

На правах рукописи



СКАКОВ ДАНЕЛЬ МАЖЫНОВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ
ИЗНОСОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА**

Специальность 05.02.01 – «Материаловедение в машиностроении»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2009 г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова».

Научный руководитель Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор

Евстигнеев Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор
Ситников Александр Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Овчаренко Владимир Ефимович

кандидат технических наук, доцент
Земляков Сергей Анатольевич

Ведущая организация ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится 24 декабря 2009 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.07 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Е-mail: berd50@mail.ru

Факс: 8(3852)368413

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

Автореферат разослан « 24 » ноября 2009 года

Ученый секретарь
диссертационного совета, к. т. н., доцент



А. А. Бердыченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Нанесение покрытий на рабочие поверхности деталей позволяет сэкономить дефицитные материалы, значительно повысить эксплуатационные показатели машин, продлить срок службы новых и восстановленных деталей. Во всем многообразии существующих методов нанесения покрытий детонационно-газовое напыление является универсальным, технологичным процессом и обладает комплексом свойств, которые с точки зрения эксплуатации делают его весьма эффективным. Высокое качество, простота технологии, возможность нанесения покрытия с минимальными термическими воздействиями на материал, получения практически беспористых слоев покрытия значительной толщины на детали различной конфигурации и габаритов позволяют эффективно использовать этот метод в различных областях техники.

В качестве материалов для получения покрытий используют металлы и их сплавы, твердые сплавы, оксиды металлов и композиционные порошки. Наибольшей износостойкостью обладают твердые сплавы, состоящие из металлической матрицы (или связки) с равномерно распределенными в объеме твердыми включениями. Основой применяемых в промышленности твердых сплавов, наряду с вольфрамовыми материалами, является карбид титана (TiC). Карбид титана – материал с уникальными свойствами, к которым относятся: высокая температура плавления, твердость, стойкость к агрессивным средам и к абразивному износу. Применение карбида титана в качестве материала покрытия для детонационно-газового напыления затруднено, прежде всего, из-за высокой твердости его частиц. За рубежом известны способы получения композиционных порошков для нанесения покрытий методами механической активационной обработки (МА), получившие марку Mechanomade. Технология получения композиционных порошков является «ноу-хау» фирмы MBN Nanomaterialia.

Одним из основных путей решения проблемы создания безвольфрамовых твердых сплавов на основе TiC с мелкозерненной структурой является применение принципиально новых методов формирования и регулирования свойств материалов, использовании быстропротекающих и высокоэнергетических воздействий.

Большие возможности для получения карбида титана имеет разработанный в нашей стране метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который был открыт академиком РАН Мержановым А. Г. и его научной школой. Метод основан на использовании внутренней химической энергии исходных реагентов, выделяющейся в процессе образования продуктов реакции. В настоящее время методом СВС получают широкий спектр порошков, материалов и изделий, которые находят применение в ряде отраслей промышленности. Одной из проблем получения TiC методом СВС являются высокие температуры синтеза, достигающие 1600⁰С и требующие применения специальной оснастки.

В ряде работ, появившихся в печати в последнее время, рассматривается проведение СВС в механоактивированных системах, что позволяет значительно снизить температуру синтеза. Кроме того, профессором Корчагиным М.А.

(ИХТТИМ СО РАН г. Новосибирск) показан перспективный СВС-метод получения композиционных порошковых материалов в предварительно механоактивированной порошковой смеси реагентов с металлической матрицей. Предварительная механоактивационная обработка реагентов с металлической матрицей могут дать возможность эффективного управления реакциями синтеза и получения композитов, требуемых микроструктуры и свойств, в частности при использовании этих материалов для получения защитных покрытий.

Анализ литературных данных показал, что в настоящее время далеко не все возможности сочетания механической активации и СВС использованы, как в технологическом, так и в научном плане. Следовательно, проведение исследований по определению параметров механоактивационной обработки материалов на основе карбида титана с различной степенью разбавления реагентов металлической матрицей, проведение синтеза в новой системе и получение покрытий, обладающих заданными физико-механическими свойствами и обеспечивающих эксплуатационную стойкость деталей, являются актуальными.

Диссертационная работа выполнялась в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» по проекту № 2.2.1.1/4799.

Цель работы. Разработка способа управления физико-механическими свойствами износостойких защитных покрытий, нанесенных детонационно-газовым напылением из карбида титана, полученного самораспространяющимся высокотемпературным синтезом в механоактивированной шихте с различной степенью разбавления реагентов металлической матрицей.

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

1. Установить закономерности влияния времени механоактивации и состава компонентов композиционных порошков на макрокинетические характеристики процесса горения, структуру и фазовый состав, полученных материалов на основе карбида титана.
2. Исследовать структуру, фазовый состав детонационных покрытий из композиционных материалов на основе карбида титана.
3. Установить закономерности влияния разбавления карбидной составляющей металлической матрицей на эксплуатационные свойства напыленного слоя (когезионную прочность, микротвердость, износостойкость).
4. Разработать технологические рекомендации по получению износостойких детонационных покрытий из механоактивированного композита на основе карбида титана и внедрить результаты в производство.

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

Достоверность результатов и обоснованность выводов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и методик исследований, достаточным количеством экспериментального материала, применением статистических методов обработки данных.

Научная новизна.

