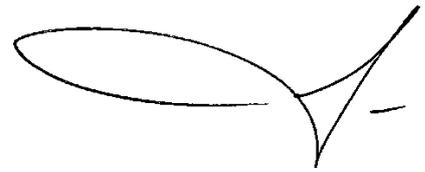


На правах рукописи



ТАТАРКИН МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОГО
НАПЫЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ
ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова (АлтГТУ)».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Ситников Александр Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Радченко Михаил Васильевич, ФГБОУ
«Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова», зав. кафедрой

кандидат технических наук, с. н. с.
Пинаев Владимир Георгиевич, ЗАО
«Барнаульский котельный завод», главный
сварщик

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный
технический университет» (НГТУ), г. Новоси-
бирск

Защита состоится 17 мая 2012 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел. (факс) 8 (3852) 29-07-64, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Автореферат разослан «17» апреля 2012 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ю.О.Шевцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы

Современное машиностроение требует создания новых композиционных материалов, обеспечивающих стойкость различных деталей машин и оборудования к постоянно возрастающим нагрузкам и основывающихся на современных знаниях о роли и трансформации упрочняющей структуры в повышении износостойкости.

Одним из возможных путей в решении задач управления структурой композита является применение новых методов в синтезе композиционных материалов, например методов высокотемпературного синтеза (СВС). Как показывает опыт синтеза износостойких материалов, практически важный - прорывной результат может быть достигнут при комбинации материалов и методов в использовании быстропротекающих и высокоэнергетических воздействий на порошковые материалы. Таким является предварительная механоактивационная обработка (МА) реакционноспособных порошковых смесей для СВС в планетарных шаровых мельницах. Проведение реакций высокотемпературного синтеза с использованием механоактивационной обработки реагентов совместно с металлической матрицей обеспечивает возможность получения нового класса порошковых композитов, состоящих из субмелкодисперсных частиц синтезированного продукта при равномерном распределении их в объеме матрицы.

В исследованиях, посвященных получению износостойких покрытий из твердых сплавов, как правило приводятся результаты получаемые с использованием какой-то одной марки материала или единственного способа получения покрытия, и это ограничивает возможные области применения перспективных износостойких материалов. В данной работе исследованы структуры и свойства защитных износостойких покрытий из СВС-композитов (карбид титана- сталь), полученных методами детонационного напыления (ДГН) и электродуговой наплавки (ЭДН) для различного содержания упрочняющей фазы, осуществлен выбор содержания карбидной фазы композиционного материала для этих процессов и предлагаются практические рекомендации по получению износостойких покрытий из материалов и их использованию.

Актуальность диссертационной работы подтверждается и тем, что она выполнялась в рамках федеральной целевой научно-технической программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (ГК № 02.740.11.0828).

Цель работы

Определить технологические возможности нанесения износостойких покрытий из композиционных СВС-механокомпозитов методами детонационно-газового напыления и электродуговой наплавки, исследовать структуру и свойства полученных покрытий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучить фазовый состав и структуру композиционных смесей после предварительной механоактивационной обработки порошковой смеси «сталь-

титан-углерод», а также после проведения реакции высокотемпературного синтеза

2. Исследовать структуру и фазовый состав композиционных покрытий, полученных способом детонационного напыления и электродуговой наплавки в зависимости от содержания TiC.

3. Провести исследование влияния состава композиционного материала и способа получения покрытий на его износостойкость.

4. Обосновать выбор наиболее эффективных составов композиционных покрытий для ЭДН и ДГН износостойких покрытий.

5. Разработать комплекс моделей для описания геометрических параметров поверхностей деталей с покрытиями и наплавкой на отдельных этапах их жизненного цикла.

6. Провести промышленную апробацию результатов исследований.

Методы исследования. Работа выполнена с применением современного оборудования и методик: рентгеноструктурного анализа, металлографического анализа и электронной микроскопии, методов определения механических свойств, а также трибологических испытаний, методов математической обработки экспериментальных данных и моделирования с применением ЭВМ.

Достоверность проведенных исследований, выводов и рекомендаций, полученных в работе, подтверждается согласованностью данных, обоснованностью выводов, подтверждается достаточным количеством экспериментального материала и апробацией полученных результатов.

Научная новизна.

1. Разработана технология получения композиционного материала для нанесения износостойких покрытий методами детонационно-газового и напыления и электродуговой наплавки, включающая две стадии:

- первая - механическая активация порошковой смеси состоящей из реагентов для синтеза карбидной фазы и металлической матрицы, и проведение реакции высокотемпературного синтеза;

- вторая - механическая активация - смешивание компонентов и доведение содержания металлической матрицы в смеси до требуемого значения;

- для обеспечения технологического процесса детонационно-газового напыления покрытия содержание металлической матрицы в порошковой смеси должно быть в пределах от 40 до 60 масс.%, для наплавки - от 60 до 90 масс.%;

2. Установлено, что в детонационно-газовых покрытиях из слоистых механокомпозитов наблюдается наследование морфологии, структуры и состава исходного материала механокомпозита. При электродуговой наплавке карбидное зерно трансформируется, и образуются зерна неправильной формы и нестехиометрического состава.

Практическая значимость.

Развитие методов получения износостойких покрытий, наряду с совершенствованием оборудования, должно идти по пути разработки технологии и применения новых перспективных материалов. Для эффективного решения этой задачи могут быть использованы предварительно механоактивированные композиционные СВС-материалы. Следует отметить, что способ СВС позволя-

ет в широких пределах управлять свойствами новых материалов изменением состава и содержания компонентов и синтезировать композиционные материалы с равномерным распределением упрочняющей фазы по объему матрицы. В рамках настоящей диссертационной работы были получены такие практические результаты:

1. Разработаны композиционные СВС- материалы состава «сталь Р6М5+(60% TiC)» и «NiCr- сталь +(60 % TiC)», предназначенные для упрочнения поверхностей деталей методами газотермического напыления (ДГН), связанных с абразивным износом с распределенными нагрузками.

2. Разработаны композиционные СВС- материалы состава «сталь Р6М5+(90%TiC)» и «NiCr- сталь +(90 % TiC)», предназначенные для упрочнения поверхностей деталей методами электродуговой наплавки (ЭДН), связанных с абразивным износом с высокими контактными нагрузками.

3. Получены стохастические модели и регрессионные зависимости, которые могут быть использованы при проектировании технологий, назначении размеров и допусков на детали, в расчетах межоперационных размеров и припусков, в экономических расчетах и при прогнозировании долговечности деталей.

