц из Ti а) и сплава Fe-Cr-Al б).

Результаты исследований слоев ФГП приведены в сводной таблице 4. Введение нанопорошка нитрида титана в порошок для напыления поверхностного слоя улучшает коррозионную стойкость, за счет чего скорость коррозии в ФГП снижается до 0,001 мм/год, что соответствует 1 баллу и группе стойкости «Совершенно стойкий».

Таблица 4. Результаты исследования характеристик покрытий

№ п/п	Напыляемый материал	Микротвердость, ГПа	Пористость, %	Износостойкость, мг	Адгезия, МПа
1	FeCrAl*	1,44	6	165	60
2	Ti*	1,14	8,9	147	53
3	FeCrAl/WC	4,11	4,3	95	58
4	Ti/WC	8,97	5,2	113	50
5	FeCrAl/TiCN	6,07	3,9	90	57
6	Ti/TiCN	10,27	5	98	52
7	FeCrAl/TiN	4,36	4,0	94	58
8	Ti/TiN	9,06	4,9	105	56

\*- напыление покрытий чистого матричного порошка для базы сравнения.

Для получения толстослойных ФГП, что актуально при ремонте и восстановлении поверхностей со значительным износом и ремонте литейных дефектов, реализован способ комбинирования методов напыления. Способ заключается в нанесении адгезионного подслоя с помощью МПН напыления (строка 1 таблицы 4), нанесении когезионного (до нескольких мм) слоя методом ХГДН (состав 7 таблицы 3) и нанесении финишного слоя методом МПН (состав 5 таблицы 3). Металлографические исследования микроструктуры показывают, что покрытие, полученное по описанному выше способу, характеризуется плотным прилеганием к подложке, что обуславливает высокую адгезию, а плотный контакт слоев между собой обеспечивает высокую когезионную прочность. Результаты измерения градиента микротвердости приведены на рисунке 11.

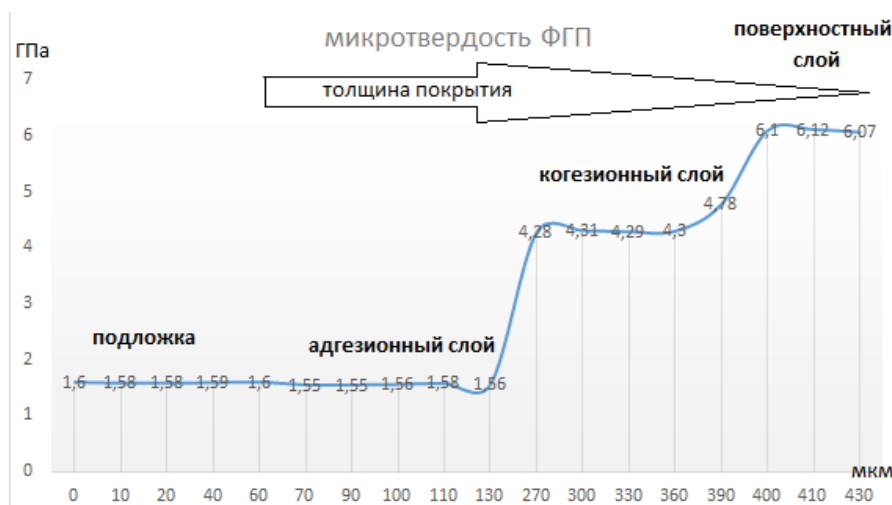


Рисунок 11. Градиент микротвердости в покрытии, нанесенном способом комбинирования методов МПН и ХГДН.

Микротвердость функционально-градиентного покрытия увеличивается от адгезионного подслоя к поверхностному.