1. Экспериментально установлена зависимость скорости и максимальной температуры фронта горения от содержания металлической матрицы в механо-активированной шихте, и времени активации компонентов:

- при содержании металлической матрицы в механокомпозите от 10 до 20 масс.% в результате реакции синтезируется стехиометрический карбид титана в металлической матрице. Дальнейшее увеличение содержания металлической матрицы в композите (более 20 масс.%) приводит к уменьшению скорости и температуры фронта горения;

- при изменении времени предварительной механической активации в интервале от 3 до 10 минут, происходит увеличение скорости и температуры реакции, дальнейшее увеличение времени механоактивационной обработки вклада в реакционную способность шихты не вносит.

2. Исследована структура, фазовый состав детонационных покрытий из композиционных материалов на основе карбида титана установлено, что:

- детонационное покрытие из СВС-механокомпозита имеет сложную структуру, состоящую из скоплений зерен TiC локализованных в областях, которые распределены в объеме покрытия;

- в процессе напыления химический состав исходного порошка не изменяется в слое нанесенного покрытия. Структурные изменения в материале покрытия происходят в сторону уменьшения размера карбидного зерна с увеличением степени разбавления металлом связки.

3. Установлено влияние разбавления карбидной фазы металлической матрицей на эксплуатационные свойства напыленного слоя:

- распределение значений микротвердости для композиционного покрытия, состоящего из карбида титана и металлической матрицы, подчиняется нормальному закону и носит двухмодальный характер. Закон распределения микротвердости в материале покрытия един для любого содержания компонентов в покрытии;

- увеличение содержания металлической матрицы в композите приводит к увеличению прочности сцепления детонационного покрытия с основой;

- с увеличением процентного содержания металлической матрицы от 20 до 60 масс.% в покрытии весовой износ в условиях сухого трения при нагрузке в 950 Н увеличивается почти в 2 раза.

Значение полученных результатов для теории и практики.

1. Полученные в данной работе результаты исследований дают новые более глубокие представления о процессе синтеза дисперсно-упрочненного композиционного материала для нанесения детонационных покрытий, управления его физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

2. Определены критические условия высокотемпературного синтеза карбида титана в зависимости от режимов механоактивационной обработки смеси и от степени разбавления инертным компонентом (матрицы) карбидной фазы для послойного горения. Эти условия определяют границы гарантированного проведения реакции СВС в режиме фронтального горения.

3. Исследованы физико-механические свойства детонационно-газовых покрытий для различного содержания металлического компонента в порошковой смеси. Получены корреляционные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между микротвердостью нанесенного покрытия, прочностью сцепления покрытия с основой, весовым износом и соотношением фазовых составляющих композиционного материала. Указанные зависимости дают возможность прогнозировать свойства получаемых материалов на этапе проектирования технологического процесса.

4. На основе анализа результатов исследования разработаны технологические рекомендации по получению износостойких детонационных покрытий из механоактивированного композита на основе карбида титана. Технология нанесения износостойких покрытий детонационно-газовым способом на поверхность узла загрузки-выгрузки грохота, принята к внедрению в ТОО «Satpayevsk Titanium Mines Ltd» г. Усть-Каменогорск.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика совместной предварительной механоактивации порошковой смеси, включающей реагенты и металлическую матрицу для последующего проведения высокотемпературного синтеза. Методика позволяет управлять структурой и физико-механическими свойствами механокомпозита путем изменения содержания металлической матрицы.

2. Результаты экспериментальных исследований по определению макрокинетических параметров высокотемпературного синтеза в режиме фронтального горения в предварительно механоактивированной порошковой смеси с различной степенью разбавления металлической матрицы.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению микротвердости, износостойкости и прочности сцепления детонационных покрытий из СВС механокомпозитов с различной степенью разбавления.

4. Технологические рекомендации по применению механокомпозитов с различной степенью разбавления для нанесения покрытий с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 2007 г. (г. Алматы, Казахстан), I Международной научной конференции Казахстан–Россия–Япония «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 2008 г. (г. Усть-Каменогорск), VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», 2009г. (г.Юрга, ТПУ), 5-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 2009 г. (г. Барнаул), Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 50-летию Бийского технологического института «Инновационные технологии: производство, экономика, образование», 2009 г. (г. Бийск, БТИ), 67-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ, 2009 г. (г. Барнаул, АлтГТУ). Результаты диссертации докладывались на объединенном физическом семинаре АлтГТУ

(г. Барнаул) в 2007-2009 годах и совместных научных семинарах кафедр «Сельскохозяйственное машиностроение», «Общая технология машиностроения» и ПНИЛ СВС-материаловедение (АлтГТУ, г. Барнаул) в 2008–2009 г.г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 11 печатных работах. В том числе 6 статей, из них 3 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 тезиса докладов, 2 патента на изобретение. Личный вклад автора составляет 70 %.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 125 рисунков, 25 таблиц, список литературы из 135 наименований. Общий объем – 193 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ проблем синтеза механоактивированных материалов. Проанализированы особенности получения материалов на основе карбида титана, технологии его получения и применение в промышленности. Показаны особенности самораспространяющегося высокотемпературный синтез предварительно механически активированных систем при наличии металлической матрицы. Сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены экспериментальные методики, используемые в работе. Дано описание экспериментального оборудования и комплекса детонационного нанесения покрытий.