4. Разработанные композиционные СВС- материалами применены для упрочнения рабочих поверхностей стрелчатых лап культиваторов и сеялок в ООО «Рубцовский завод запасных частей», что позволило увеличить ресурс их работы почти в 3 раза. Годовой экономический эффект для завода от внедрения способа наплавки лап композиционным СВС-материалом «сталь – карбид титана» в технологию их изготовления на всю программу выпуска продукции может оставить в ценах 2011 года 653669 рублей

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод получения композиционного материала для нанесения износостойких покрытий, состоящий из двух стадий.

2. Результаты экспериментальных исследований структуры и свойств покрытий, полученных из СВС-механокомпозитов нанесенных детонационно-газовым напылением и электродуговой наплавкой.

3. Технологические рекомендации по подготовке порошковых материалов и нанесения износостойких покрытий методами детонационно-газовым напылением и электродуговой наплавкой.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели, постановке задач теоретических и экспериментальных исследований и их практической реализации, проведении обобщения полученных результатов и формулировании выводов по теме диссертационного исследования.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на VII Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Барнаул- 2010), 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск – 2010), 1-й международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Бийск-2010), IX-th Israel-Russion Bi-national Workshop 2010, July

25-30, Belokurikha. – 2010. Результаты диссертации обсуждались на объединенных научно-технических семинарах кафедр «Малый бизнес в сварочном производстве» и «Сельскохозяйственное машиностроение» Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова.

Публикации Основные положения диссертации опубликованы в 8 печатных работах. В том числе 2 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 тезисов докладов.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 24 таблицы, список литературы из 158 наименований. Общий объем – 175 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выполненной диссертационной работы, приведена ее общая характеристика, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ современного состояния вопроса создания порошковых материалов на основе карбида, технологий нанесения износостойких покрытий. Сформулированы цель и задачи исследований.

Анализ литературных источников показал, что одной из главных задач в области наплавки является повышение качества формируемых покрытий путем создания новых материалов. В этой области хорошо зарекомендовали себя порошковые материалы, рост потребности которых обусловлен возможностью формирования напыленного и наплавленного металла с широким спектром механических свойств.

Работы по созданию порошковых проволок, разработке промышленной технологии производства ведутся в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Исследованием и разработкой порошковых проволок для сварки и наплавки различных сталей занимались известные ученые такие, как Фруммин И.И., Походня И.К., Шлепаков В.Н., Суптель А.Л., Марчук А.И., Орлов Л.И., Титаренко В.И., Супрун С.А., Мойсов Л.П. и другие. Ими были разработаны порошковые проволоки, применяемые в машиностроении, строительстве и других отраслях.

Применение новых материалов для нанесения покрытий позволяет значительно повысить качество наносимых слоев и их механические свойства. Для получения порошков используют металлы и их сплавы, твердые сплавы, оксиды металлов и композиционные порошки. Наибольшей износостойкостью обладают твердые сплавы на основе карбидов, одним из которых является карбид титана (TiC).

Карбид титана, характеризуется высокими значениями твердости, теплоустойчивости, малыми значениями коэффициента трения по большинству металлов и сравнительно низкой стоимостью, что позволяет его рассматривать как один из самых перспективных материалов для создания износостойких покрытий.

Известно, например, что металлокерамические сплавы на основе карбида

титана с металлической никель-хромовой связкой имеют износостойкость в 2-3 раза выше износостойкости твердых сплавов на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой и в 50 раз выше износостойкости инструментальных сплавов, легированных вольфрамом. В ряде работ доказано, что для повышения износостойкости ответственных тяжелонагруженных деталей методом электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) защитных покрытий в вакууме эффективно был использован композиционный материал на основе порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5 с добавками 15% карбида титана и 5% карбида вольфрама.

Существует необходимость в дальнейшем проведении исследований как в области традиционных технологий защитных и упрочняющих покрытий, например напылением и наплавкой СВС- композитов, так и физики высокотемпературного синтеза новых композиционных материалов, подверженных предварительной МА с различным содержанием упрочняющей фазы, например, твердых сплавов на основе стали и карбида титана для различных способов получения защитных покрытий.

Во второй главе дано описание экспериментального оборудования, комплекса для детонационного нанесения покрытий и оборудования для наплавки. Приведено описание использованных экспериментальных методик: исследований механоактивационной обработки реагентов порошковых смесей высокотемпературного синтеза в механоактивированных порошковых смесях; проведения металлографического, рентгенофазового анализа и электронной микроскопии, исследования физико-механических свойств детонационных покрытий и наплавленных слоев.

Для получения механоактивированных порошковых смесей применялся метод механической активации в планетарных шаровых мельницах АГО-2.

В проводимых экспериментах объем барабанов-160 см³-2 шт, диаметр шаров – 4-8 мм, масса шаров 200 г, ускорение $g=40$ ед. Время процесса механоактивации варьировалось в диапазоне от 2 до 20 минут.

Новые материалы получали по технологии СВС с использованием экзотермических смесей порошков титана марки ПМТ, (дисперсный состав 63-100 мкм), углерода марки ПМ-15 (дисперсный состав 10-50 мкм). В качестве металлической матрицы использовали порошок наплавочный ПР-Н70Х17С4Р4-3 (дисперсный состав 63-100 мкм) и порошок быстрорежущей стали Р6М5.

В качестве детонирующего состава газов применялась пропанобутановая – кислородная смесь. Расход рабочих газов составил при средней частоте выстрелов в 4 Гц не более: пропанобутановая смесь 2-3,5 м³/ч; кислород 10-12 м³/ч; сжатый воздух 10-15 м³/ч.

Наплавка образцов производилась ручным способом. В качестве источника тока для наплавки использовали переносной портативный сварочный выпрямитель инверторного типа ТИТАН-ВС-220А, а в качестве инструмента – специально изготовленные трубчатые электроды. Дуговую наплавку проводили в три прохода на подложку из стали 45 трубчатым порошковым электродом, содержащим: TiC+P6M5 (X % масс.) – СВС-механокомпозит; TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3 (X % масс.) – СВС-механокомпозит. Степень разбавления ме-

таллом матрицы составляла от 80 % до 20 % с шагом 10 %.

Исследование общей структуры производилось с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss AxioObserver A1m. Исследование тонкой структуры и фазового состава материалов производилось с помощью растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 с приставкой EDS X-ACT «OXFORD».

