

На правах рукописи

СОБАЧКИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ ПРИ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ситников Александр Андреевич
- Официальные оппоненты: **Корчагин Михаил Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории химического материаловедения
- Иванайский Виктор Васильевич**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный аграрный университет», доцент кафедры технологии конструкционных материалов и ремонта машин
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «5» декабря 2013 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «1» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Иванцовский В. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Поверхностные слои многих рабочих органов сельскохозяйственной техники в процессе эксплуатации подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию, в результате чего оборудование преждевременно выходит из строя. Существующие способы увеличения срока службы рабочих органов либо являются чрезвычайно дорогостоящими (например, технология французской фирмы «*Agri Carb*» по получению защитных пластин из спеченного карбида вольфрама), либо не обеспечивают существенного увеличения долговечности деталей (например, индукционная наплавка на Рубцовском заводе запасных частей). Рациональное решение отмеченной проблемы заключается в создании новых материалов покрытий, отвечающих требованиям эксплуатации реальных изделий в условиях воздействия внешней среды.

К числу материалов, обладающих высоким комплексом прочностных и триботехнических свойств и пригодных для получения износостойких покрытий деталей сельскохозяйственных машин ответственного назначения, могут быть отнесены материалы, полученные с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В последнее время эта технология получила существенное развитие как в российских (ИСМАН, ИХТИМ СО РАН, ИФПМ СО РАН, МИСиС), так и в зарубежных лабораториях (*Lamar University, University of Notre Dame, Institute for Energetics and Interphases, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*).

Одно из принципиально новых направлений в получении защитных износостойких покрытий основано на использовании предварительной механоактивации порошковых компонентов для высокотемпературного синтеза композиционных порошковых материалов, а также на их применении для дуговой наплавки поверхностных слоев.

Поскольку рабочие органы сельскохозяйственной техники работают в абразивной среде, испытывая значительные динамические нагрузки, то на их поверхности необходимо формировать износостойкие покрытия, обладающие высоким уровнем ударной вязкости. Указанными свойствами обладают металлокерамические сплавы, содержащие карбиды титана TiC , кремния SiC и вольфрама WC . В работах С. Ф. Гнусова, К. С. Гнусова, М. А. Корчагина, Д. М. Скакова, М. Е. Татаркина показана перспективность применения в таких сплавах в качестве металлического связующего самофлюсующихся сплавов системы $Ni-Cr-B-Si-C$, обеспечивающих высокий уровень износостойкости наплавленных покрытий и препятствующих проявлению межкристаллитной коррозии, вызываемой условиями работы деталей сельскохозяйственных машин.

Применение механической активации исходных порошковых компонентов и их смесей позволяет синтезировать композиционные материалы, содержащие разнородные карбидные соединения. Исследований, посвященных изучению особенностей формирования структуры и свойств покрытий при электродуговой наплавке композиционных материалов, полученных с применением СВС-технологии, недостаточно, что в значительной степени определяет актуальность темы диссертационной работы.

Исследования по теме диссертационной работы выполнялись:

– в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт №14.740.12.0858, соглашение №14.В37.21.0253, соглашение №14.В37.21.0051);

– при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе У.М.Н.И.К.

Степень разработанности темы исследования

Проблеме повышения срока службы деталей сельскохозяйственного машиностроения посвящены труды Г. П. Иванова, В. Н. Ткачева, М. М. Тененбаума, А. И. Сидорова, А. В. Ишкова, В. В. Иванайского, Н. Т. Кривочурова и др. специалистов. В частности, в этих работах рассматривались процессы формирования износостойких слоев путем индукционной наплавки твердых сплавов с предварительным борированием поверхности изделий. Однако, наличие структурной неоднородности по сечению покрытий, остатки флюса в наплавленных слоях и наличие явно выраженных границ раздела с основным металлом обуславливает преждевременный износ рабочих органов сельхозмашин, упрочненных по технологии индукционной наплавки.

В последние годы значительный вклад в обоснование процессов, происходящих при синтезе соединений в предварительно механоактивированных порошковых системах, внесли Н. З. Ляхов, П. А. Витязь, Т. Л. Талако, Т. Ф. Григорьева, М. А. Корчагин, В. Ю. Филимонов и др. В работах этих специалистов отражено влияние механоактивации исходных порошковых компонентов на синтез и структуру получаемых композиционных материалов, а также рассмотрены особенности формирования упрочняющих фаз в объеме инертных матриц.

Возможность равномерного распределения упрочняющих фаз в структуре материала еще на стадии создания порошковых композитов обеспечивают технологии СВС химических соединений в механически активированных порошковых системах. Процессы механической активации реагирующих порошковых смесей, включающих матричный материал, и СВ-синтеза позволяют получать композиционные материалы с более равномерным распределением синтезированных карбидных частиц по объему металлического связующего при повышенной глубине превращения по сравнению с механической смесью порошков.

Цели и задачи

Цель работы – повышение комплекса механических и триботехнических свойств деталей сельскохозяйственных машин при использовании технологии электродуговой наплавки износостойких покрытий из композиционных СВС-порошков типа «карбиды титана, кремния, вольфрама – металлическая матрица».

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

1. Исследовать структуру и фазовый состав композиционного материала «карбидные частицы – матрица», полученного по технологии СВС с использованием механически активированных смесей.

2. Исследовать структуру, фазовый состав и механические свойства поверхностных слоев сталей, модифицированных по технологии электродуговой наплавки одно- и многокарбидной смесью СВС-механокомпозитов.

3. Установить зависимости между содержанием и типом карбидной фазы в наплавленных покрытиях и механическими свойствами поверхностно упрочненных слоев.

4. Обосновать выбор состава исходных порошковых смесей на основе одно- и многокарбидных СВС-механокомпозитов и разработать рекомендации по технологическим режимам наплавки композиционных покрытий.

Научная новизна

1. Обосновано эффективное решение проблемы формирования износостойких композитных СВС-покрытий, предназначенных для изготовления деталей сельскохозяйственной техники, подверженных интенсивному изнашиванию. Разработаны многокарбидные СВС-механокомпозиты, представляющие собой новые композиционные материалы со структурой типа «упрочняющая фаза – матрица». Применение составов « $TiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + WC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)$ » позволяет с помощью порошкового электрода сформировать износостойкое покрытие на деталях сельскохозяйственного машиностроения.

2. Установлено, что при модифицировании поверхностных слоев стальных изделий по технологии наплавки порошков типа « $TiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + WC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)$ », в формируемых покрытиях выделяются карбиды всех перечисленных фаз правильной и неправильной формы, а по границам зерен матричного материала образуется карбидная эвтектика, что приводит к повышению механических свойств и показателей износостойкости деталей сельскохозяйственного машиностроения.

3. Установлено, что показатели износостойкости покрытий зависят от типа карбидов, присутствующих в составе наплавочной смеси. Максимальной износостойкостью обладают образцы, модифицированные по технологии электродуговой наплавки с использованием смеси состава «15 % $TiC + 5\% WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3$ ». Наиболее высокий уровень ударной вязкости упрочненных материалов достигнут при использовании наплавочных смесей, содержащих частицы карбида вольфрама.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Получены зависимости, позволяющие прогнозировать поведение СВС-механокомпозитов при реализации процессов наплавки и получать покрытия с заданным комплексом свойств.

2. Результаты диссертационной работы применяются в деятельности ООО «Технологии упрочнения» и ООО «Сварсибтехинновации», связанной с производством поверхностно упрочненных деталей сельскохозяйственных машин и элементов интенсивно изнашиваемых конструкций.