Для изготовления шихты использовались следующие порошковые материалы: порошок титана марки ПМТ, дисперсный состав 63–100мкм; порошок углерода марки ПМ-15, дисперсный состав 10–50 мкм; в качестве металлической матрицы – порошок наплавочный ПР-Н70Х7С4Р4-3 (ТУ-14-22-33-90) ОАО «Полема» (НПО Тулачермет), дисперсный состав 63–100мкм.

Для механоактивационной обработки порошковых смесей применялась планетарная шаровая мельница АГО-2. Время механоактивации варьировалось от 2 до 20 минут. Энергонапряженность составляла 30г.

Реакция СВС в режиме фронтального горения проводилась в кварцевой трубке с внутренним диаметром 20 мм и высотой 150 мм. Для контроля скорости фронта горения СВС процесса и его температуры в трубке имелось два отверстия, в которые помещались две вольфрам-рениевые термпары (ВР-5/20), находящиеся на расстоянии 30 мм друг от друга. Сбор и обработка данных производилась с помощью ПК IBM с многоканальной платой аналого-цифрового преобразования ЛА 1,5 РСІ.

Нанесение покрытий производилось на установке детонационного напыления «Катунь М». В качестве детонирующего состава использовалась пропанобутановая – кислородная смесь. Расход рабочих газов составил при средней частоте выстрелов в 4 Гц : пропанобутановая смесь 2,0–3,5 м³/ч; кислород 10–12 м³/ч; сжатый воздух 10–15 м³/ч.

Рентгенофазовый анализ производился на дифрактометре марки ДРОН-6, с использованием стандартной рентгеновской трубки с $\text{Cu K}\alpha$ -излучением. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью пакетов программ PDWin, и Search Mach предназначенных для автоматизации процесса обработки рентгенограмм.

Определение размеров и химического состава продуктов синтеза и покрытий производилось с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 с приставкой EDS X-ACT «OXFORD».

Прочность сцепления покрытия с основой производилась штифтовым методом.

Микротвердость покрытий измерялась на твердомере марки ПМТ-3 при нагрузках 100 г по ГОСТ 9450-76.

Трибологические испытания покрытий производились в соответствии с ГОСТ 23.204-78 на триботехническом комплексе, в который входят: машина для испытания материалов на трение 2168 УМТ и управляющий компьютер. Испытания производились по схеме «диск-колодка» – при вращательном движении в режиме сухого трения.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния времени механоактивации и состава компонентов композиционных порошков на макрокинетические характеристики процесса горения, структуру и фазовый состав материалов на основе карбида титана.

Исследовано влияние времени механоактивационной обработки компонентов шихты на кинетику процесса синтеза (рисунок 1). Содержание матрицы являлось фиксированным и составляло 30 масс.%.

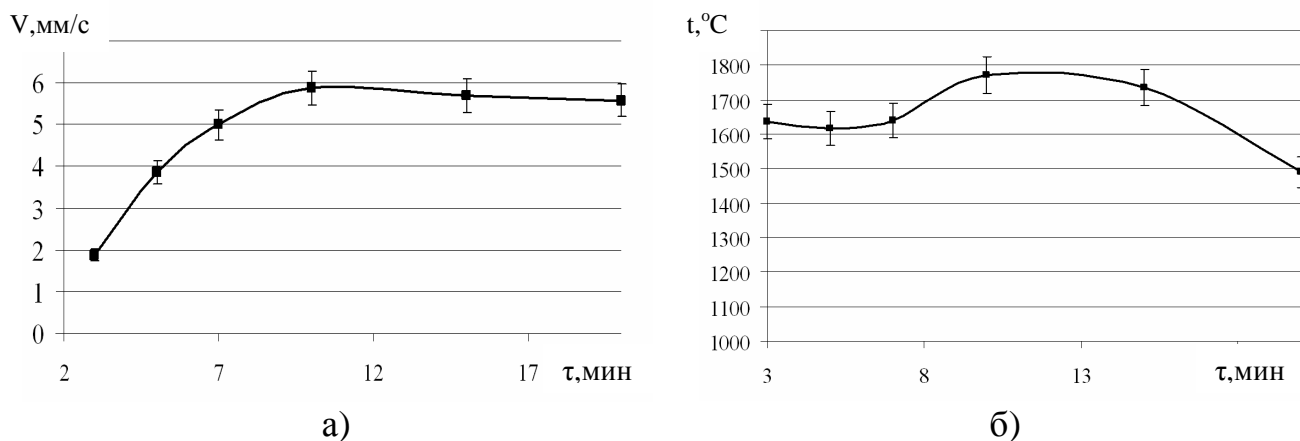


Рисунок 1 – Влияние времени механоактивации на кинетику процесса синтеза, где а) изменение скорости волны горения СВС; б) изменение температуры фронта волны горения

Установлено, что при изменении времени механической активации до 10 мин. предварительной активации, происходит увеличение скорости и температуры реакции, более 10 минут механоактивационная обработка вклада в реакционную способность шихты не вносит.

Исследовано влияние степени разбавления композиционного порошка на макрокинетические параметры высокотемпературного синтеза. Проводилась серия экспериментов по СВС в системе «Ti+C+Me» с различным содержанием

инертного компонента (металлической матрицы), которое изменялось от 10 масс.% до 50 масс.% с шагом в 10 масс.%. В результате исследований кинетики процесса СВС было установлено влияние процентного соотношения карбида титана и матрицы на скорость волны горения и максимальную температуру синтеза (рисунок 2).

