

Жидович Александра Олеговна

**СВС-ЭКСТРУЗИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ТИТАНА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ**

Специальность 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
Российской академии наук (ИСМАН)

- Научный руководитель** **Столин Александр Моисеевич**
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный
сотрудник, заведующий лабораторией ИСМАН
- Официальные оппоненты**
- Шляпин Сергей Дмитриевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
материаловедения и технологии обработки материалов, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), г. Москва
- Классен Николай Владимирович**
кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный
сотрудник лаборатории квантовых кристаллов, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН), г.
Черноголовка
- Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Уфимский государственный
авиационный технический университет», г. Уфа

Защита диссертации состоится « 30 » ноября 2022 года в 10.00 на заседании диссертационного
совета 24.1.124.01 созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
Российской академии наук (ИСМАН), по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка,
ул. Академика Осипяна, д.8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСМАН и на сайте:
http://www.ism.ac.ru/n_struct/dsc/annonces/zhidovich.pdf

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью организации)
просьба направлять по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка,
ул. Академика Осипяна, д.8, ИСМАН, Диссертационный совет 24.1.124.01.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н.



Петров Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день актуальной и важнейшей проблемой является интенсивный износ и выход из строя различных деталей машиностроительной и сельскохозяйственной техники, и как следствие, целого комплекса оборудования, что существенно сказывается на производительности и себестоимости выпускаемой продукции. Интерес к технологиям восстановления и упрочнения деталей машин и двигателей постоянно возрастает. Согласно анализу литературы и патентных исследований, до 40% потребностей в запасных частях можно удовлетворить за счет повышения эксплуатационного ресурса при восстановлении изношенных деталей, которые выходят из строя в результате износа поверхностного слоя. Важное преимущество восстановления – малая металлоемкость: для восстановления необходимо в 20-30 раз меньше металла, чем для изготовления новых запасных частей. Доля восстанавливаемых деталей в общем объеме потребления запасных частей достигает в развитых странах 30-35%.

Для увеличения ресурса рабочего инструмента широко используются методы электроискрового легирования (ЭИЛ) для нанесения покрытий толщиной от 10 мкм до 100 мкм и электродуговой наплавки (ЭДН) для нанесения покрытий от 1 мм до 3 мм. Эти методы применяются для упрочнения поверхности режущего и штампового инструмента (сверл, фрез, ножей, медицинского инструмента и др.) из углеродистых, легированных, быстрорежущих сталей. К главным достоинствам метода ЭИЛ можно отнести малый расход упрочняющего электрода, возможность многократного упрочнения поверхности инструмента и отсутствие какой-либо обработки инструмента после его упрочнения. Однако покрытия, наносимые данным методом, имеют предел толщины и после его достижения продолжение обработки может привести к разупрочнению поверхностного слоя и уменьшению размеров детали. Этого недостатка лишен метод наплавки. ЭДН, как наиболее простой и доступный метод защиты деталей и восстановления их после износа, применяется давно, и получила широкое распространение в промышленности и в быту.

В настоящее время широко востребованы электроды для нанесения покрытий толщиной от 1 мм до 3 мм методом ЭДН. Традиционно для наплавочных электродов используются стеллиты, сормаиты и многие другие материалы, значительно уступающие по свойствам твердым сплавам марок ВК и ТК. Применяются также порошковые электроды и проволоки, заполненные шихтой различного состава. Такие электроды имеют существенные недостатки по сравнению с компактными: сложность в изготовлении, высокая удельная энергия, требующаяся для наплавки. Как правило, электроды и присадочные стержни для наплавки из твердых сплавов получают, используя методы традиционной порошковой металлургии. Технология получения длинномерных компактных электродов требует проведения большого количества технологических операций, практически сложна, энергозатратна и длительна по времени.