3. Результаты выполненных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» при подготовке специалистов по специальности «Наземные

транспортно-технологические средства» и по направлению подготовки магистров «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Методология и методы исследования

Экспериментальные исследования по теме диссертации выполнялись с использованием современных методов и аналитического оборудования (оптический микроскоп *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*, растровый электронный микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, дифрактометры *ARL X'TRA*, ДРОН-6), технологического оборудования, лабораторных установок и соответствующих методик проведения экспериментов, дающих адекватные результаты. Механическую активацию порошковых смесей осуществляли с использованием планетарной шаровой мельницы АГО-2С. Наплавку выполняли с использованием инверторного источника питания ТИТАН-ВС-220А.

На защиту выносятся:

1. Наплавочные СВС-механокомпозиты со структурой типа «упрочняющая фаза – матрица», в том числе материалы « $TiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + WC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)$ », предназначенные для модифицирования поверхностных слоев деталей сельскохозяйственной техники с использованием технологии электродуговой наплавки.

2. Результаты экспериментальных исследований структуры, фазового состава и механических свойств покрытий на основе порошков СВС-механокомпозитов, полученных в процессе электродуговой наплавки.

3. Технологические режимы нанесения покрытий на основе СВС-композиционных материалов.

4. Зависимости, позволяющие прогнозировать поведение СВС-механокомпозитов при реализации процессов наплавки и получать покрытия с заданным комплексом свойств.

Степень достоверность и апробация результатов работы

Достоверность и обоснованность экспериментальных данных, полученных в диссертационной работе, обеспечивается проведением исследований с использованием современного аналитического и технологического оборудования, применением комплексных методов исследования структуры материалов и их механических свойств, а также применением статистических методов обработки результатов экспериментов.

Основные положения и результаты работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», Новосибирск, 2012, 2013 гг.; на I Всероссийском конгрессе молодых ученых, Санкт-Петербург, 2012 г.; на XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2012 г.; на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь», г. Барнаул, 2011-2013 гг.; на XII Всероссийской школе-семинаре с международным участием «Новые материалы. Создание, структура, свойства», Томск, 2012 г.; на Международной молодежной конференции «Инновации в машиностроении», Юрга, 2012 г.; на Всероссийской научно-технической конференции с международным

участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы», Бийск, Усть-Сема, 2012 г.; на VI научно-технической интернет-конференции с международным участием «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении», Тюмень, 2012 г.; на IV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», Юрга, 2013 г.; на VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», Киев, Украина, 2013 г.; на XIV Международной научной конференции «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов», Ченстохова, Польша, 2013 г.; на IV Международной конференции «Фундаментальные основы механохимических технологий», Новосибирск, 2013 г.

Публикации: по теме диссертационного исследования опубликовано 29 печатных научных работ, из них: 6 статей в российских рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 статья в зарубежном издании, 2 – в других журналах, 20 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических и научно-практических конференций. В автореферате приведен список из 20 основных публикаций.

Объем и структура работы: диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 142 страницах основного текста, включая 57 рисунков, 21 таблицу. Список литературы состоит из 199 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертационного исследования, дана общая характеристика работы, изложены цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость основных направлений проведенных исследований.

В первом разделе «Анализ проблемы модифицирования поверхностных слоев изделий. Цель и задачи исследования» представлена краткая справка о способах придания поверхностным слоям изделий особых свойств, проведен анализ материалов, используемых для модифицирования поверхностных слоев деталей машин. Отмечено, что для наплавки износостойких покрытий перспективным является применение СВС-механокомпозитов.

Во втором разделе «Оборудование и методы исследований» приводится обоснование выбора материалов, используемых для получения экспериментальных электродов, анализируется оборудование и методы реализации механически активируемого СВС, а также аналитическое оборудование и методы, используемые для исследования порошковых материалов и наплавленных покрытий.

В качестве исходных материалов для получения порошковых наплавочных смесей использовали порошки титана марки ПТМ, углерода марки ПМ-15, вольфрама марки ПВ-1, кремния марки КР-1. Функцию металлической связи (матричного материала) выполнял самофлюсующийся наплавочный порошок марки ПР-Н70Х17С4Р4-3. Фракционный состав всех исходных порошковых компонентов находился в пределах (63...100) мкм. Выбранные компоненты

смешивались в требуемых соотношениях. Полученная порошковая смесь подвергалась механической активации. Выбор данного способа воздействия на материалы обусловлен необходимостью создания композитов, в микрообъемах которых должна происходить реакция СВС.

Механическую активацию порошковых смесей проводили в планетарной шаровой мельнице АГО-2С с водяным охлаждением при интенсивности размола 400 м/с^2 . Время первичной механоактивации смеси составляло 30 с, 60 с, 90 с, 120 с, 150 с, 180 с. Приведенные параметры процесса определялись на основании предварительного анализа.

СВС проводили на образцах насыпной плотности в условиях фронтального осуществления синтеза. Поджигание реагирующего состава осуществлялось локальным источником нагрева.

Реакционные смеси после механической активации, продукты СВС и продукты СВС после дополнительной механоактивации исследовались методами рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии с локальным микроанализом химического состава. Рентгенофазовый анализ образцов проводили с использованием дифрактометров *ARL X'TRA* и ДРОН-6. Дифрактограммы снимались с шагом сканирования $0,05$ градуса и временем экспозиции в каждой точке, равным 3 с. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью пакета программ *PDWin*, предназначенного для автоматизации процесса обработки рентгенограмм.

Дуговая наплавка осуществлялась на заготовки из стали 45 за один, два и три прохода. Наплавку выполняли с использованием инверторного источника питания ТИТАН-ВС-220А.

Наплавочную смесь получали по следующей технологии:

- смешивание и механоактивация порошков *Ti/Si/W, C* и матричного материала; для осуществления реакции синтеза карбидов массовое содержание матричного материала составляло 30 %;
- самораспространяющийся высокотемпературный синтез карбидов;
- смешивание и механоактивация композита, полученного на первом этапе, и дополнительного количества матричного материала.

Без введения дополнительного количества матричного материала композит, полученный на первом этапе, не обеспечивает сварочно-технологических свойств электрической дуги и качественной наплавки валиков.

Наплавка проводилась специально изготовленными трубчатыми электродами, содержащими наплавочные смеси следующего состава:

- состав № 1: 10 % *TiC* + ПР-Н70Х17С4Р4-3;
- состав № 2: 20 % *TiC* + ПР-Н70Х17С4Р4-3;
- состав № 3: 30 % *TiC* + ПР-Н70Х17С4Р4-3.
- состав № 4: 15 % *TiC* + 5 % *SiC* + ПР-Н70Х17С4Р4-3;
- состав № 5: 15 % *TiC* + 5 % *WC* + ПР-Н70Х17С4Р4-3;
- состав № 6: 15 % *TiC* + 5 % *SiC* + 5 % *WC* + ПР-Н70Х17С4Р4-3.

Процентное соотношение компонентов электродной шихты было выбрано на основании ранее проведенных исследований с учетом опыта других авторов,

выполнявших исследования по созданию композиционных материалов подобного функционального назначения.

Структуру модифицированных слоев изучали на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*. Морфологию наплавленных покрытий исследовали на растровом электронном микроскопе *EVO 50 XVP* фирмы *Carl Zeiss*, снабженном микроанализатором *EDS X-Act (Oxford Instruments)* с *Si-drift* детектором.

Твердость анализируемых покрытий оценивали с использованием микротвердомера *Wolpert Group 402MVD*. Износостойкость наплавленных покрытий определяли по ГОСТ 17367-71 с использованием машины трения. Критерием износостойкости являлась величина относительного весового износа. Испытания наплавленных материалов на ударный изгиб проводили по ГОСТ 6996-66 с использованием образцов типа IX, имеющих V-образные надрезы.