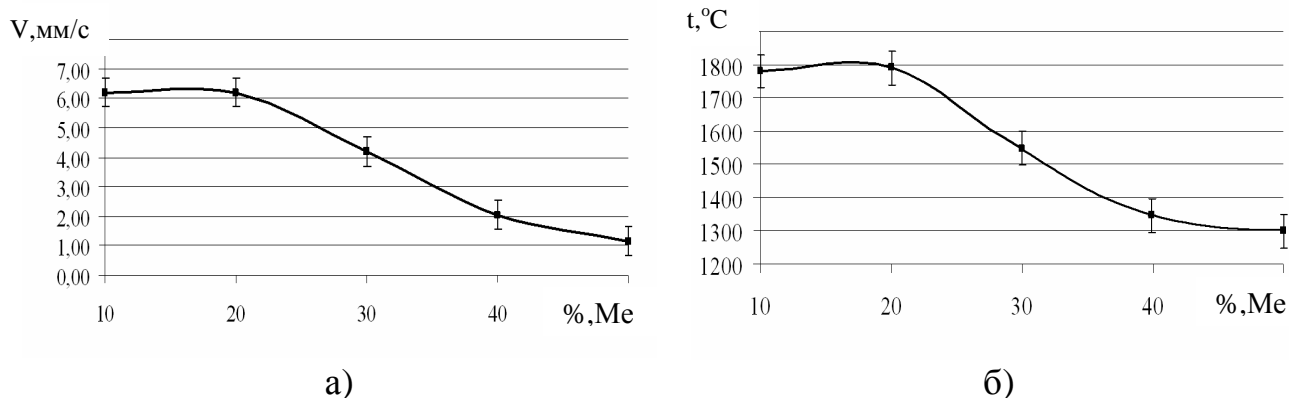


Рисунок 2 – Зависимость параметров синтеза от содержания матрицы, где а) зависимость скорости фронта горения; б) зависимость максимальной температуры фронта волны горения.

Рентгенофазовый анализ экспериментальных данных показал, что при содержании металлической матрицы в механокомпозите от 10 до 20 масс.% в результате реакции гарантировано синтезируется стехиометрический карбид титана в металлической матрице. Дальнейшее увеличение содержания металлической матрицы в композите (более 20 масс.%) приводит к уменьшению скорости и температуры фронта горения, реакция синтеза носит неустойчивый характер при содержании матрицы более 50%. Однако в результате синтеза не возникает никаких других продуктов реакции кроме карбида титана.

Анализ структуры (рисунок 3) показал, что визуально наблюдаются карбидные зерна, окруженные оплавленным материалом металлической связки. Размеры карбидных зерен составляют несколько мкм.

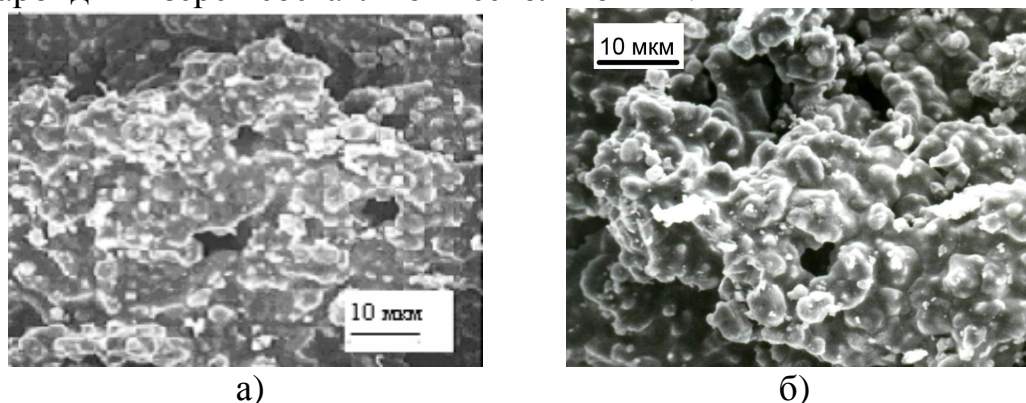


Рисунок 3 – Морфология поверхности механокомпозитов после СВС с различным содержанием матрицы, где а) 40 масс.%, б) 50 масс.%

Электронно-микроскопическое исследование (Carl Zeiss EVO50 с приставкой EDS X-Act (Oxford Instruments)) позволили выделить области распределения химических элементов в механокомпозите после СВС (рисунок 4).

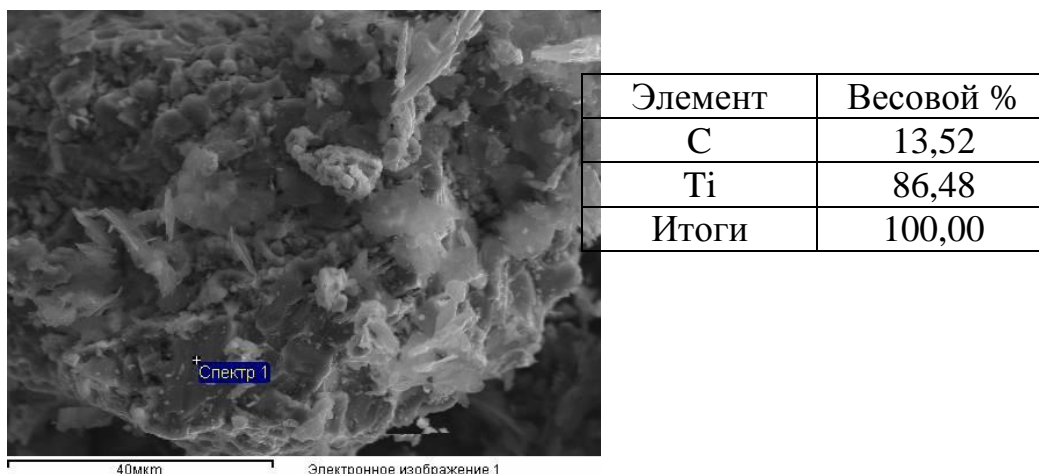


Рисунок 4 – Элементный состав (в точке «Спектр 1») и микроструктура механокомпозита