Предложен новый состав сплава системы никель-хром, для получения порошков, применяемых для напыления защитных покрытий на изделия, подвергающиеся в процессе эксплуатации сложному температурно-силовому воздействию (узлы трения с возможностью экстренного торможения). Выплавка предложенного сплава осуществляется с помощью установки типа УИП16-10-003 в алуновом тиглях N4. Последовательность введения компонентов следующая: Ni→ Cr→ (Mn<sub>2</sub>Si)→> (Mn<sub>2</sub>Sn)→ W→ Re→ (Ce-La-Y). Оптимальный состав сплава, мас. % Cr - 18,0; Mn - 10,5; Sn - 3,0; Si - 1,5; W - 2,5; Re - 1,8; Ce - 0,6; La - 0,5; Y - 0,7; Ni – остальное. (На предложенный состав сплава получен Патент РФ). После получения слитка производилось его дробление до гранул фракции 5-7 мм с помощью щековой дробилки типа ДЩ-4, а гранулы в свою очередь измельчались до фракции 40-60 мкм на дезинтеграторе типа Дези-15 в среде аргона при скоростях вращения роторов 12000 об/мин. В процессе дезинтеграторной обработки происходит измельчение порошка и активация его поверхности. Микротвердость покрытий, напыляемых на основе полученного порошка, составляет 4,2 ГПа. Для напыления покрытий с регулируемой микротвердостью на основе предложенного сплава оптимизирован метод ХГДН. Оптимизация заключается в подаче реакционного газа (кислорода) в транспортирующий газ аргон и увеличение его содержания до 16% об. В результате происходит частичное окисление активированной поверхности порошка с образованием на поверхности включений оксида хрома. Происходит увеличение содержания оксида хрома в покрытии и создается градиент микротвердости с 4,2 ГПа до 7,5 ГПа на поверхности. Пористость покрытий не превышает 0,9 %, интенсивность изнашивания 0, 63\*10<sup>-8</sup> г/м. Проведенные испытания на коррозионную стойкость позволяют охарактеризовать покрытия, как относящиеся к классу II «Весьма стойкий». Испытания на термоциклическую усталость показали работоспособность покрытия в области температур от -40 до 400 °С.

В шестой главе приведены примеры практической реализации результатов диссертационного исследования. Для АО «ЦТСС» КБ «Армас» был проведен анализ и выбор судовой арматуры, требующей нанесения износостойких и коррозионностойких покрытий (седло корпуса и тарелка клапанов 528-3М.129, 521-35.3282 и 521-

03.516) и изготовление опытных образцов конструкционно-функциональных элементов методом ХГДН композиционного порошка системы «БрАЖНМц 8,5-1,5-5-1,5/(электрокорунд+нанорамерный карбид вольфрама)». Исследования показали, что покрытия обеспечивают ресурс работы узлов запорных клапанов не менее 6000 циклов открытия – закрытия, сохраняя герметичность после воздействия виброударных нагрузок, осевая нагрузка которых при наработке цикличности составляла до  $780 \pm 20$  кгс.

Разработаны рекомендации для ИХФ РАН по нанесению покрытий с повышенной коррозионной стойкостью на основе системы Ti/(нанопорошок WC, плакированный Ti) для оценки возможности продления срока эксплуатации титанового реактора синтеза, входящего в состав опытной установки производства полиэфирэфиркетона, выполненного из ВТ 1-0. Толщина наносимого покрытия 200-400 мкм, твердость 864 HV, скорость коррозии 0,001 мм/год.

Разработаны рекомендации по практическому использованию композиционных наноструктурированных порошков для нанесения ФГП для восстановления изношенных деталей и узлов для ООО «ИТ «Концепт» и ОАО СУ №2. Внедрение данных рекомендаций на ремонтно-восстановительном участке открыло возможность восстановления строительных машин и механизмов в полевых условиях.

На разработанные процессы оформлена регламентирующая документация «Технологическая инструкция на технологию получения конгломерированных порошковых материалов с использованием метода грануляции нанопорошков» №35.378.03.14.ТИ от 25.06.2014г; «Технологическая инструкция на компьютеризированную технологию получения композиционных армированных порошковых материалов» №35.378.02.14.ТИ от 25.06.2014 г.; «Технологическая инструкция на технологию нанесения наноструктурированных антикоррозионных покрытий методами сверхзвукового гетерофазного переноса (ХГДН) и микроплазменного напыления для работы в экстремальных условиях эксплуатации» №35.343.02.13.ТИ от 01.07.2013 г.; «Технологическая инструкция на перспективный метод механосинтеза для получения химически активных композиций системы металл-карбид для нанесения покрытий» № 35.343.05.13.ТИ от 01.07.2013; «Роботизированная технология получения функционально-градиентных покрытий



с использованием сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления» (№ РД5.УЕИА.3653-2014 части 2 и 1).