Третий раздел диссертационной работы «Структура и свойства покрытий, полученных электродуговой наплавкой одно- и многокарбидных смесей СВС-механокомпозитов» посвящен исследованию морфологии и особенностей структурных преобразований СВС-механокомпозитов в процессе электродуговой наплавки, а также определению механических и триботехнических свойств полученных покрытий.

Исследование структуры порошковых смесей проводилось в несколько этапов. На рисунке 1, а представлена морфология исходных компонентов порошковой терморреагирующей смеси «*Ti + C + (Ni-Cr)*». Соотношение компонентов *Ti* и *C* в смеси является эквимольным, чтобы в результате последующей СВС-реакции происходил синтез карбида титана стехиометрического состава. При этом для обеспечения гарантированного развития СВС-реакции массовая доля инертной матрицы (*Ni-Cr*) составляла 30 %. После механоактивации порошковой смеси в течение 90 с образуются крупные конгломераты будущих механокомпозитов (рисунок 1, б). Пластически деформированная (*Ni-Cr*) матрица плакирует поверхность композита. Увеличение времени механоактивации до 180 с приводит к уплотнению конгломератов (рисунок 1, в). Одновременно происходит их дробление на более мелкие фрагменты, многие из которых имеют пластинчатую форму.

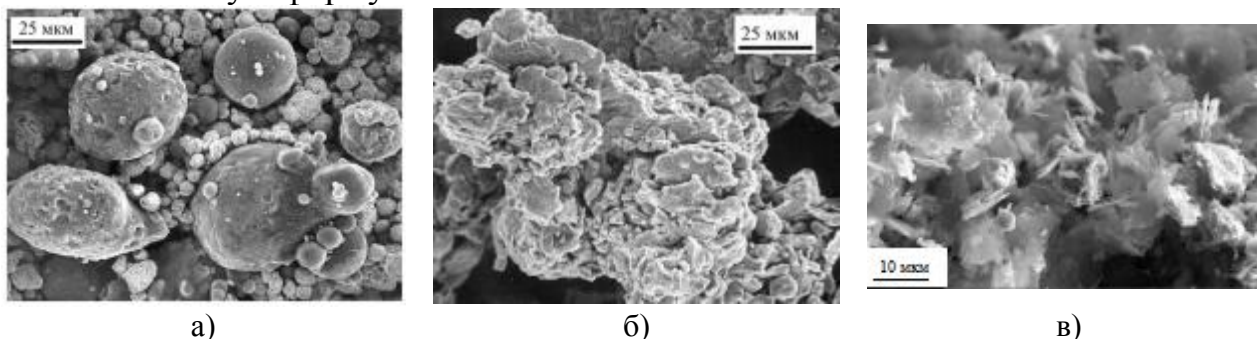


Рисунок 1 – Морфология порошковых смесей: а) смесь исходных компонентов, б) после 90 с механоактивационной обработки, в) после 180 с механоактивационной обработки

В полученной смеси («*Ti + C*» (70 % масс.) + (*Ni-Cr*) (30 % масс.)) реализуется процесс СВС, обеспечивающий синтез карбида титана в инертной (*Ni-Cr*) матрице. Существующие на сегодняшний день представления о механизмах

структурообразования в системе « $Ti + C$ » основываются на присутствии в смеси жидкой фазы (расплава титана). Практический интерес представляет возможность низкотемпературного (по отношению к температуре воспламенения) твердофазного синтеза в указанной системе в присутствии инертной матрицы. Синтез такого рода осуществлялся в режиме фронтального послойного горения смеси. В результате реакции синтезируется композит типа « $TiC + (Ni-Cr)$ » с долей матричного материала, равной 30 %. РЭМ-изображения и результаты спектрального анализа синтезированного в матрице карбида титана представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

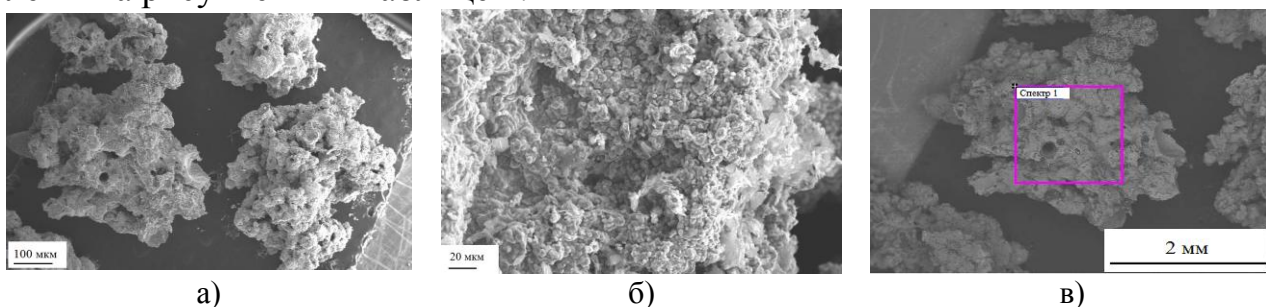


Рисунок 2 – Морфология композита $TiC + (Ni-Cr)$ (30 % масс.)

Таблица 1 – Спектральный анализ композиционного материала « $TiC + (Ni-Cr)$ » (30 % масс.) (спектр 1, рисунок 2, в)

Элемент	Весовое содержание %
C	38.4
Ti	37.7
Cr	6.4
Fe	3.6
Ni	10.2

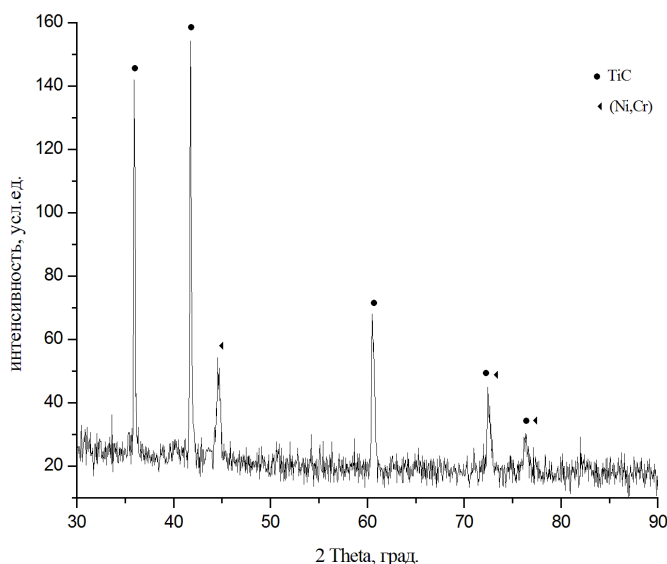


Рисунок 3 – Дифрактограмма продуктов синтеза при содержании матрицы $(Ni-Cr)$ 30 % масс.

в конечном итоге износостойких покрытий содержание упрочняющей фазы в наплавочной смеси должно составлять не более 30 % масс. Для равномерного

Результаты фазового анализа композита $TiC + (Ni-Cr)$ (30 % масс.) отражены на рисунке 3. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в системе « $Ti + C$ » синтез в твердофазном режиме принципиально возможен даже при наличии инертной добавки порошка на основе $(Ni-Cr)$ (при условии предварительной механоактивации трехкомпонентной смеси). В процессе синтеза ведущей стадией является образование карбида титана. Соединений на основе « $Ti - Ni$ » в системе не обнаружено. Аналогичным образом были выполнены исследования по синтезу карбидов вольфрама и кремния в никель-хромовой матрице, свидетельствующие о высокой эффективности процесса.

Экспериментальным путем было установлено, что для электродуговой наплавки и получения

распределения синтезированных частиц упрочняющей фазы в объеме матричного материала предложена и реализована дополнительная операция механической активации. Реализация такой двухступенчатой технологии обеспечивает получение порошковой наплавочной смеси в виде композиционного гетерогенного материала.