К числу материалов, обладающих высоким комплексом прочностных и триботехнических свойств, могут быть отнесены новые керамические и металлокерамические материалы, полученные с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), которая позволяет значительно снизить энергозатраты и упростить процесс получения электродных материалов. Область использования СВС-электродов из металлокерамических и керамических материалов очень обширна: нанесение коррозионно-, жаро- и износостойких покрытий, восстановление изношенных деталей и др. Работы по получению электродов из этих материалов методами СВС-экструзии и СВС-прессования проводились параллельно в ИСМАН (А.М. Столин, В.В. Подлесов, П.М. Бажин), в НИТУ МИСиС (Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов), в Белорусском национальном техническом университете

(Л.С. Богинский, В.В. Саранцев). Полученные такими методами электроды в настоящее время используются в основном для нанесения покрытий методом ЭИЛ. Современным способом получения компактных наплавочных литых электродов является метод СВС-металлургии (В.И. Юхвид, С.Л. Силяков). Однако, его следует отнести к жидкофазным технологиям, он применим лишь для термитных смесей. Известен другой способ применения СВС для получения наплавочных трубчатых электродов, заполненных шихтой, синтезированной из предварительно механоактивированных порошковых компонентов (А.А. Ситников, А.В. Собачкин).

Перспективным методом прямого получения компактных СВС-электродов для наплавки является наукоемкий метод СВС-экструзии, разработанный в ИСМАН. Этот метод сочетает в одной установке и в одной технологической стадии синтез материала в режиме СВС и получение из него изделия путем экструзии горячих продуктов реакции через формующую матрицу. Весь процесс занимает десятки секунд. Таким образом, сокращается число операций, снижается время получения готового изделия, значительно снижаются энергозатраты, поскольку используется энергия химического превращения, и упрощается оборудование. Метод СВС-экструзии открывает принципиально новый подход к организации технологического процесса получения новых электродов из широкой гаммы металлокерамических материалов.

Исследований, посвященных изучению особенностей формирования структуры и свойств покрытий при электродуговой наплавке композиционными материалами, полученными с применением СВС-экструзии недостаточно. Однако имеющиеся данные дают основание считать, что СВС-экструзия является прорывным технологическим процессом для получения электродов из новых многофункциональных керамических и металлокерамических материалов. Разработка и внедрение конкурентоспособных электродов, полученных методом СВС-экструзии, позволит осуществить постепенный отказ от закупки импортных запасных частей и инструмента ввиду замены их на отечественные, упрочненные и восстановленные с помощью электродуговой наплавки.

Вышеизложенное и обусловило актуальность темы настоящей работы, посвященной исследованию возможностей метода СВС-экструзии для получения наплавочных электродов из тугоплавких соединений твердосплавных материалов.

Актуальность работы подтверждается ее выполнением при поддержке РФФИ в рамках проекта 19-38-90048 Аспиранты «СВС-экструзия электродов из тугоплавких материалов и их применение для получения защитных покрытий методом электродуговой наплавки».

Цель и задачи работы

Цель работы – исследование процессов СВС-экструзии и электродуговой наплавки для получения тугоплавких наплавочных электродов с упрочняющими частицами диборида титана и их применение для создания защитных покрытий.

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

- определить оптимальное соотношение компонентов Ti:B:Co в исходной порошковой смеси, разработать технологические режимы получения наплавочных электродов методом СВС-экструзии из материала, синтезируемого из смеси выбранного состава;
- изучить закономерности формирования фазового состава, химических и структурных превращений в выбранной системе в различных газовых средах (в атмосфере воздуха и инертной среде) при СВС методами рентгенографии;
- провести материаловедческие исследования полученных электродных материалов методами рентгенофазового, микрорентгеноспектрального анализов, сканирующей и оптической микроскопии с компьютерной обработкой микроструктуры, изучить их физико-механические характеристики;

- исследовать процесс нанесения защитных покрытий на сталь методом электродуговой наплавки СВС-электродами на основе системы Ti-B-Co, изучить структуру, фазовый состав и эксплуатационные характеристики наплавленных покрытий и сравнить с аналогичными процессами наплавки СВС-электродами системы Ti-B-Fe;

- установить рациональные режимы наплавки СВС-электродами покрытий на сталь долот (сталь 45), провести материаловедческие исследования и определить эксплуатационные характеристики наплавленных покрытий.

Научная новизна. В работе впервые:

- исследованы закономерности фазо-, структурообразования материала на основе диборида титана, полученного из смеси состава Ti+2B+0,9Co в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Установлено, что в результате СВС при охлаждении в материале образуется τ -фаза – двойной борид Ti₃Co₂₀B₆;

- экспериментально определены закономерности формуемости материала в зависимости от времени задержки. Установлено, что с увеличением времени задержки степень деформации в условиях свободного СВС-сжатия монотонно снижается;

- проведены численные исследования влияния технологических параметров, таких как время задержки и температура горения на длину получаемых методом СВС-экструзии электродов и определены рациональные режимы их получения;

- экспериментально показана возможность получения компактных электродов из смеси состава Ti+2B+0,9Co методом СВС-экструзии длиной 150 мм с однородной структурой по всему объему;

- изучены закономерности формирования покрытий при электродуговой наплавке СВС-электродами на стальную подложку в атмосфере аргона. Установлено, что для микроструктуры наплавленных слоев характерно зональное строение, формируется переходная зона, упрочняющие частицы диборида титана при наплавке переносятся в покрытие, а на равномерность их распределения оказывает влияние режим наплавки (сила сварочного тока).