Основные результаты и выводы.

1. На основании анализа научно-технической и патентной литературы обоснован выбор состава матричных и наноразмерных армирующих компонентов для получения композиционных порошков и технологии получения на их основе функциональных покрытий методами газотермического напыления.

2. Установлены технологические режимы механосинтеза композиционных порошков на основе металлов и сплавов широкого промышленного применения, армированных наноразмерными и тонкодисперсными оксидами, карбидами, нитридами и карбонитридами металлов. Разработаны технологические инструкции на процессы получения композиционных порошков.

3. Выявлено влияние состава и структуры композиционных порошков на физико-механические и коррозионные свойства получаемых покрытий. На примере системы Ti/ TiCN показано, что микроплазменное и сверхзвуковое «холодное» газодинамическое напыления позволяют сохранить наноструктуру исходного порошка, снижая при этом пористость в покрытии с 9 % до 2,9% и повышая микротвердость с 3,4 ГПа до 12 ГПа по сравнению с напылением традиционного титанового порошка.

4. Установлена возможность повышения коррозионной стойкости композиционных покрытий на основе титановой матрицы за счет применения в качестве армирующих компонент плакированного титаном нанопорошка карбида вольфрама.

5. Предложен и впервые получен композиционный армированный порошок на основе пластичной бронзовой матрицы и твердофазных включений тонкодисперсного порошка электрокорунда и наноразмерного порошка карбида вольфрама. Оформлен патент Российской Федерации.

6. Предложен и впервые получен композиционный наноструктурированный порошковый материал на основе нанопорошков алюминия и карбонитрида титана с низкой пористостью гранул, что позволяет напылять на его основе покрытия с равномерной микротвердостью на уровне 14 ГПа и пористостью ниже 1%. Оформлен патент Российской Федерации.

7. Оптимизирован состав сплава на основе системы Ni-Cr для получения матричного порошка для сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления

покрытий с рабочими температурами до 400 °С, что необходимо для использования в узлах трения с возможным экстренным торможением. Оформлен патент Российской Федерации.

8. Предложен и впервые опробован способ сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления с применением смеси реакционного и инертного газов для получения композиционных частиц на основе сплава Ni-Cr с образующимися на поверхности  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , что позволяет повысить микротвердость напыляемого покрытия до 7,5 ГПа. Оформлен патент Российской Федерации.

9. Показана возможность формирования функциональных и функционально-градиентных износостойких покрытий с регулируемой микротвердостью с использованием методов газотранспортного и гетерофазного переноса. Разработаны руководящие документы на компьютеризированные технологии напыления функциональных покрытий.

10. Предложен комбинированный метод нанесения покрытий, сочетающий МПН и ХГДН, рекомендуемый для получения толстых (до нескольких десятков мм) функциональных покрытий и проведения ремонтно-восстановительных работ.

11. Проведено комплексное исследование структуры и свойств полученных композиционных покрытий и даны рекомендации по их практическому использованию.

12. Показаны конкретные примеры практической реализации результатов работы в изделиях машиностроения в соответствии с разработанными руководящими документами и технологическими инструкциями.

#### Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Бобкова Т.И., Деев А.А., Быстров Р.Ю., Фармаковский Б.В. «Нанесение износостойких покрытий с регулируемой твердостью с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления»/ «Металлообработка», 2012, №5\_6, стр.45-49.

2. Бобкова Т.И., Фармаковский Б.В., Богданов С.П. «Создание композиционных наноструктурированных поверхностно-армированных порошковых материалов на основе систем Ti/WC и Ti/TiCN для напыления покрытий повышенной твердости»/ «Вопросы материаловедения» №3(83),2015 с.80-90.

3. Бобкова Т.И. «Разработка прецизионных сплавов и технологий формирования износостойких градиентных покрытий- основа создания изделий, работающих в экстремальных условиях»/«Изобретательство», Международный институт промышленной собственности (Москва), №7, 2016, с.11-15.