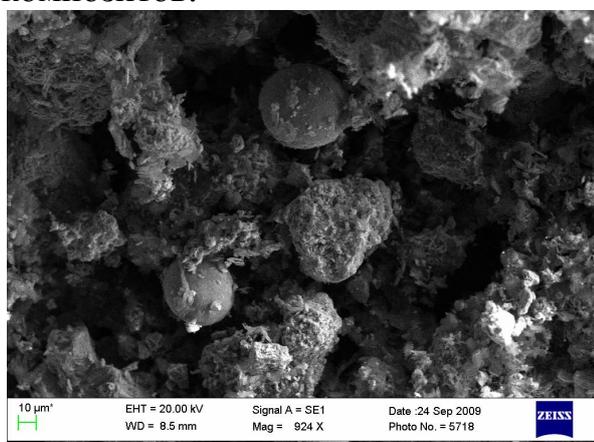
При исследовании общей структуры покрытий применялось химическое травление 3 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте, а при исследовании тонкой структуры покрытий применяли химическое травление в течение 5 мин. водным раствором 20 % красной кровяной соли $K_3[Fe(CN)_6]$ и 20 % KOH. Для определения общего характера внутреннего строения матрицы СВС-механокомпозитов микрошлифы подвергались электрохимическому травлению раствором 15 % хлорной кислоты в уксусной кислоте «ледянке» (время травления 30 с; источник постоянного тока, напряжение 3 В).

Микротвердость покрытий измерялась на твердомере марки ПМТ - 3 по ГОСТ 9450-76.

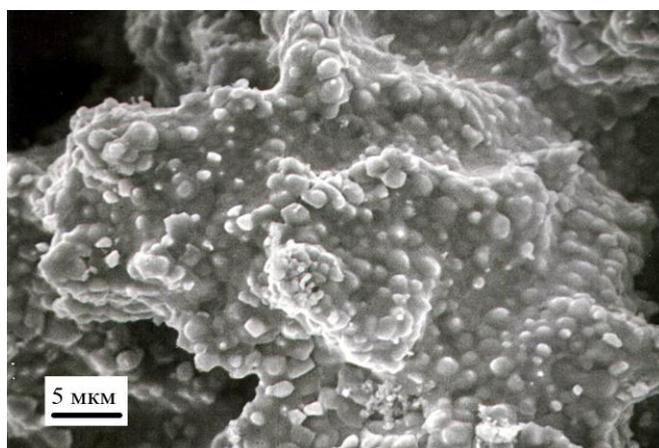
Износостойкость образцов исследовалась в соответствии с ГОСТ 23.204-78 на триботехническом комплексе, который включает в себя машину для испытания материалов на трение 2168 УМТ и управляющий компьютер. Испытания производились по схеме «диск-колодка» – при вращательном движении в режиме сухого трения. В экспериментах варьировали силу прижима колодки Р и окружную скорость V.

Третья глава посвящена исследованию особенностей подготовки материалов для нанесения износостойких покрытий, представлены результаты экспериментальных исследований структуры и свойств покрытий, нанесенных детонационно-газовым напылением и электродуговой наплавкой.

При механоактивационной обработке порошков в смеси начинается процесс образования агломератов, состоящих из частиц этих порошков (рисунок 1, а). С увеличением времени механоактивации происходит усреднение образующихся агломератов по размерам и составу, механическое измельчение и перемешивание. Дальнейшая обработка смеси приводит к образованию слоистых композитов.



а)



б)

Рисунок 1 - SEM-электронное изображение: а) исходного механокомпозита, б) продукта СВС

Проведение реакции высокотемпературного синтеза в механоактивированной смеси приводит к образованию упрочняющего карбидного зерна и равномерному распределению синтезированного продукта в объеме металлической матрицы (рисунок 1, б).

Снимки поверхности детонационного покрытия из СВС-механокомпозита различного содержания металлической матрицы (рисунок 2) позволяют судить о том, что имеется характерный развитый рельеф с проступающими на поверхности карбидными зёрнами. С увеличением содержания матрицы с 20 до 50% на поверхности наблюдается меньшая пористость и просматривается более равномерная по сплошности рельефа покрытия картина.

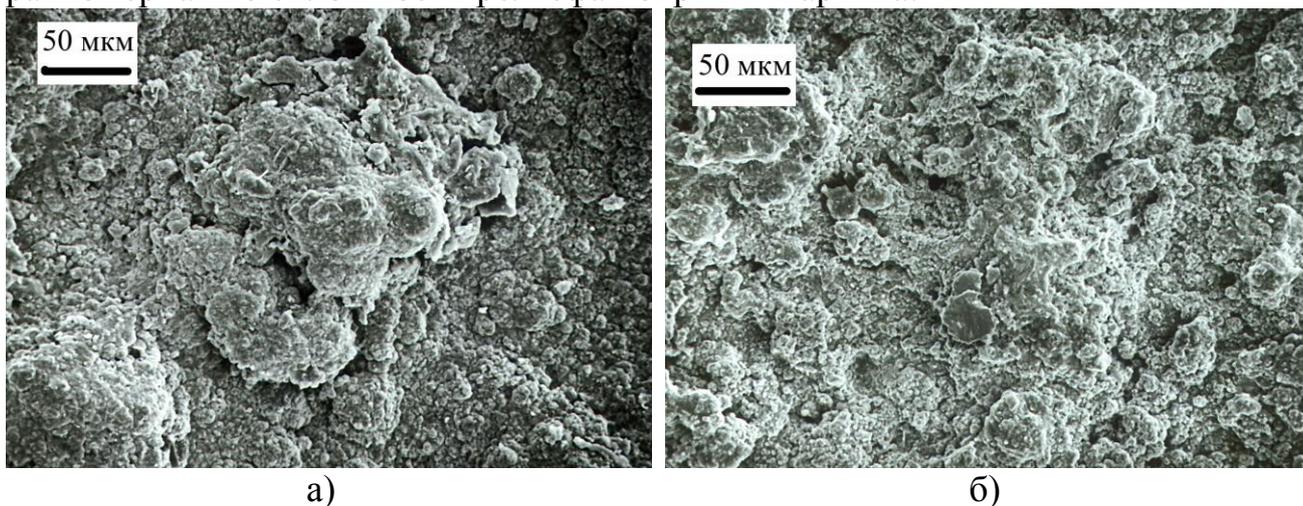


Рисунок 2 - SEM-электронное изображение поверхности детонационных покрытий из механокомпозита с разным содержанием металлической матрицы: а) 20%, б) 50%

Изучение структуры $\text{TiC}+30\%\text{NiCr}$, $\text{TiC}+50\%\text{NiCr}$, на микроскопе Zeiss AXIO Observer Alm показало, что детонационное покрытие имеет композиционную структуру. Состоит из зёрен TiC равномерно распределённых по объёму матрицы покрытия (рисунок 3).