Структурные исследование наплавочных смесей с использованием растрового электронного микроскопа показали, что в результате механической активации формируется порошковая смесь, состоящая из мелких частиц субмикронных размеров с ярко выраженной осколочной формой и конгломераты размером (150...200) мкм округлой формы (рисунок 4).

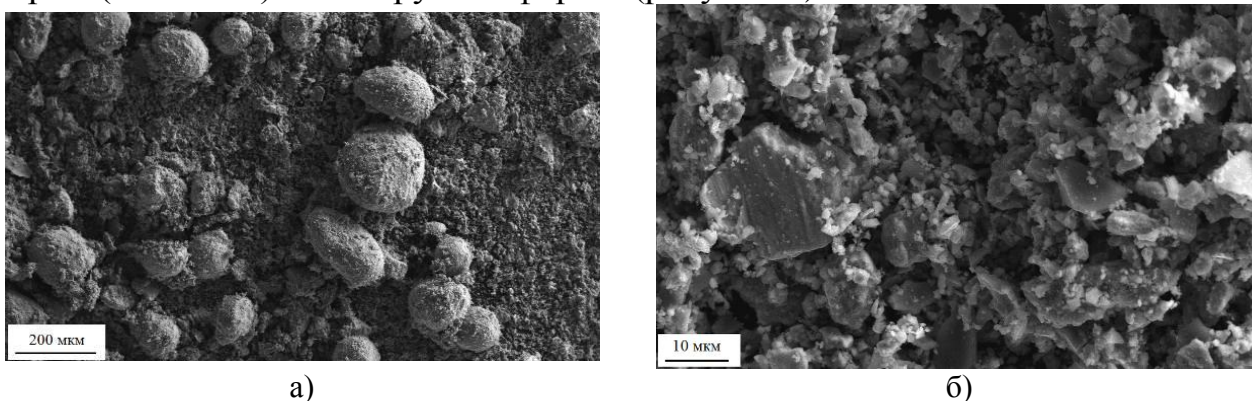


Рисунок 4 – Строение наплавочной смеси состава «15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3»: а) – общий вид наплавочной смеси; б) – морфология поверхности конгломерата

Фазовый анализ синтезированных наплавочных смесей подтверждает присутствие карбидов титана, кремния, вольфрама и матричного материала.

При исследовании покрытий, полученных из порошков механоактивированных СВС-композиатов на основе смеси «20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3», установлено, что в наплавленном слое присутствуют частицы карбидов как правильной ромбической формы, так и неправильной.

Микротвердость покрытия, сформированного при наплавке смеси состава «20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3» на стальную основу, в 2...3 раза превышает микротвердость основного металла и достигает 790 HV . Толщина переходной зоны между наплавленным слоем и основным металлом составляет ~ 300 мкм. Характер распределения микротвердости в поперечном сечении образца является типичным для материалов, подверженных термическому воздействию, реализующемуся в процессе дуговой наплавки.

Структурные особенности и распределение упрочняющей фазы с помощью оптической микроскопии изучали на примере покрытий, сформированных в процессе наплавки на сталь 45 смеси «15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3» (состав № 4). Включения, сформированные в покрытии, являются карбидами TiC и SiC (рисунок 5). Размеры карбидных частиц, распределенных в металлической матрице, варьируются в диапазоне от 1 до 1,5 мкм. Максимальная микротвердость полученных покрытий в 3...4 раза выше по сравнению с основным металлом и составляет 900 HV .

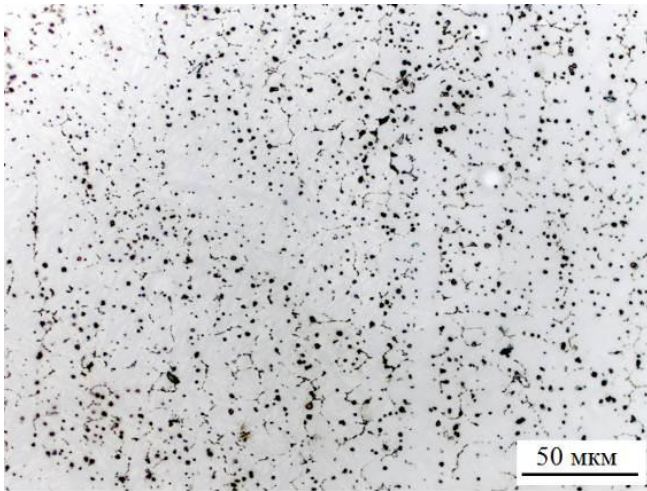


Рисунок 5 – Покрытие, сформированное в процессе наплавки смеси состава «15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3»

смеси № 6 («15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3»), установлено, что использование в составе трех типов карбидов приводит к увеличению доли включений, выделяющихся по границам зерен матрицы (рисунок 6). Максимальное значение микротвердости этого покрытия составляет 1050 HV .

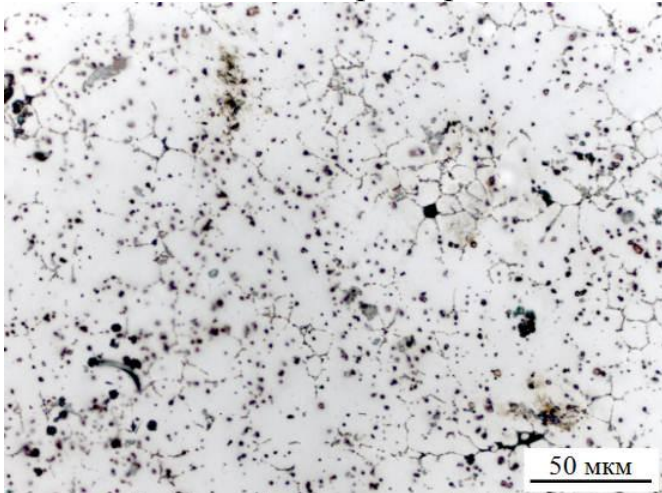


Рисунок 6 – Микроструктура покрытия, полученного наплавкой смеси состава «15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3»

Металлографические исследования образцов после наплавки композиционной смеси «15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3» (состав № 5), показали, что в упрочненном слое выделяются мелкодисперсные единичные включения карбидов титана и вольфрама различной морфологии. Максимальный уровень микротвердости данных покрытий составил 950 HV .

По результатам металлографических исследований образцов с покрытием, полученным при наплавке

смеси № 6 («15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3»), установлено, что использование в составе трех типов карбидов приводит к увеличению доли включений, выделяющихся по границам зерен матрицы (рисунок 6). Максимальное значение микротвердости этого покрытия составляет 1050 HV .

Оценка влияния количества проходов наплавки на объемную долю карбидной фазы в покрытии проводилась на поперечных шлифах образцов, наплавленных соответствующим составом. Определяли эту величину при использовании модуля программы *Axio Vision*, предназначенного для автоматизированного расчета размеров частиц и их объемной доли. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Доля карбидных частиц в наплавленном слое в зависимости от состава порошкового электрода и количества проходов

Состав порошкового электрода	Доля карбидных частиц, %		
	Один проход	Два прохода	Три прохода
10 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	8,8	9,5	10,3
20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	17,6	19,2	23,1
30 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	25,7	29,0	31,9
15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	18,8	19,7	21,4
15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	18,3	18,5	23,8
15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	24,4	25,1	27,6

Установлено, что доля упрочняющей карбидной фазы в наплавленном слое снижается на 1...2 % относительно исходного состава композиционной наплавочной смеси. При увеличении количества проходов наплавки наблюдается

увеличение доли карбидных фаз в полученных покрытиях на 1...4 % за каждый дополнительный проход.

Морфология покрытия, наплавленного смесью состава «20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3» и исследованная с помощью растрового электронного микроскопа, приведена на рисунке 7.