4. Кузнецов П.А., Голосиенко С.А., Деев А.А., Бобкова Т.И., Чернобаев С.П., Пичужкин С.А., и др. всего 15 чел. «Применение наноматериалов для рабочих органов почвообрабатывающих машин»/ «Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук» 2013. № 3. С. 75-76.

5. Бобкова Т.И., Быстров Р.Ю., Фармаковский Б.В., Асташов А.Г., Синайский М.А. «Плазмохимический синтез наноразмерных порошков оксида алюминия и их использование в качестве армирующей компоненты при микроплазменном напылении покрытий»/ «Вопросы материаловедения», 1(77),2014г., стр.73-79.

6. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сидоров С.А., Бобкова Т.И., Кузнецов П.А., Голосиенко С.А, и др. всего 15 чел. «К вопросу применения новых наноматериалов для рабочих органов почвообрабатывающих машин»/ «Сборник научных докладов ВИМ». 2012. Т. 1. С. 229-234.

7. Климов В.Н., Ковалева А.А., Бобкова Т.И., Деев А.А., Черныш А.А., Юрков М.А. «Структура и свойства функционального бронзового покрытия, полученного газодинамическим и микроплазменным напылением»/ «Вопросы материаловедения» №2(86),2016 с.57-68.

8. Геращенко Д.А., Бобкова Т.И., Фармаковский Б.В., Климов В.Н. «Особенности формирования износостойких покрытий из порошков, полученных с помощью микрометаллургического процесса высокоскоростной закалки расплава»/ «Металлург», №10 октябрь 2016, с. 91-97.

Публикации в журналах, индексируемых базой SCOPUS:

1. Bobkova T.I., Bystrov R.Yu., Farmakovskii B.V., Astashov A.G., Sinaisky M.A. Plasma Chemical Synthesis of Aluminum Oxide Nanopowders and Their Use as Reinforcing Components in Microplasma Sputtering of Coatings / «Inorganic Materials: Applied Research», 2015, Vol. 6, No. 6, pp. 591–594.

2. Bobkova T.I., Farmakovskii B.V., Bogdanov S.P. Creation of Composite Nanostructured Surface-Reinforced Powder Materials Based on Ti/WC and Ti/TiCN

Used for Coatings with Enhanced Hardness/ «Inorganic Materials: Applied Research» 2016, Vol. 7, No. 6, pp. 855–862.

Патенты:

1. Бобкова Т.И., Юрков М.А., Черныш А.А., Елисеев А.А., Деев А.А., Климов В. Н., Самodelкин Е.А. «Способ получения композиционного армированного порошкового материала»/Патент РФ №2573309 от 08.07.2014 опубл. 20.01.2016 бюлл. №2.

2. Бобкова Т.И., Юрков М.А., Черныш А.А., Елисеев А.А., Деев А.А., Климов В.Н. «Способ получения наноструктурированного конгломерированного порошкового материала для нанесения покрытий методами газодинамического и газотермического напыления»/ Патент РФ № 2568555 от 08.07.2014 опубл. 20.11.2015 бюлл. №32.

3. Бобкова Т.И., Прудников И.С., Васильев А.Ф., Фармаковская А.Я., Фармаковский Б.В. «Способ получения износо-коррозионностойкого градиентного покрытия»/ Патент РФ № 2551037 от 03.09.2013г. опубл. 20.05.2016 бюлл. №14.

4. Васильев А.Ф., Фармаковский Б.В., Бобкова Т.И., Кузнецов П.А., Юрков М.А., Фармаковская А.Я., Низкая А.В., Ешметьева Е.Н., Масайло Д.В. «Сплав на основе системы никель-хром»/ Патент РФ № 2561627 от 08.07.2014г опубл. 27.08.2015 бюлл. №24.

Подписано в печать 28 июня 2017г.

Формат 60 × 48 1/16. Печать офсетная. Усл. п.л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 90 экз. Заказ № 2/110

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» 191015, г.

Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49

Лицензия на издательскую деятельность Лр № 020644 от 13 октября 1997 г.