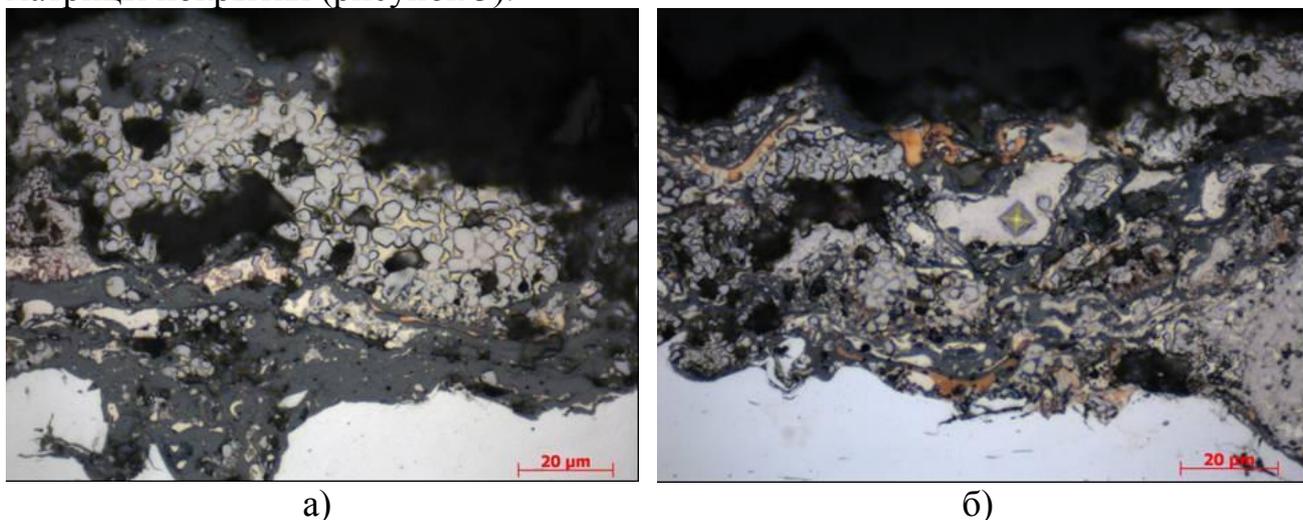


Рисунок 3 - Шлиф поперечного среза детонационного покрытия из механокомпозита с разным содержанием металлической матрицы: а) 30%, б) 50%

Экспериментальные данные позволяют предположить, что наследование морфологии слоистого композита и возможность получения монофазных продуктов СВС равномерно распределенных по объему материала, а также расширение концентрационных границ осуществимости процесса СВС при разбавлении системы металлической матрицей определяются формированием при механической активации механокомпозитов. Масштаб гетерогенности слоистых композитов на этапах синтеза и напыления существенно не меняется и изначально закладывается при механоактивации реагентов с металлической матрицей. Основным управляющим фактором, который в наибольшей мере может удовлетворять служебным свойствам детонационных покрытий является степень разбавления механокомпозита металлом матрицы.

Трибологические испытания покрытий, нанесенные детонационно-газовым способом (рисунок 4) показали, что с увеличением процентного содержания металлической матрицы от 20 до 60 масс.% в покрытии относительный износ в условиях сухого трения увеличивается более чем в 2 раза.

Распределение карбидной фазы и микроструктуру наплавленного покрытия изучали на образцах, полученных из порошков СВС-механокомпозитов состава TiC+Me (P6M5, ПР-Н70Х17С4Р4-3). Установлено, что химический состав металла матрицы сильно влияет на размеры, форму и количество карбидной фазы.

В наплавленном металле покрытий из порошков типа TiC+P6M5 (80 % масс.) были обнаружены одиночные мелкие карбиды титана кубической формы и их цепочки по границам зерен (рисунок 5, а). Значения микротвердости в покрытиях превышают показатели в основном металле в 1,5-2 раза, пиковые значения составляют в пределах 600 HV.

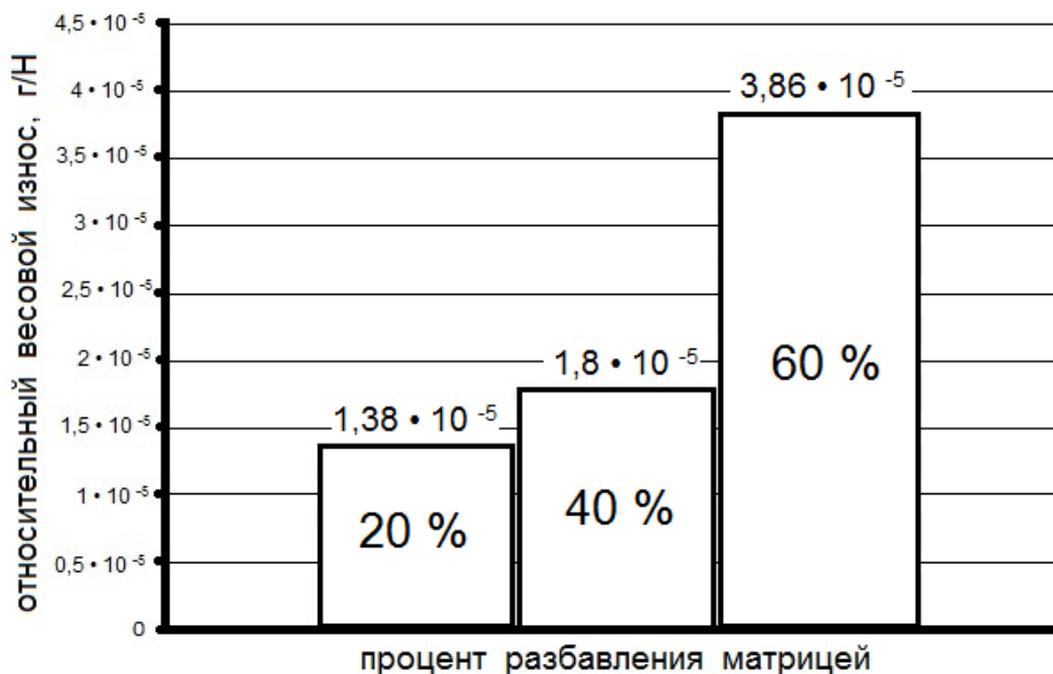
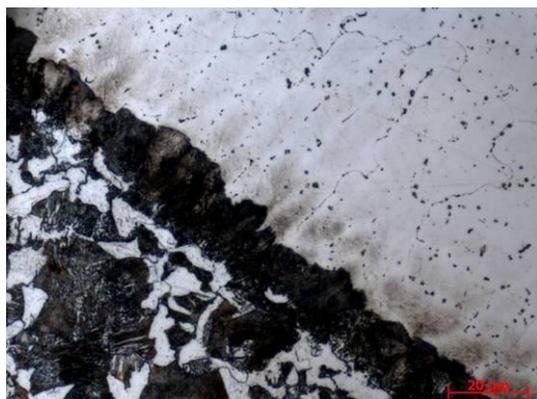
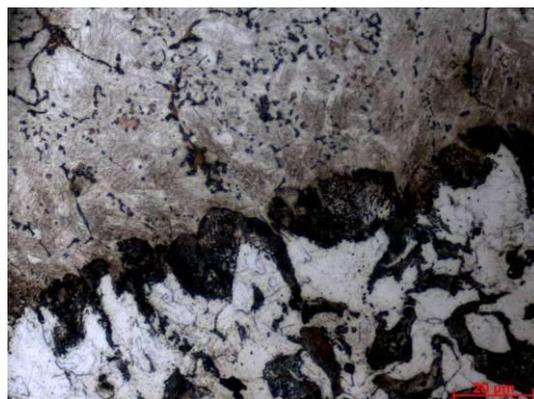