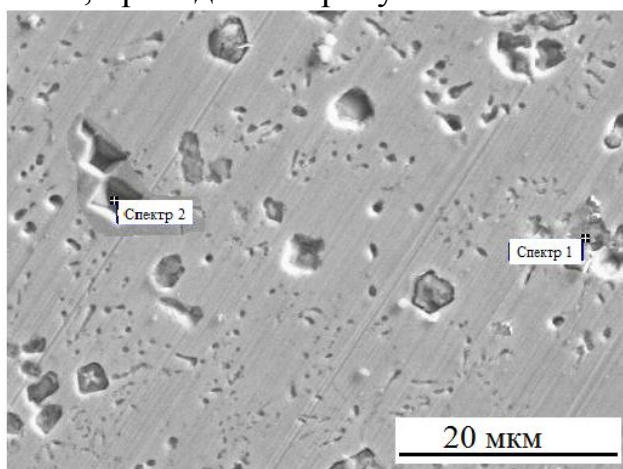


Таблица 3 – Спектральный анализ в микроточке (рисунок 7, спектр 1, 2)

Спектр 1		Спектр 2	
Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %
<i>C</i>	20,4	<i>C</i>	22,1
<i>Ti</i>	19,6	<i>Ti</i>	20,1
<i>Fe</i>	60,0	<i>Fe</i>	54,3

Рисунок 7 – Строение покрытия, наплавленного смесью «20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3»

С использованием микрорентгеноспектрального анализа установлено, что включения правильной и неправильной формы, присутствующие в покрытии, являются карбидами титана (рисунок 7, Спектр 1, Спектр 2). В таблице 3 представлен химический состав частиц в покрытии, полученном наплавкой смеси «20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3». Установлено, что при дуговой наплавке происходит увеличение ультрадисперсных карбидных частиц до субмикронных размеров.

Рисунок 8 дает представления о морфологии карбидов титана и кремния, образовавшихся при модифицировании поверхности изделия наплавкой многокарбидной смеси.

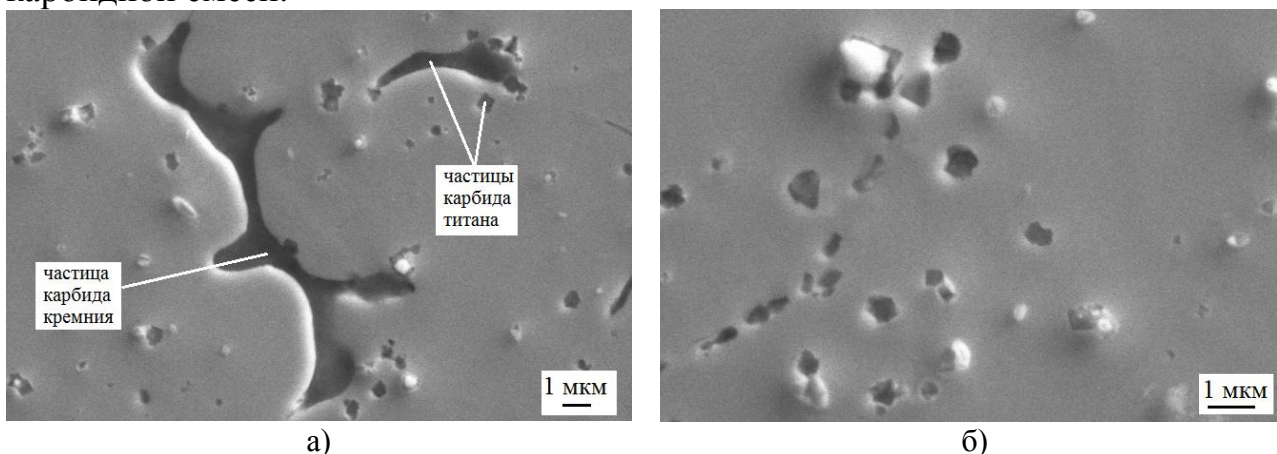


Рисунок 8 – Строение покрытия, наплавленного смесью состава «15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3»: а) карбидные частицы, б) карбидная эвтектика

Карбид титана в наплавленном слое представлен в виде одиночных мелких включений. Включения карбидов кремния имеют неправильную форму и являются более крупными по сравнению с включениями карбида титана (рисунок 8, а) Результаты элементного анализа частиц правильной и неправильной

формы в покрытии, наплавленном смесью состава «15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3», приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Анализ элементного состава слоя, полученного при наплавке смеси 15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3

Частица карбида титана		Частица карбида кремния	
Элемент	% (вес.)	Элемент	% (вес.)
C	25,86	C	12,89
Ti	20,66	Si	8,7
Fe	53,48	Fe	78,41

Для определения размеров карбидных частиц был проведен анализ снимков, полученных методом растровой электронной микроскопии. Установлено, что средний размер частиц карбидов титана и вольфрама составляет ~ 1 мкм. Размеры частиц карбида кремния существенно не отличаются (1,3...1,4 мкм). Распределение размеров карбидных частиц в зависимости от состава наплавляемой смеси представлено на рисунке 9.

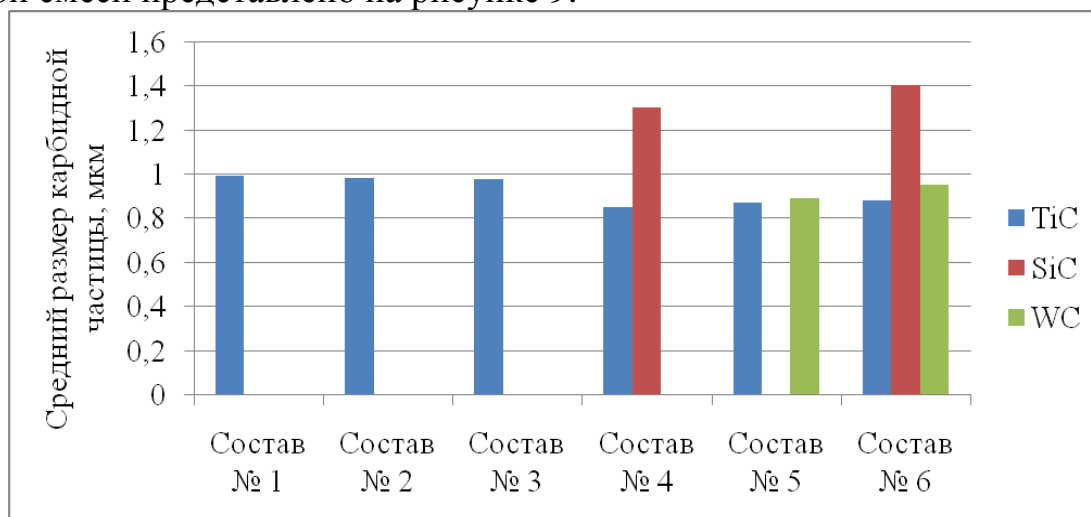


Рисунок 9 – Распределение карбидных частиц по размерам в наплавленном слое: состав № 1 – 10 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; состав № 2 – 20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; состав № 3 – 30 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; состав № 4 – 15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; состав № 5 – 15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; состав № 6 – 15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3.

Распределение значений микротвердости упрочняющей фазы в покрытиях, полученных по технологии электродуговой наплавки многокарбидной смесью, устанавливали следующим образом. На подготовленных шлифах в наплавленном слое выбирали случайные точки (100...150 шт.), в которых измеряли микротвердость. Полученные данные обрабатывали с использованием программы *STATISTICA* и программного комплекса *Microsoft Excel 2010*. Распределение микротвердости по поверхности наплавленного слоя свидетельствует об отсутствии анизотропии механических свойств полученных покрытий. Распределение микротвердости покрытий, полученных при наплавке смесей, содержащих карбидную фазу в металлической матрице, носит бимодальный характер.