В результате проведенного спектрального анализа механокомпозита в микроточке (Спектр 1) выявлено, что в обозначенной области гетерогенного материала синтезирован карбид титана.

Масштаб гетерогенности механокомпозита на этапе синтеза существенно не меняется и изначально закладывается при механоактивации реагентов с металлической матрицей. Размеры карбидного зерна, синтезированного при различных степенях разбавления металлом связки могут изменяться в пределах 1–10 мкм.

В четвертой главе представлены исследования технологических особенностей процесса нанесения покрытий детонационным способом из дисперсно-упрочненных композиционных материалов, технология подготовки материалов для напыления.

В процессе напыления покрытия в качестве основы использовалась поверхность корпуса датчика, изготовленного из стали 3. с термопарой. Получены термограммы нагрева поверхности основы при напылении материала с различной степенью разбавления (рисунок 5).

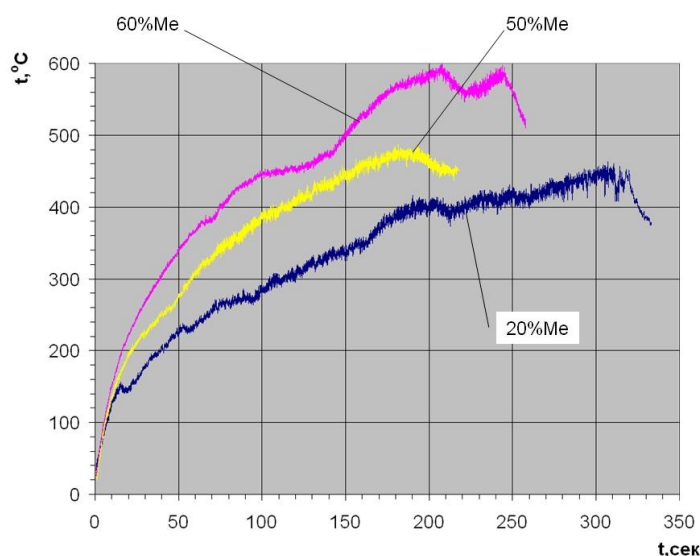


Рисунок 5 – Термограмма напыления механокомпозита

Как видно из термограмм температура нагрева основы лежит в пределах 450..600°C.

Анализ результатов оптической микроскопии показал, что детонационное покрытие имеет сложную структуру (рисунок 6), состоящую из скоплений зерен TiC размером порядка 5–10 мкм локализованных в областях 20–60 мкм, неравномерно распределенных по объему материала покрытия. Четко очерчена граница раздела основы и покрытия.

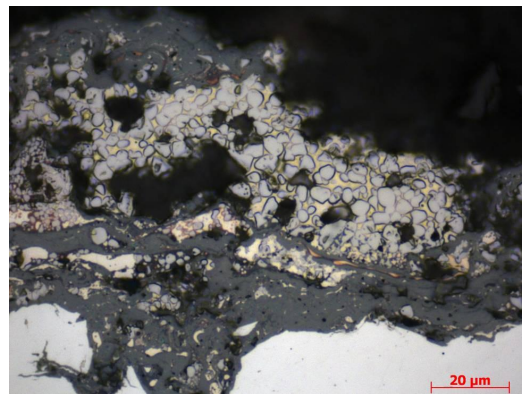
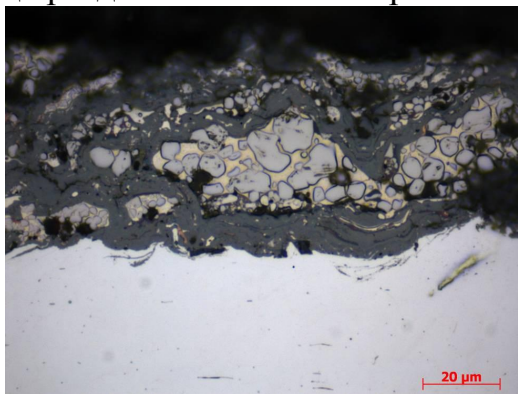


Рисунок 6 – Шлиф поперечного среза покрытия TiC+30%NiCr

На рисунке 7 наблюдается более равномерная слоистая структура. Карбидные зерна размером в 1–2 мкм расположены локализовано (размер области 20–100 мкм).