Рисунок 4 – Относительный весовой износ напыленных покрытий

Металлографические исследования на образцах с матрицей типа TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3 (80 % масс.) показали, что в наплавленном металле выделяются карбидные частицы различной формы. Вместе со строчками карбидов и их единичными включениями кубической формы, в структуре покрытия преимущественно присутствуют карбиды больших размеров неправильной формы, не имеющие ориентировки (рисунок 5, б). Наплавленный материал имеет более неоднородное состояние. Крупные карбидные частицы располагаются непосредственно в теле зерна. Пиковые значения микротвердости в покрытии составляют от 500 до 800 НV.



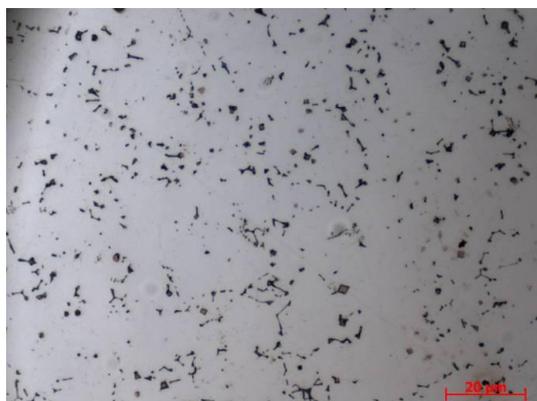
а)



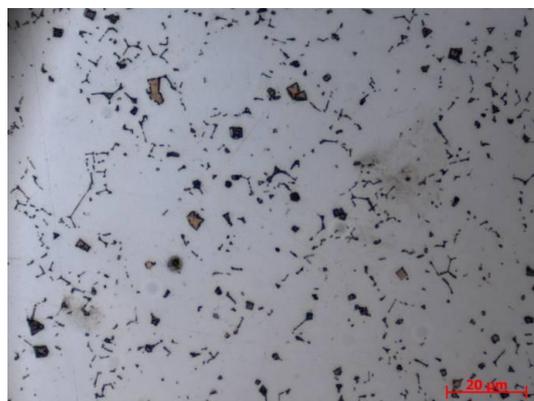
б)

Рисунок 5 - Микроструктура наплавленного металла из порошков состава TiC+80 % Me: а) – P6M5; б) – TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3

Анализ показал, что по мере уменьшения степени разбавления СВС-механокомпозиата состава TiC+X % Me (P6M5, ПР-Н70Х17С4Р4-3) металлом матрицы значительно возрастает количество крупных карбидных частиц различной формы, выделяющихся внутри зерна (рисунок 6). Использование при наплавке матрицы типа TiC+P6M5 (X % масс.) приводит к выпадению мелких карбидов по границам в виде сетки.



а)



б)

Рисунок 6 - Микроструктура наплавленного металла из порошков состава TiC+P6M5 (X % масс.): а) – 60%; б) – 20%

Электроннооптический и спектральный анализы фазового состава, подтвердили наличие нескольких видов карбида титана в наплавленном металле.

В структуре наплавленных образцов, полученных из порошков СВС-мехакомпозитов на основе смеси TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3 (80 % масс.) преобладают именно карбидные включения титана неправильной формы по сравнению с кубической.

Результаты растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом в микроточке представлены на рисунке 7 и в таблице 1.

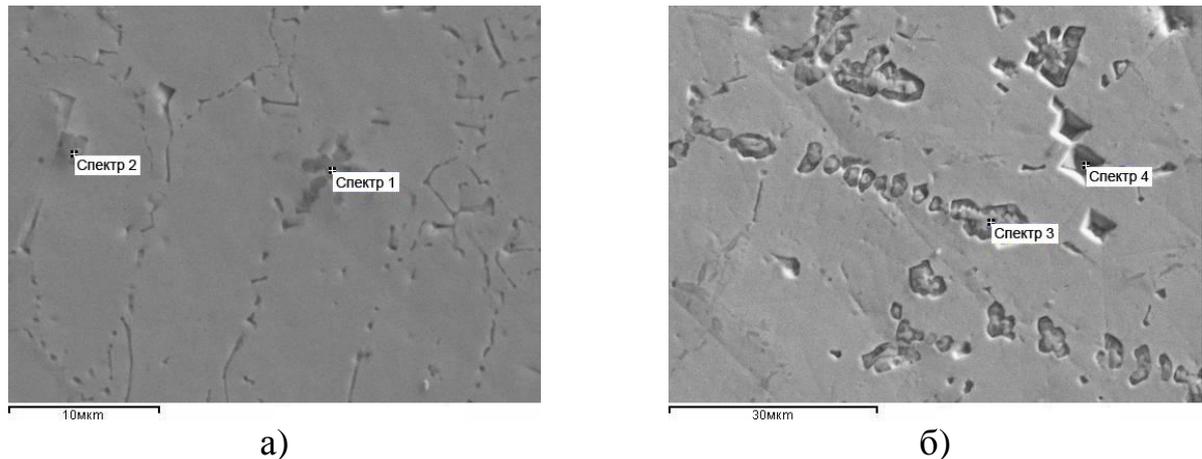


Рисунок 7 - Микроструктура и морфология частиц мехакомпозитов в покрытиях состава TiC+80 % Me: а – P6M5; б – TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3

Таблица 1. Весовое распределение химических элементов в частицах мехакомпозитов покрытий TiC+80 % Me (P6M5, ПР-Н70Х17С4Р4-3)

| Химический элемент | Весовой % | | | |
|--------------------|-----------|----------|---------------------|----------|
| | TiC+P6M5 | | TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3 | |
| | спектр 1 | спектр 2 | спектр 3 | спектр 4 |
| C | 10,16 | 5,89 | 18,17 | 22,06 |
| Ti | 72,75 | 41,98 | 72,17 | 54,34 |
| Fe | 16,36 | 24,62 | 7,83 | 20,12 |

Полученные экспериментальные данные по микроанализу (таблица 1) свидетельствуют о том, что в наплавленном металле зерно карбида титана претерпевает существенные изменения и представляет собой нестехиометрический карбид TiC, с возможностью образования упорядоченных фаз типа: Ti₂C, Ti₃C₂ и Ti₆C₅ с кубической и ромбической симметрией.