Износостойкость покрытий исследовали при трении о закрепленных абразивные частицы в соответствии с ГОСТ 17367-71. Результаты испытаний представлены на рисунке 10.

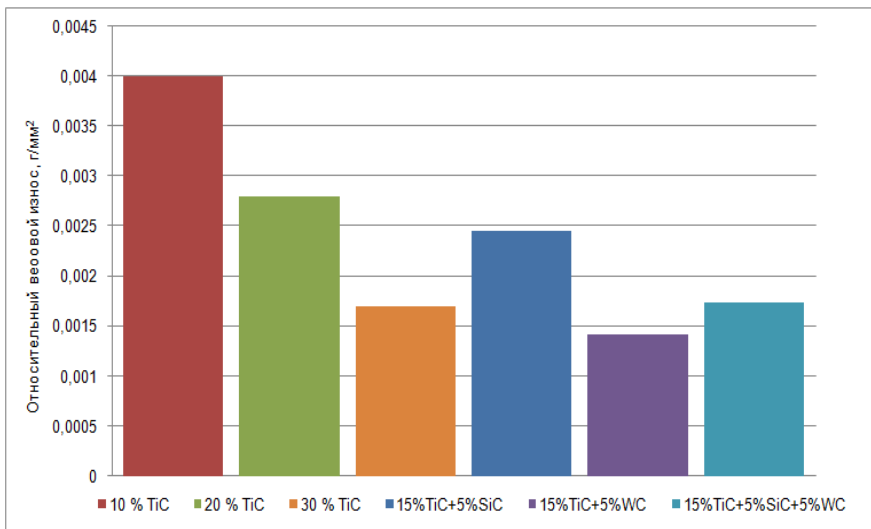


Рисунок 10 – Относительная износостойкость покрытий, полученных при наплавке СВС-механокомпозитов

Установлено, что скорость изнашивания покрытий зависит от объемной доли карбидной фазы в наплавленном слое. Покрытия, полученные при электродуговой наплавке композиционной смеси (15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3) отличаются наибольшим уровнем износостойкости. Для сравнительного анализа износостойкости разработанных материалов была выбрана традиционная технология поверхностного упрочнения конструкционных материалов. Она заключается в индукционной наплавке сормаита с последующей термической обработкой.

Было изготовлено три партии образцов. Первая партия образцов получена индукционной наплавкой порошковой смеси «сормайт – модификаторы», вторая – индукционной наплавкой смеси «сормайт» с последующей закалкой образцов, третья партия – электродуговой наплавкой смеси состава «15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3».

Сравнение результатов триботехнических испытаний наплавленных материалов показали явные преимущества покрытий, наплавленных порошковой смесью разработанного состава (рисунок 11).

Результаты динамических испытаний материалов наплавленных слоев представлены в таблице 5. Максимальным уровнем ударной вязкости (6,2 Дж/см²) обладают слои, полученные при наплавке смеси «15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3».

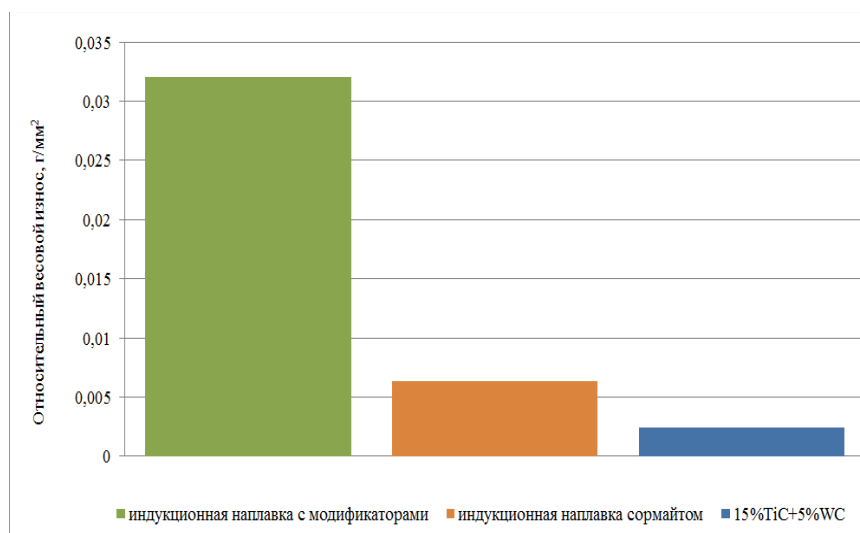


Рисунок 11 – Сравнительное исследование износостойкости

Таблица 5 – Ударная вязкость наплавленных материалов (в соответствии с ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств»)

№ п/п	Модифицирующий состав	Среднее значение KCV , Дж/см ²
1	10 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	4,5
2	20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	3,1
3	30 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	2,1
4	15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	3,8
5	15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	6,2
6	15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3	5,2

Четвертый раздел диссертационной работы посвящен проблеме прогнозирования поведения СВС-композиов в процессе их наплавки и проведению натурных испытаний стрелчатых лап сеялки СЗС-2.1.

Для установления взаимосвязи режимов наплавки со структурой и свойствами наплавленных материалов была определена величина эффективной погонной энергии. Расчеты выполнялись по формуле (ГОСТ Р ИСО 857-1-2009):

$$q_n = \frac{\eta IU}{V_n},$$

где I – сила тока, А; U – напряжение дуги, В; V_n – скорость наплавки, см/с; η – эффективный КПД нагрева (0,5...0,65).

Результаты расчетов сведены в таблицу 6.

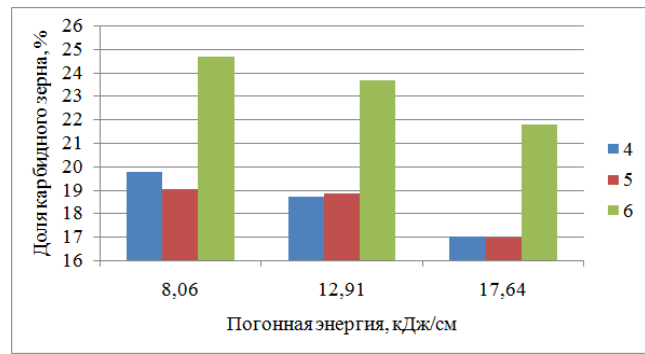
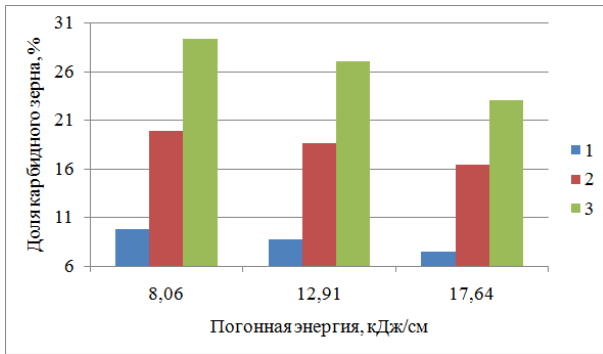
Таблица 6 – Расчет эффективной погонной энергии при наплавке материалов

Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, см/с	Погонная энергия, кДж/см
150	40	0,17	17,64
200	31	0,24	12,91
250	20	0,31	8,06

При увеличении погонной энергии температура ванны расплава повышается, что способствует растворению карбидных частиц. Об этом свидетельствует уменьшение объемной доли упрочняющих частиц в наплавленных покрытиях (рисунок 12).

С увеличением погонной энергии процесса наплавки увеличивается весовой износ образцов, что связано с уменьшением доли карбидной фазы в упрочненном слое (рисунок 13). Исходя из проведенных исследований, были установлены наиболее рациональные режимы наплавки. Наплавку следует выполнять на обратной полярности при силе сварочного тока (200...220) А и скорости наплавки 2,4 мм/с.