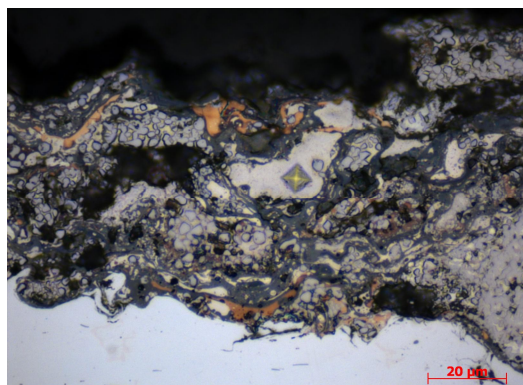
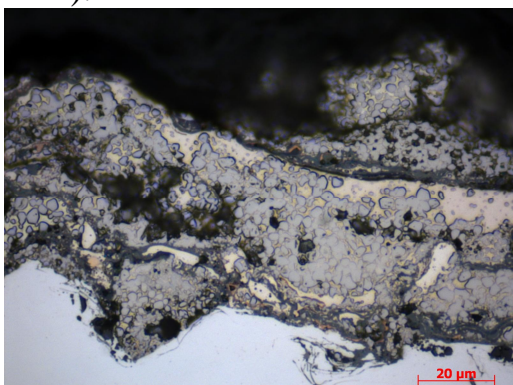


Рисунок 7 – Шлиф поперечного среза покрытия TiC+50%NiCr

Анализ результатов полученных методами сканирующей электронной микроскопии, растровой электронной микроскопии, спектрального микроанализа, оптической микроскопии показывает, что в процессе напыления механокомпозита не происходит изменения химического состава механокомпозита. Структурные изменения в материале наблюдаются в сторону уменьшения размера карбидного зерна с увеличением степени разбавления металлом связки.

Рассмотренные 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, в которых создаются чрезвычайно большие контактные поверхности между исходными компонентами и идеальные контакты, способствующие преодолению диффузионных затруднений. Процесс детонационного напыления покрытия из синтезированных

механокомпозитов не приводит к существенному изменению структуры наносимого материалов. Поэтому основным управляющим фактором, который в наибольшей мере может удовлетворять служебным свойствам детонационных покрытий является степень разбавления механокомпозита металлом матрицы.

В пятой главе представлены экспериментальные исследования физико-механических свойств покрытий. Установлено влияние степени разбавления карбидной фазы металлической матрицей на микротвердость нанесенного покрытия, на прочность сцепления покрытия с основой, износ покрытий. Разработаны технологические рекомендации по получению износостойких детонационных покрытий из механоактивированного композита на основе TiC.

Для детонационных покрытий с различной степенью разбавления случайным образом произведено по 50-100 измерений микротвердости поверхности образца. С целью определения вида закона распределения микротвердости покрытий с разным процентным содержанием металлической матрицы построены гистограммы распределения микротвердости.

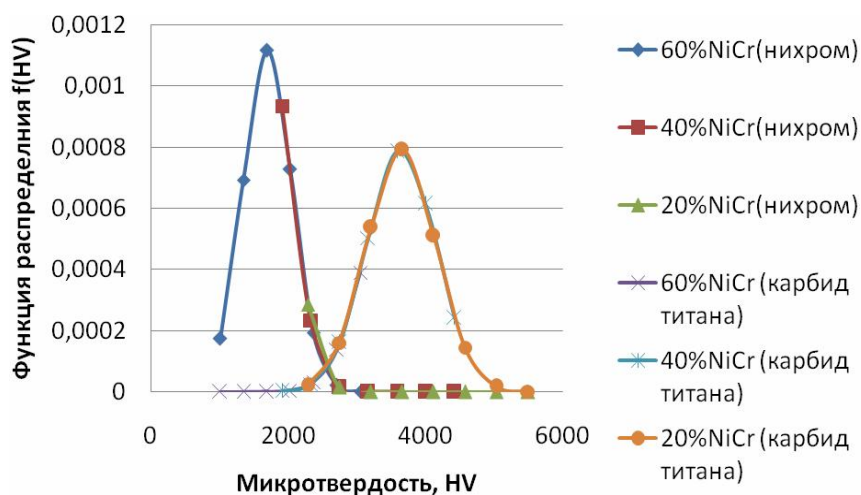


Рисунок 8 – Распределение микротвердости покрытия из механокомпозита

Из анализа гистограмм сделано предположение о том, что происходит наложение двух функций распределения, каждое из которых имеет вид нормального закона распределения (рисунок 8). Таким образом, распределение микротвердости покрытия определяем следующей зависимостью:

$$f(\varepsilon) = \alpha f_1(\bar{\varepsilon}_1, \sigma_1) + (1 - \alpha) f_2(\bar{\varepsilon}_2, \sigma_2), \quad (1)$$

где $f_1(\bar{\varepsilon}_1, \sigma_1)$ – нормальный закон распределения микротвердости металлической матрицы; $f_2(\bar{\varepsilon}_2, \sigma_2)$ – нормальный закон распределения микротвердости карбида титана.

Сочетание нормальных законов распределения микротвердости NiCr и TiC

$$f(\varepsilon) = \alpha f_1(1779; 402) + (1 - \alpha) f_2(3503; 657), \quad (2)$$

где α – коэффициент, характеризующий процентное содержание NiCr, $f_1(\varepsilon)$ – нормальный закон распределения микротвердости NiCr, $f_2(\varepsilon)$ – нормальный закон распределения микротвердости TiC.