Использование для дуговой наплавки порошков СВС-мехакомпозитов состава TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3 (X % масс.) дает возможность получать в структуре металла покрытия, наряду с мелкими карбидами титана, преимущественно крупные кубической и неправильной формы и в больших количествах, чем при наплавке порошков типа TiC+P6M5 (X % масс.). Причем, наличие большого количества крупных карбидов титана, выделяющихся в теле зерен и значительно измельчающих структуру, объясняется более интенсивным переходом

титана и углерода из порошкового электрода в наплавленный металл покрытия. Следовательно, полученная структура наплавленного металла должна обеспечивать высокую износостойкость и твердость покрытия.

Исследования износостойкости наплавленных покрытий проводились на гладких цилиндрических образцах диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Для снижения шероховатости поверхностей, полученных наплавкой, и достижения пятна контакта, равного площади образцов, выполнялась их предварительная притирка до значения $Ra = 1,25$ мкм. Перед каждым циклом испытаний образцы промывали и просушивали для удаления пыли и продуктов износа.

Установлено, что наплавленные покрытия с 80 % (рисунок 8) степенью разбавления металлом матрицы имеют меньшую сопротивляемость изнашиванию, что можно объяснить более высоким содержанием металла матрицы.

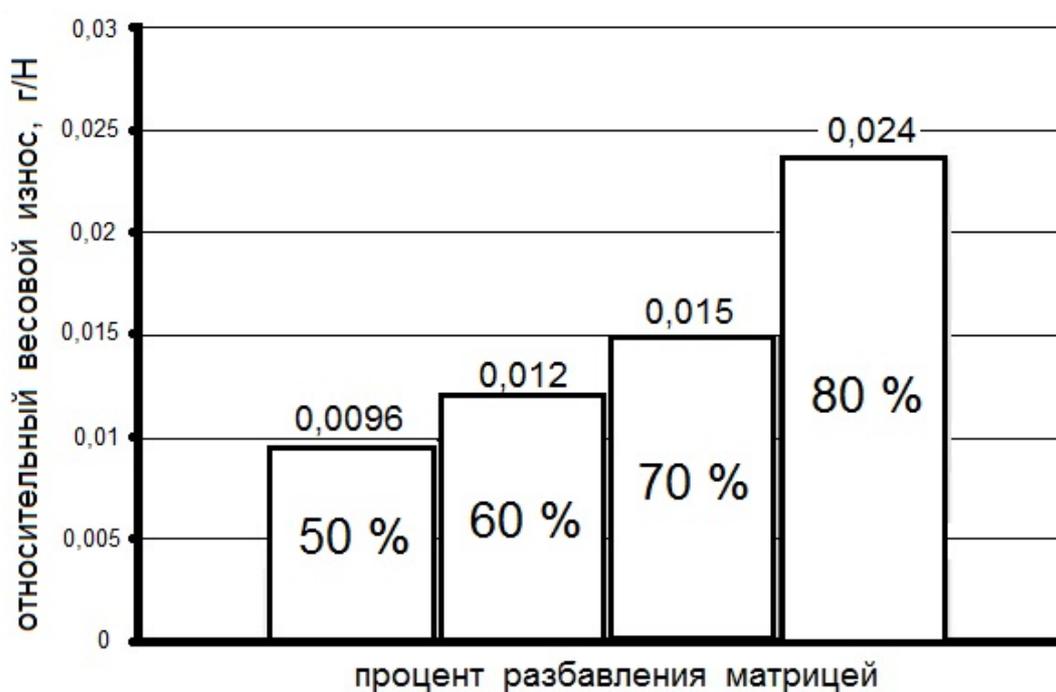


Рисунок 8 – Относительный весовой износ наплавленных покрытий

Следовательно, химический состав металлической матрицы порошков механоактивированных СВС-композитов напрямую влияет на размер, форму и характер распределения карбида титана в структуре наплавленного металла, что определяет износостойкость покрытия в целом.

При снижении степени разбавления металлом матрицы композита повышается интенсивность перехода карбидообразующих элементов из порошков СВС-механокомпозитов в наплавленный металл, что обеспечивает повышение износостойкости.

Проведенные исследования структуры и состава износостойких покрытий полученных различными способами напыления и наплавки из СВС-механокомпозитов показали, что существуют разные механизмы трансформации упрочняющей фазы из карбида титана. При детонационно-газовом нанесении покрытия из механокомпозита наблюдается наследование морфологии исходного механокомпозита. При электродуговой наплавке наблюдается образо-

вание карбидного зерна в покрытии нестехиометрического состава. Поведение металлической матрицы при различных методах нанесения покрытий позволяет сделать вывод о том, что материал металлической матрицы не изменяется и роль «инертной» матрицы сводится к возможности регулирования свойств покрытия степенью ее содержания в составе композита.

Четвертая глава посвящена моделированию геометрических параметров поверхностей деталей на различных этапах жизненного цикла деталей. Предложенные модели позволяют проводить расчеты шероховатости подложки, макро-и микропрофиль после нанесения покрытия и наплавки, топографию и другие геометрические параметры с учетом явлений, действующих при практической реализации технологических процессов, прогнозировать износ рабочих поверхностей деталей на этапе их эксплуатации. Использование стохастического моделирования для описания геометрических параметров поверхностей на отдельных этапах жизненного цикла деталей с покрытиями и наплавкой дает возможность прогнозировать не только средние значения и разброс геометрических параметров, но и получать гистограммы их распределений, что дает возможность оценивать вероятность брака при изготовлении и восстановлении деталей.