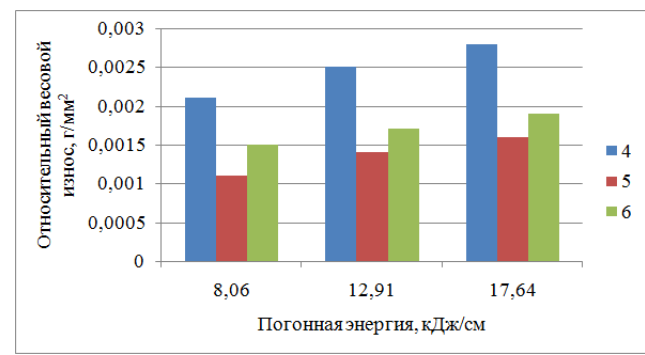
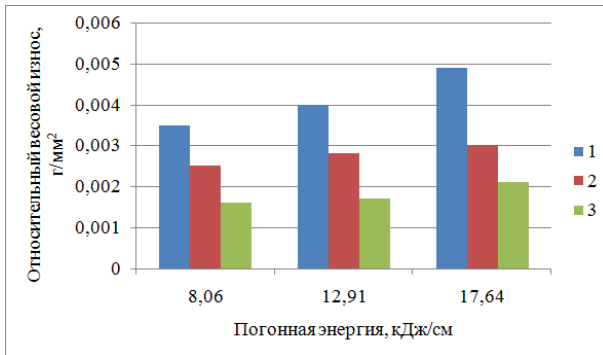
В процессе натурных испытаний была проведена оценка износостойкости стрелчатых лап сеялки СЗС-2.1 производства Рубцовского завода запасных частей и экспериментальной партии аналогичных изделий, модифицированных по технологии электродуговой наплавки с использованием разработанных в диссертации многокомпонентных смесей. Подверженные наиболее интенсивному износу части стрелчатых лап были наплавлены смесью состава «15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3». На рисунке 14 представлены схемы упрочнения анализируемых изделий.



а)

б)

Рисунок 12 – Изменение объемной доли карбидных частиц в наплавленных слоях в зависимости от величины погонной энергии: а) наплавка однокарбидных смесей, б) наплавка многокарбидных смесей; 1 – 10 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 2 – 20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 3 – 30 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 4 – 15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 5 – 15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 6 – 15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3.



а)

б)

Рисунок 13 – Изменение относительной износостойкости поверхностно модифицированных материалов в зависимости от величины погонной энергии: а) наплавка с использованием однокарбидной смеси, б) наплавка с использованием многокарбидных смесей; 1 – 10 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 2 – 20 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 3 – 30 % TiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 4 – 15 % TiC + 5 % SiC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 5 – 15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3; 6 – 15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3

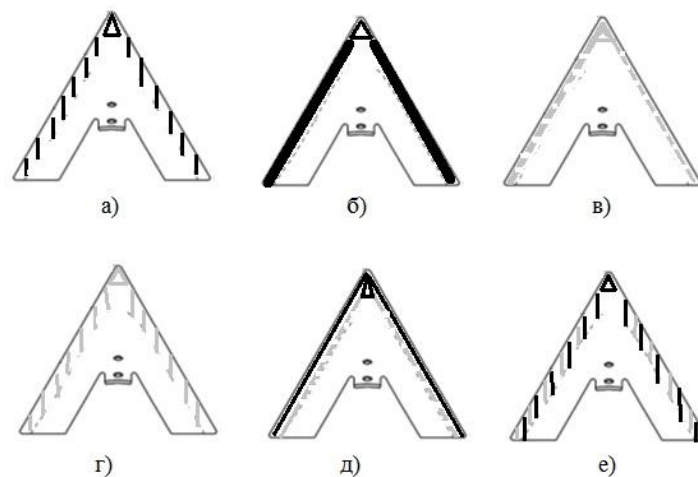


Рисунок 14 – Схема поверхностного упрочнения стрелчатой лапы: а) прерывистая наплавка верхней части лезвия лапы; б) наплавка непрерывным слоем верхней части лезвия; в) наплавка непрерывным слоем нижней части лезвия; г) прерывистая наплавка нижней части лезвия; д) наплавка непрерывным слоем верхней и нижней частей лезвия; е) прерывистая наплавка верхней и нижней частей лезвия

С позиции обеспечения высокой износостойкости изделий при минимальном использовании наплавочного материала наиболее рациональным является вариант модифицирования стрелчатой лапы сеялки СЗС-2.1, реализуемый по схеме, изображенной на рисунке 14, а (прерывистая наплавка верхней части лезвия). Практическая реализация такого варианта наплавки рабочих органов сеялки приводит к самозатачиванию отдельных участков лезвия стрелчатых лап. Наплавка анализируемых деталей порошковыми электродами экспериментального состава более чем в 3 раза повышает их износостойкость по сравнению с традиционной технологией поверхностного упрочнения, применяемой на Рубцовском заводе запасных частей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены структура и фазовый состав порошковых механоактивированных смесей после самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Установлено, что механоактивация компонентов электродной шихты в течение 180 с приводит к образованию композитов с гетерофазной структурой при одновременном их дроблении на мелкие фрагменты, многие из которых имеют явно выраженную пластинчатую форму. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности практической реализации синтеза карбидов титана, вольфрама и кремния в (*Ni-Cr*) матрице. Установлено, что при предварительной механоактивации порошковых смесей твердофазный синтез карбидов *MeC* принципиально возможен даже при наличии в системе инертной добавки порошка на основе (*Ni-Cr*). Ведущей стадией в процессе синтеза является образование карбида, соединений на основе «*Me - Ni*» в системе не обнаружено. Разработанная двухступенчатая технология, сочетающая процессы механической активации порошковых смесей и СВС, обеспечивает получение порошковой наплавочной смеси в виде композиционного гетерогенного материала с равномерным распределением частиц синтезированной упрочняющей фазы в объеме материала.

2. Исследованы структура, фазовый состав и механические свойства покрытий, сформированных электродуговой наплавкой одно- и многокарбидных смесей, полученных с применением процессов механоактивации и СВС порошковых композиций. Установлено, что при дуговой наплавке имевшиеся в наплавочной смеси ультрадисперсные карбидные частицы вырастают до субмикронных размеров и более. В процессе наплавки в модифицированных слоях выделяются частицы карбидов кубической и ромбической формы, а также частицы неправильной формы. По границам матричных зерен формируются мелкодисперсные эвтектические скопления частиц упрочняющей фазы. Присутствие в структуре наплавленного материала упрочняющих фаз, размер которых соответствует различным масштабным уровням, приводит к повышению физико-механических характеристик модифицированных поверхностных слоев. Значения микротвердости покрытий превышают показатели основного металла в 2...5 раз и достигают 1100 *HV*. Результаты статистической обработки экспериментальных данных свидетельствуют о том, что распределение значений микротвердости в поверхностных слоях образцов, модифицированных с использо-

ванием технологии электродуговой наплавки многокарбидной порошковой смеси, подчиняется нормальному закону и носит бимодальный характер.

3. Установлены зависимости между содержанием, типом упрочняющей фазы и механическими свойствами поверхностных модифицированных слоев. Максимальной износостойкостью обладают образцы, модифицированные по технологии электродуговой наплавки с использованием смеси состава «15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3», полученной по технологии механической активации порошковой композиции и СВС. По сравнению с технологией поверхностного упрочнения, используемой при производстве запасных частей на Рубцовском заводе, разработанный и предлагаемый для практического применения технологический процесс наплавки обеспечивает повышение износостойкости изделий до 10 раз. При наплавке порошковой смеси «15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3» ударная вязкость материала упрочненного слоя ($6,2 \text{ Дж/см}^2$) в 1,5...2 раза выше по сравнению с покрытиями, сформированными при наплавке других типов исследованных в работе материалов.