Функция распределения микротвердости аппроксимирована сигмоидальной зависимостью:

Методом наименьших квадратов были рассчитаны коэффициенты сигмоидальной функции в зависимости от процентного содержания металлической матрицы. Полученная зависимость имеет вид:

$$HV(\%) = 1779 + \frac{1724,52}{1 + e^{0,1(\% - 50)}}, \quad (3)$$

Далее рассчитываются доверительные интервалы по формуле:

$$\varepsilon_{cp} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t(\alpha, n - 1) < M < \varepsilon_{cp} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t(\alpha, n - 1), \quad (4)$$

где M – математическое ожидание, n – количество наблюдений выборки, α – вероятность, соответствующая двухстороннему распределению Стьюдента ($\alpha = 0,05$), σ – среднеквадратическое отклонение, t – распределение Стьюдента.

Средняя относительная погрешность аппроксимации составила 7,5 %.

Для контроля прочности сцепления проводились испытания образцов с пятью видами покрытий из композиционных материалов. Покрытия отличаются друг от друга процентным содержанием металлической матрицы - 20%, 30%, 40%, 50%, 60%. В результате экспериментов установлено, что в случае разбавления карбидной фазы композита 20%, 30% и 40% металлической матрицей прочность сцепления покрытия с основой существенно не изменяется, и равна соответственно 22 МПа, 21 МПа, 21 МПа.

При этом следует отметить рост прочности сцепления покрытия с основой при увеличении содержания металлической матрицы до 27 МПа при 50%NiCr и до 36 МПа при 60%NiCr.

Экспериментальные исследования изменения весового износа покрытий проводились с использованием специально изготовленных образцов, представляющих собой пару «вал – втулка». Покрытие толщиной 0,2 мм наносилось на колодку, изготовленную из стали 40. Перед нанесением покрытия колодка притиралась по диску до формирования пятна контакта по всей площади колодки. После нанесения покрытия для снижения шероховатости рабочие поверхности и подвергались предварительной алмазно-абразивной обработки до значения $R_a = 1,25$ мкм. Сила прижима колодки P , Н – 190, 380, 570, 760, 950. Окружная скорость V , м/с – 0,2, 0,5, 1.

Для построения регрессионной модели весового износа проверялось мультипликативное влияние факторов. В результате расчетов получена зависимость:

$$\Delta m = 5,47 \cdot 10^{-6} \cdot V^{0,07} \cdot (0,1 + 0,36 \cdot P) \cdot (0,85 + 0,307 \cdot Me\%), \quad (5)$$

Адекватность полученной регрессионной зависимости подтверждалась критерием Фишера.

В результате проведенных исследований разработан технологический процесс получения механокомпозитов. Варьированием содержания металлической матрицы в СВС-композите можно удовлетворять требованиям, предъявляемым к защитным покрытиям. Стоимость изготовленных деталей из СВС-механокомпозитов исследованного состава в 2–2,5 раза ниже по сравнению с твердыми сплавами на основе карбида вольфрама. Для сушки порошка разработана вращающаяся печь специальной конструкции (патент КЗ № 36850). Печь обеспечивает интенсификацию процесса теплопередачи, что дает возмож-

ность снизить время подготовки порошковой смеси. Так же предложена конструкция мельницы для тонкого измельчения материалов (патент KZ № 36569), которая позволяет повысить эффективность механоактивационной обработки порошковых смесей.

Нанесение износостойких покрытий детонационно-газовым способом на поверхность узла загрузки-выгрузки грохота производства фирмы «Kroosh» позволило увеличить срок эксплуатации элементов. Технология принята к внедрению в ТОО «Satpayevsk Titanium Mines Ltd» г. Усть-Каменогорск, экономический эффект составляет 171000 руб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Скорость фронта горения в СВС механоактивированной системе карбид титана – наплавочный порошок (матрица) уменьшается от 6 до 1 мм/с при содержании металлической матрицы в шихте в пределах 10...50 мас.%. Увеличение содержания металлической матрицы в механокомпозите приводит к уменьшению температуры горения при данных пределах разбавления на 500⁰С. В результате реакции СВС в механокомпозите гарантировано синтезируется стехиометрический карбид титана в указанном диапазоне разбавления. При увеличении содержания металлической матрицы более 50 мас.% в механокомпозите реакция синтеза носит неустойчивый характер. Разбавление карбидной составляющей металлической матрицей является эффективным приемом регулирования тепловой активности шихты в процессе СВС.

2. Экспериментально установлена зависимость времени активации компонентов шихты с металлической матрицей на скорость и температуру фронта горения. При изменении времени механической активации в интервале от 3 до 20 минут выяснено, что до 10 минут предварительной активации, происходит увеличение скорости и температуры реакции, дальнейшее увеличение времени механоактивационной обработки вклада в реакционную способность шихты не вносит.

3. Детонационное покрытие из СВС-механокомпозита имеет сложную структуру, состоящую из скоплений зерен TiC локализованных в областях, которые равномерно распределены в объеме покрытия. По результатам анализа экспериментальных данных установлено, что в процессе напыления механокомпозита химический состав материала не изменяется. Структурные изменения в материале происходят в сторону уменьшения размера карбидного зерна с увеличением степени разбавления металлом связки. Это связано с увеличением теплопроводности материала покрытия за счет увеличения объема материала матрицы.

4. В результате статистической обработки данных установлено, что распределение значений микротвердости в покрытии, состоящем из карбида титана и металлической матрицы, подчиняется нормальному закону и носит двухмодальный характер. Это обусловлено тем, что при напылении не происходит химической реакции в порошковой смеси, и закон распределения микротвердости един для любого содержания компонентов в покрытии.

Получена зависимость микротвердости покрытия из композиционного материала от степени разбавления карбидной фазы металлической матрицей. Относительная погрешность аппроксимации составила 7,5 %.