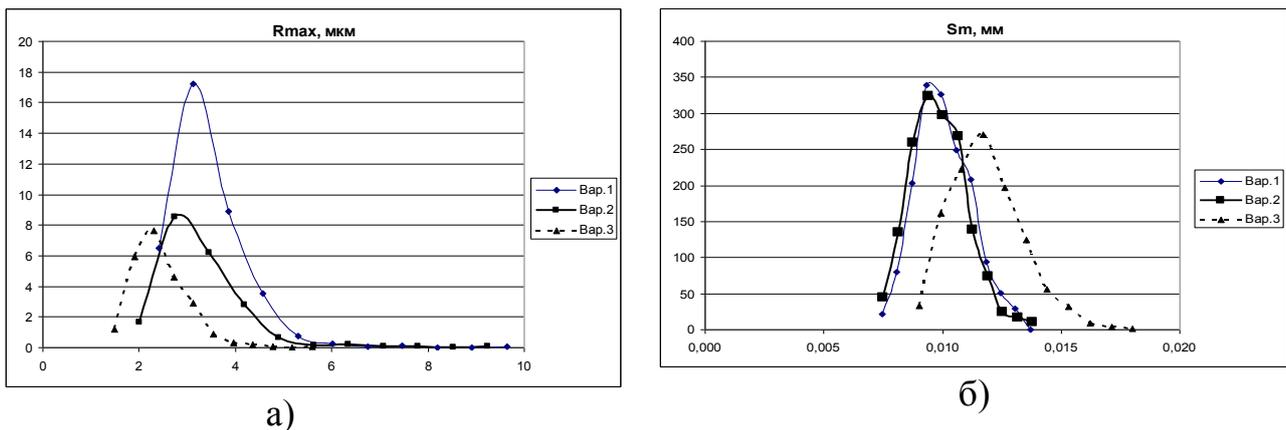


Рисунок 9 - Расчетные плотности распределения высотных (а) и шаговых параметров (б) шероховатости основы

Кривые плотностей распределения, рассчитанные для этапа подготовки основы (рисунок 9), позволяют прогнозировать вероятность брака по обеспечению заданных параметров шероховатости на этапе технологического проектирования операции подготовки основы (подложки) под напыление покрытия. Геометрические погрешности нанесенного слоя покрытия оказывают влияние на фактическую площадь контактирующих поверхностей, величину удельного давления, припуски на последующую обработку, долговечность и другие важные технологические и эксплуатационные характеристики деталей и механизмов.

На геометрические параметры профиля детали после наплавки влияет комплекс факторов: скорость подачи электрода, величина силы тока, скорость наплавки, шаг и другие параметры. Они являются случайными величинами. При этом радиус валика R и шаг b распределены по нормальному закону (в

связи с большим количеством факторов, вызывающих их случайные колебания). Реализация стохастического моделирования заключается в многократных расчетах при случайных значениях параметров R и b для заданных уровней опорной длины профиля. Использование 1000 значений при стохастическом моделировании дает достаточную точность оценки параметров. На рисунке 10, а приведены кривые износа наплавленных поверхностей при $R = 5$ мм и различных значениях K , характеризующий рост силы, действующей на поверхность, и суммарный износ. С ростом радиуса скорость износа снижается. На рисунке 10, б видно, что при радиусе $R = 10$ мм за то же время суммарный износ поверхности снизился.

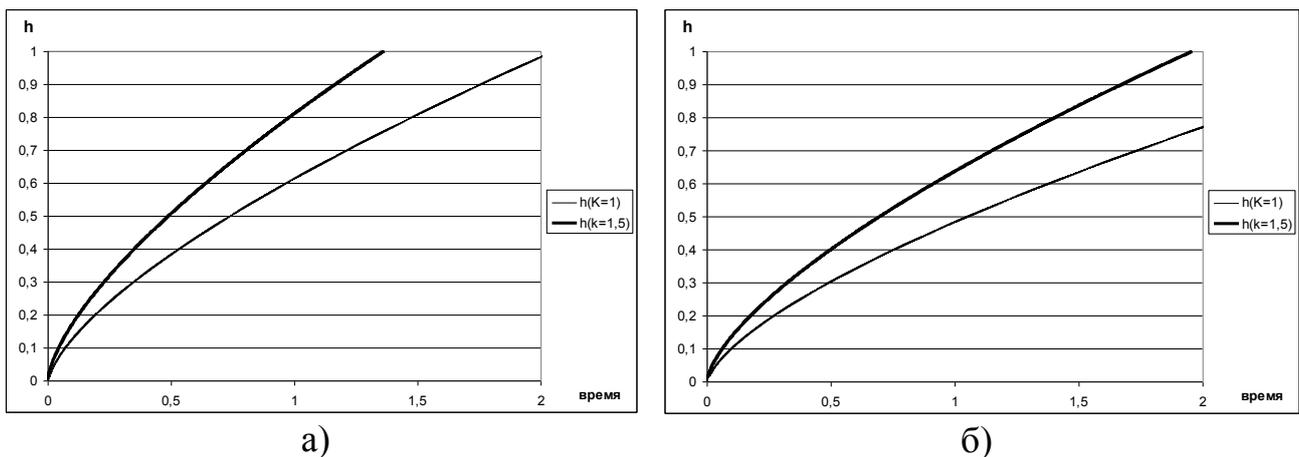


Рисунок 10 – Зависимость износа наплавленной поверхности от времени при разных коэффициентах K . а) $R = 5$ мм; б) $R = 10$ мм.

Предложенный подход предполагает и решение обратной задачи – проектирование операций и технологий, обеспечивающих заданный срок службы поверхности. Исходными данными является минимально допустимый срок службы поверхности T_{\min} и доверительная вероятность его обеспечения P .

Предложенный для деталей с износостойкими покрытиями метод анализа видов и последствий потенциальных отказов позволяет на важнейших стадиях жизненного цикла продукции проанализировать потенциальные дефекты, их причины и последствия, оценить риски их появления и принять меры для устранения или снижения вероятности и ущерба от их появления.

В пятой главе дано описание апробации результатов исследований.

Быстроизнашивающиеся части стрельчатых лап упрочнялись с помощью нанесения износостойкого материала из порошковой смеси, состоящей из $TiC+X\%PP-N70X7C4P4-3$. По результатам проведенных испытаний установлено, что наилучший эффект дает наплавка наиболее изнашиваемых поверхностей небольшими участками. Это приводит в процессе эксплуатации к самозатачиванию отдельных участков и развитию поверхности рабочего лезвия. Наплавка лап экспериментальными электродами позволила повысить их износостойкость более чем в 2 раза.

Технико-экономические расчеты показали, что предлагаемая технология изготовления деталей с нанесенными покрытиями из композиционных мате-

риалов окупается за 2,8 года без учета рисков и 3,93 года с учетом рисков на рынке при комплексной реализации проекта большой группы деталей. сельскохозяйственной техники. Минимальный объем производства, при котором текущие расходы будут покрываться доходами от реализации продукции, составляет 354,82 м² нанесенных покрытий в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что в результате механоактивационной обработки порошковой смеси состава $Ti+C+X \% Me$, проведения реакции СВС, получения композита со смешиванием компонентов в планетарной шаровой мельнице АГО-2 и доведением содержания металлической матрицы в смеси до значений 40 - 60 масс.% возможно получение износостойких детонационных покрытий на детали технологического оборудования. Данные покрытия при испытании на износ в условиях сухого трения по методике вал – колодка при различных скоростях и нагрузках имеют явно выраженную зависимость по содержанию металлической матрицы. Для 20-40% масс. содержания металлической матрицы в покрытии весовой износ имеет значение порядка 0,000012-0,000017 г/Н, для 60% содержания - 0,000038 г/Н. Сравнительные испытания на износ напыленных СВС-материалов с конструкционной сталью 40Х, прошедшей термическую обработку (закалка-отпуск) показали, что износ образцов с покрытием (для содержания 20-40%) во всем диапазоне скоростей и нагрузок примерно в 8 раз меньше.