4. Обоснованы предложения по модифицированию поверхностных слоев с использованием технологии наплавки одно- и многокарбидных смесей СВС-механокомпозитов. Для получения электродной шихты наиболее рационально применять порошковые материалы дисперсностью (63...200) мкм. Экспериментально установлено, что требуемым уровнем сварочно-технологических свойств обладают наплавочные композиционные материалы, в электродной шихте которых содержание упрочняющей фазы не превышает 30 %. С позиции повышения триботехнических свойств модифицированных изделий и экономичности процесса наплавки наиболее рациональным является применение композитов «15 % TiC + 5 % SiC + ($Ni-Cr$)», «15 % TiC + 5 % WC + ($Ni-Cr$)», «15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC + ($Ni-Cr$)».

5. Результаты натуральных испытаний партии из десяти стрелчатых лап сеялки СЗС-2.1, поверхностно упрочненных порошковой смесью состава «15 % TiC + 5 % WC + ПР-Н70Х17С4Р4-3», свидетельствуют о высокой эффективности предлагаемых в работе технических решений. Установлено, что с позиции обеспечения высокой износостойкости деталей сельскохозяйственной техники при минимальном потреблении упрочняющего материала наиболее рациональна электродуговая прерывистая наплавка (наплавка участками) верхней части лезвий стрелчатых лап. По результатам производственных испытаний срок эксплуатации стрелчатых лап сеялки СЗС-2.1, упрочненных по разработанной технологии, в 3 раза больше по сравнению со сроком службы деталей, упрочненных с использованием индукционной наплавки сормайта.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

В ходе выполнения диссертационной работы изучены особенности формирования структуры и свойства покрытий, формируемых при электродуговой наплавке порошковых смесей из СВС-материалов, содержащих синтезированные в матрице частицы упрочняющих фаз. На основании проведенных исследований сформулированы предложения по выбору рационального состава электродной шихты, обеспечивающего повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники. Результаты диссертационного исследования целе-

сообразно применять на предприятиях сельхозмашиностроения, ориентированных на производство деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного износа. Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в переносе накопленного экспериментального опыта по решению проблемы увеличения срока службы изделий сельскохозяйственного машиностроения на другие отрасли машиностроения, например, на решение задач по повышению надежности и долговечности горнодобывающей техники.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК

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

2. Покрытия из механоактивированных СВС-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дуговым способом [Текст] / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. В. Собачкин, М. Н. Сейдуров, М. Е. Татаркин // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1/1. – С. 273–277.

3. Собачкин, А. В. Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания новых наплавочных материалов [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 9. – С. 17–22.

4. Морфология покрытий из многокомпонентных, предварительно механоактивированных порошков СВС-композитов [Текст] / А. В. Собачкин, И. В. Назаров, В. И. Яковлев, А. А. Ситников, П. С. Ярцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 141–144.

5. Динамическая дифрактометрия фазовых превращений при высокотемпературном синтезе в порошковых механоактивированных системах в условиях объемного воспламенения [Текст] / А. А. Попова, А. В. Собачкин, И. В. Назаров, В. И. Яковлев, М. В. Логинова, А. А. Ситников, М. Р. Шарафутдинов, Н. З. Ляхов // Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – Т. 77. – № 2. – С. 140–143

6. Собачкин, А. В. Структура и свойства газодетонационных покрытий различного функционального назначения на основе порошков слоистых механокомпозитов с металлической и интерметаллидной матрицей [Текст] / А. В. Собачкин, А. А. Попова, И. В. Назаров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 6 (102). – С. 16–22.

Статья в зарубежном издании

7. Yakovlev, V. I. Application of Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Mechanoactivating Treatment for Producing Multi-Component Composite Alloying Materials [Text] / V. I. Yakovlev, A. V. Sobachkin, A. A. Sitnikov // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 173–177. – [Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоак-

тивационной обработки для создания многокомпонентных композиционных наплавочных материалов].

В прочих изданиях

8. Собачкин, А. В. Особенности морфологии покрытий из многокарбидных предварительно механоактивированных СВС-композитов [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 41–44.

9. Собачкин, А. В. Износостойкие покрытия из СВС-материалов, наплавленные порошковым электродом [Текст] / А. В. Собачкин, А. А. Ситников, В. И. Яковлев // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 10-ой Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск : Издательство Новосибирского государственного технического университета, 2012. – С. 199–203.

10. Собачкин, А. В. Структура износостойких покрытий из порошков СВС-механокомпозитов, наплавленных ручным дуговым способом [Текст] / А. В. Собачкин // I Всероссийский конгресс молодых ученых. – СПб. : НИУ ИТМО, 2012. – С. 182–184.

11. Собачкин, А. В. Формирование структуры покрытий с синтезированными в матрице карбидными соединениями при электродуговой наплавке порошковыми электродами [Текст] / А. В. Собачкин // Современные техника и технологии : сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 2 / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 221–222.

12. Собачкин, А. В. Особенности структуры и фазового состава износостойких покрытий при электродуговой наплавке СВС-материалами [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // Новые материалы. Создание, структура, свойства-2012 : сборник трудов XII Всероссийской школы-семинара с международным участием. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 69 – 72.

13. Собачкин, А. В. Механически активируемый самораспространяющийся высокотемпературный синтез как перспективная технология получения порошковых наплавочных материалов [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // Инновации в машиностроении : сборник трудов Международной молодежной конференции / Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 168 – 172.

14. Собачкин, А. В. Получение ультрадисперсных порошковых наплавочных материалов методом механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение. VI Ставеровские чтения : труды научно-технической конференции с международным участием / под ред. А. И. Лямкина, В. Е. Редькина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012 – С. 273–275.

15. Собачкин, А. В. Износостойкие покрытия из многокарбидных СВС-механокомпозитов [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников //

Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении : материалы VI научно-технической интернет-конференции с международным участием. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – С. 118–122.

16. Яковлев, В. И. Технология применения методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания многокомпонентных композиционных наплавочных материалов [Текст] / В. И. Яковлев, А. В. Собачкин, А. А. Ситников // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых / Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 168 – 171.

17. Собачкин, А. В. Наплавочные композиционные материалы с карбидным упрочняющим зерном, полученные методом механостимулированного СВС в никель-хромовой матрице [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // Сварка и родственные технологии : материалы VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. – Киев : Институт электросварки им. Е. О. Патона, 2013. – С. 161.

18. Особенности применения методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания многокомпонентных композиционных наплавочных материалов [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников, А. И. Тищенко // New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering : XIV International scientific conference / a collective monograph edited by dr hab inż A. Kawalek, volume 1. – Czestochowa : Czestochowa university of technology faculty of materials processing, technology and applied physics, 2013. – P. 329–332.

19. Perspective composite welding materials with carbide reinforcing grain, obtained by mechanically stimulated SHS in nickel-chromium matrix [Text] / V. I. Yakovlev, A. V. Sobachkin, M. V. Loginova, A. A. Sitnikov, A. A. Savin // Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies : the book of abstracts of the IV International conference. – Novosibirsk : NSU Publishing center, 2013. – P. 221. – [Перспективные композиционные наплавочные материалы с карбидным упрочняющим зерном, полученные методом механостимулированного СВС в никель-хромовой матрице].

20. Собачкин, А. В. Применение метода механостимулированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для создания многокомпонентных композиционных наплавочных материалов [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // Инновации в машиностроении : труды 4-ой Международной научно-практической конференции / под ред. Х.М. Рахимянова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 287–291.

Подписано в печать 31.10.2013. Формат 60x84 1/16.
Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,39.
Тираж 100 экз. Заказ 2013 – 445.

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.