Практическая значимость результатов:

- определены рациональные технологические режимы СВС-экструзии для получения наплавочных СВС-электродов из материалов системы Ti-B-Co исходного состава Ti+2B+0,9Co;

- методом электродуговой наплавки с использованием полученных СВС-электродов Ti+2B+0,9Co и Ti+1,7B+0,6Fe на стальные подложки нанесены защитные покрытия толщиной 2-3,5 мм. Определены рациональные режимы наплавки;

- установлено, что наплавка СВС-электродами приводит к повышению микротвердости рабочей поверхности деталей в 2-3 раза, износостойкости – в 3 и более раз, снижению коэффициента трения в 4-5 раз по сравнению со стальной поверхностью;

- разработан новый способ получения электродов на основе композиционного материала системы Ti-B-Co (получен Патент РФ на изобретение № 2779580 от 09.09.2022);

- установлено, что наплавка по разработанным режимам СВС-электродами Ti+2B+0,9Co на рабочие поверхности зубьев ковшей экскаваторов увеличивает их ресурс в 2,6 раза по сравнению с деталями, используемыми серийно.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- исследования фазообразования материала состава Ti+2B+0,9Co в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза;

- изучения влияния времени задержки на формуемость, фазо- и структурообразование синтезируемого материала в условиях свободного СВС-сжатия;

- численных исследований, направленных на установление рациональных режимов прямого получения СВС-электродов по известным математическим моделям СВС-экструзии длинномерных образцов;

- исследования микроструктуры и физико-механических свойств полученных СВС-электродов;

- исследований особенностей формирования наплавленного слоя на стальных подложках при электродуговой наплавке в защитной атмосфере аргона СВС-электродами исходного состава $Ti+2V+0,9Co$ и $Ti+1,7V+0,6Fe$;

- определения рациональных режимов электродуговой наплавки защитных покрытий СВС-электродами состава $Ti+2V+0,9Co$ и $Ti+1,7V+0,6Fe$ на Сталь 45;

- эксплуатационных исследований покрытий, полученных электродуговой наплавкой в атмосфере аргона металлокерамическими СВС-электродами на стали 45 и зубьях малогабаритных ковшей.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертационная работа Жидович А.О. «СВС-экструзия электродов из тугоплавких материалов на основе диборида титана и их применение для получения защитных покрытий методом электродуговой наплавки» соответствует паспорту научной специальности: 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества». А именно формуле паспорта диссертации, т.к. в работе рассматриваются вопросы материалообразующего процесса. В частности, рассматривается самораспространяющийся высокотемпературный синтез в сочетании с высокотемпературным сдвиговым деформированием продуктов синтеза, способы влияния на механизмы физико-химических превращений, а также на процессы фазо- и структурообразования путем введения кобальта, приводящего к образованию новых фаз и синтезу материала, представляющего практическую ценность.

Диссертационная работа также соответствует областям исследования паспорта специальности:

➤ пункт 1 «...механизмы химического превращения, ...экспериментальные методы исследования химической структуры...»;

➤ пункт 1 «...поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях - в условиях статического и динамического сжатия...»;

➤ пункт 5 «...процессы горения и взрывчатого превращения в устройствах и аппаратах для получения веществ и продуктов; управление процессами горения и взрывчатого превращения».

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на XVII Всероссийской с международным участием школе – семинаре по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова, г. Черноголовка. 16-18 октября 2019 г.; X и XI Конференции молодых ученых по общей и неорганической химии, г. Москва, 2020 г. и 2021 г.; Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы XII и XIII Международной научно-инновационной молодежной конференции, г. Тамбов, 20-22 мая 2020 г. и 11-12 ноября 2021 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и покрытий для авиационной и космической техники», г. Москва. 16 апреля 2021 г.; Всероссийской школе молодых ученых «Научные школы большой химической физики», г. Черноголовка, 29 ноября - 3 декабря 2021 г.;

V Международной конференции «Новые материалы и технологии в условиях Арктики», г. Якутск, 14-18 июня 2022 г.