5. Экспериментально установлено, что увеличение степени разбавления композита металлической матрицей приводит к росту прочности сцепления детонационного покрытия с основой. Прочность сцепления покрытия с основой увеличивается с 21 МПа при 20 масс.%NiCr до 36 МПа при 60 масс.%NiCr. Это может быть связано с релаксацией термических внутренних напряжений при формировании слоя покрытия за счет увеличения объема металлической матрицы.

6. В результате трибологических исследований установлено, что с увеличением процентного содержания металлической матрицы от 20 до 60 масс.% в покрытии весовой износ в условиях сухого трения при нагрузке в 950 Н увеличивается почти в 2 раза. Сравнительные испытания образцов с напыленным покрытием и образцов из закаленной стали (сталь 40X) показали, что износ образцов с покрытием в 8–10 раз меньше. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований позволила получить зависимость весового износа от окружной скорости, силы прижима колодки к контртелу и процентного содержания металлической матрицы в композиционном материале.

7. Разработана конструкция мельницы для тонкого измельчения материалов (патент KZ № 36569), которая позволяет повысить эффективность механоактивационной обработки порошковых смесей.

8. Нанесение износостойких покрытий детонационно-газовым способом на поверхность узла выгрузки грохота производства фирмы «Kroosh» позволило увеличить срок эксплуатации элементов и получить экономический эффект 170929 руб. Технология принята к внедрению в ТОО «Satpayevsk Titanium Mines Ltd» г. Усть-Каменогорск.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в изданиях рекомендованных ВАК

1. **Ситников, А.А. Термодинамический анализ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в многокомпонентных смесях** [Текст] / А.А.Ситников, В.И.Яковлев, А.С.Семенчина, Е.А.Сартакова, Д.М.Скаков// Ползуновский вестник. - 2009. - №1. - С.132-138.

2. **Филимонов, В.Ю. Экспериментальная методика исследования критических режимов твердофазного горения при наличии инертного компонента** [Текст] / В.Ю.Филимонов, Д.М.Скаков, А.В.Афанасьев, А.А.Ситников, В.И.Яковлев, И.В.Барышников, С.В.Терёхин // Ползуновский вестник. – 2009. - №2. - С.139-143.

3. **Филимонов, В.Ю. Особенности твердофазного взаимодействия в механически активированной системе Ti + C + xNi в режиме динамического теплового взрыва** [Текст] / В. Ю.Филимонов, В.В.Евстигнеев, М.А.Корчагин, Д.М.Скаков// Перспективные материалы. – 2009. - №4. - С.79-84.

Публикации в других изданиях

4. **Евстигнеев, В.В. Исследование теплоэнергетических параметров га-**

зодисперсного потока [Текст] / В.В.Евстигнеев, А.Е.Жакупова, В.Ю.Филимонов, В.И.Яковлев, Д.М.Скаков // Вестник Карагандинского университета, серия физика. – 2007. - №3(47). - С.29-33.

5. **Евстигнеев, В.В. Механохимия карбида вольфрама** [Текст] / В.В.Евстигнеев, В.И.Яковлев, Д.М.Скаков// Сборник тезисов докладов VI Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 4-7 июня 2007 г., Алматы, Казахстан. 2007. - С.324-325.

6. **Филимонов, В.Ю. Твердофазный синтез в предварительно активированных порошковых смесях** [Текст] / В.Ю.Филимонов, В.В.Евстигнеев, В.И.Яковлев, М.А.Корчагин, Д.М.Скаков// Сборник материалов I Международной научной конференции Казахстан- Россия- Япония «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 24-25 июня 2008г., Усть-Каменогорск, изд.ВКГТУ - 2008. - С.481-485.

7. **Круш, И.Применение технологии KROOSH для процессов разделения сыпучих материалов и полидисперсных суспензий** [Текст] / И.Круш, Д.Борохович, Г.Косой, Д.Скаков // Сборник материалов I Международной научной конференции Казахстан- Россия- Япония «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 24-25 июня 2008 г., Усть-Каменогорск, изд.ВКГТУ. - 2008. - С.583-590.

8. **Ситников, А.А. Определение критических условий по нагреву шихты для высокотемпературного синтеза механокомпозитов состава Ti+C+Me(NiCr) в условиях объёмного воспламенения** [Текст] / А.А.Ситников, В.И.Яковлев, Д.М.Скаков// Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», 21-22мая 2009 г., Юрга, изд-во ТПУ. – 2009. - С.151-154.

9. **Ситников, А.А. Нанесение защитных антикавитационных покрытий на гильзы цилиндров двигателей** [Текст] / А.А.Ситников, В.И.Яковлев, Д.М.Скаков//67-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета, посвященная 200-летию транспортного образования в России. Часть 2/ Алт. гос. техн.ун-т им.И.И.Ползунова. - Барнаул: изд-во АлтГТУ. – 2009. - С.80-83.

Патенты

10. **Вращающаяся печь с наружным обогревом** [Текст]: пат. KZ № 36850./ Е.А.Дрозд, М.К.Скаков, А.Е.Дрозд, Д.М.Скаков. Оpubл. бюл. №6, 2003.

11. **Мельница для тонкого измельчения материалов** [Текст]: пат. KZ № 36569. / Е.А.Дрозд, М.К.Скаков, А.Е.Дрозд, Д.М.Скаков. Оpubл. бюл. №6, 2003.