2. Определено, что для обеспечения технологического процесса электродуговой наплавки износостойкого покрытия содержание металлической матрицы в порошковой смеси для СВС-композита должно быть в пределах 60 - 90 масс.%. Зависимость износостойкости от содержания металлической матрицы в порошковом СВС-композите имеет такой же качественный характер, как и в случае с износостойким детонационным покрытием. При содержании металлической матрицы в пределах 50-70% масс. покрытия в условиях трения о нежестко закрепленные абразивные частицы имеют весовой износ порядка 0,01-0,015 г/Н, а с увеличением содержания матрицы до 80% износ увеличивается до 0,023 г/Н. Сравнительные испытания на износ наплавленных из СВС-композитов покрытий и поверхности из нормализованной стали 45 показали увеличение износостойкости композиционного материала почти в 3 раза.

3. Показано, что если в детонационных покрытиях из СВС-композитов наблюдается в общем виде наследование морфологии, структуры и состава исходного материала механокомпозита, то в дуговой наплавке в структуре покрытия формируются карбидные частицы различной стехиометрии TiC в объеме металлической матрицы. Распределение карбидной фазы и микроструктура наплавленного покрытия из порошков СВС-механокомпозитов состава $TiC+Me$ для случаев использования Р6М5 и ПР-Н70Х17С4Р4-3 различна. В наплавленном металле покрытий из порошков типа $TiC+P6M5$ присутствуют мелкие карбиды титана кубической формы и цепочки карбидов по границам зерен матрицы. В структуре наплавленных образцов, полученных из порошков СВС-мехакомпозитов на основе смеси $TiC+ПР-Н70Х17С4Р4-3$ преобладают

карбидные включения нестехиометрического состава типа: Ti_2C , Ti_3C_2 и Ti_6C_5 с кубической и ромбической симметрией. Значения микротвердости в покрытиях превышают показатели в основном металле в 1,5-2 раза, пиковые значения микротвердости составляют 600 HV.

4. Наибольшая износостойкость достигается при наплавке покрытия из порошков механоактивированных СВС-композитов состава $TiC+PR-N70X17C4P4-3$ (X % масс.) с меньшей степенью разбавления металлом матрицы.

5. Предложенные модели для описания геометрических параметров поверхностей на отдельных этапах жизненного цикла деталей с покрытиями и наплавкой имеют открытую структуру и позволяют прогнозировать не только средние значения и разброс параметров, но и получать гистограммы их распределений для оценки вероятности появления брака при изготовлении и восстановлении деталей.

6. Предлагаемая технология получения порошков для напыления и наплавки износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей машин с использованием механоактивационной обработки и высокотемпературного синтеза окупается за 2,8 года без учета рисков и 3,93 года с учетом рисков на рынке при комплексной реализации проекта большой группы деталей сельскохозяйственной техники. Наплавка лап экспериментальными электродами позволила повысить их износостойкость при эксплуатации более чем в 2 раза.

7. Установлено, что основная роль металлической матрицы в СВС-композитах при различных методах нанесения износостойких покрытий сводится к возможности регулирования свойств покрытия степенью ее содержания в составе композита. Методом электродуговой наплавки с помощью специально разработанного порошкового электрода состава: $TiC+80\%$ масс. $PR-N70X17C4P4-3$ произведена наплавка опытной партии стрелчатых лап сельскохозяйственной сеялки. Проведенные натурные испытания лап показали увеличение срока эксплуатации деталей в 3 раза.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Экспериментальные исследования износа покрытий из композиционных керамических материалов, нанесенных газодетонационным способом / А. А. Ситников, М. Е. Татаркин, Д. М. Скаков // Ползуновский вестник. - № 4. - 2009. – С. 145-147.

2. Структура и свойства наплавленных электродуговых покрытий из порошков механоактивированных СВС-композитов / А.А. Ситников, В. И. Яковлев, М. Н. Сейдуров, М. Е. Татаркин, А. В. Собачкин, Н. В. Степанова, И. Ю. Резанов // Обработка металлов. – № 3 (52). – 2011. – С. 51-54.

Публикации в других изданиях

3. Совершенствование технологии наплавки на основе анализа потенциальных дефектов и отказов / М. Е. Татаркин // Наука и молодежь - 2010: материалы VII Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Барнаул, 2010.

4. Износ покрытий из композиционных керамических материалов, нанесенных газодетонационным способом / А. А. Ситников, М. Е. Татаркин, Д. М. Скаков // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2010.- С. 52-53.

5. Wear-resistant detonation sprayed coatings based on the composite mechanically activated shs-materials / A. A. Sitnikov, V. I. Yakovlev, M. A. Korchagin, D. M. Skakov, A. A. Popova, M. E. Tatarkin // The Optimization of Composition, Structure and Properties of Metals, Oxides, Composites, Nano-and Amorphous materials: IX-th Israel-Russian Bi-national Workshop 2010, July 25-30, Belokurikha, 2010. - P.159-160.

6. Microstructure studies of the coatings produced by arc deposition of the mechanoactivated SHS-composite TIC+X%ME (R6M5, PR-N70H17S4R4-3) POWDERS / A. A. Sitnikov, V. I. Yakovlev, M. A. Korchagin, M. N. Seidurov, M. E. Tatarkin // The Optimization of Composition, Structure and Properties of Metals, Oxides, Composites, Nano-and Amorphous materials: IX-th Israel-Russian Bi-national Workshop 2010, July 25-30, Belokurikha, 2010. P. 161.

7. Имитационное моделирование формирования микрорельефа поверхности при абразивной обработке основы под нанесение покрытий / С. Л. Леонов, А. А. Ситников, А. М. Марков, М. Е. Татаркин // Инновации в машиностроении: материалы 1-й международной научно-практической конференции. - Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. - С. 67-69.

8. Новые порошковые материалы из СВС-композиатов для электродуговой наплавки износостойких покрытий / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, М. Е. Татаркин // Инновации в машиностроении: материалы 1-й международной научно-практической конференции. - Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. - С. 191-193.

Подписано в печать 16.04.2012. Формат 60x84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 0,93.

Тираж 100 экз. Заказ 2012 – **231**

Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8–3852) 29–09–48

Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.