В обществе с ограниченной ответственностью «АГРОГАЗСТРОЙ» Орловской области были внедрены результаты научно-исследовательских работ по разработке и нанесению СВС-электродами $Ti+2B+0,9Co$ наплавочных защитных покрытий на рабочие поверхности зубьев ковшей малогабаритных экскаваторов компании Hitachi. Получен акт о внедрении научно-исследовательских работ.

Обоснование и достоверность

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена значительным количеством экспериментальных данных, применением современных взаимодополняющих аттестованных физико-химических методов и методик при исследовании микроструктуры и физико-механических свойств полученных материалов и изделий на их основе, а также практическим использованием полученных результатов эксплуатационных исследований покрытий, сформированных ЭДН в атмосфере аргона металлокерамическими СВС-электродами на Стали 45 и зубьях малогабаритных ковшей.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 5 статей в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК, базы данных РИНЦ, Web of Science (в т.ч. Q1), 7 тезисов в сборниках трудов на перечисленных выше конференциях, получен 1 патент РФ.

Личный вклад автора

Автором выполнен анализ литературных данных, проведен большой экспериментальный ряд исследований и обработка полученных данных, осуществлены численные исследования по известным математическим моделям. Автор активно участвовал в постановке задач исследования, формулировке выводов и написании статей. Результаты работ представлялись лично автором на научно-практических конференциях с международным участием.

Структура и объем работы

Работа содержит введение, 5 глав, выводы, список литературы и приложение. Общий объем работы составляет 139 страниц, включая 60 рисунков, 9 таблиц и библиографию из 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, дана общая характеристика работы, изложены цель и задачи исследования, приводятся положения, выносимые на защиту, излагается научная новизна и практическая значимость исследований.

В первой главе анализируется современное состояние проблемы получения наплавочных тугоплавких электродных материалов для износостойкой наплавки. Дана общая характеристика материалов для износостойкой наплавки. Представлена краткая справка о существующих наплавочных тугоплавких материалах, твердых сплавах. Приведены виды электродов, применяемых для износостойкой наплавки, и способы их получения методами традиционной порошковой металлургии. Показаны возможности использования процесса СВС для получения наплавочных тугоплавких материалов. Обоснована перспективность исследований, направленных на получение электродов для наплавки методом СВС-экструзии. На основе проведенного анализа сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе приводится обоснование выбора объекта и описание методик экспериментальных исследований, описаны методы изучения микроструктуры, фазового состава и свойств СВС-электродов и наплавленных покрытий.

Из литературных данных известно, что электродные материалы на основе системы TiB-Ti, полученные методом СВС-экструзии, при их наплавке формируют покрытия, упрочненные боридами титана (TiB и TiB₂). По своим физико-механическим характеристикам диборид титана TiB₂ превосходит моноборид TiB. Также диборид обладает термодинамической стабильностью и стойкостью в расплавах сталей и чугунов. Поэтому TiB₂ является более предпочтительной упрочняющей фазой для покрытий, наносимых на поверхности стальных деталей.

В качестве матрицы твердых сплавов традиционно используется кобальт, который также отличается высокой коррозионной стойкостью и хорошим сопротивлением к истиранию. Кроме того, в ряду энергоактивности металлов при взаимодействии с железной подложкой (Ni, Fe, Co, W, Mo, Cu, Mn, V, Ti, Cr, Al, Mg) кобальт входит в первую тройку и образует прочную связь с железом, что оказывает положительное влияние на адгезионную прочность наплавленных на сталь покрытий.

Также известно, что:

- наилучшими эксплуатационными свойствами обладают защитные покрытия, доля упрочняющей фазы в которых составляет 25-30 %;

- степень разбавления наплаваемого материала материалом подложки при ЭДН составляет в среднем 25-30%.

Поэтому для создания необходимого уровня упрочнения поверхности деталей доля упрочняющей фазы в электродах должна быть не менее 50-55 %.

На основании вышесказанного в качестве объекта исследования была выбрана система Ti-B-Co с мольным соотношением компонентов Ti:B:Co = 1:2:0,9. Такое соотношение обеспечивает расчетное содержание износостойкой составляющей диборида титана 56,7 масс. % в синтезируемом материале в соответствии с уравнением реакции (1) и при условии, что весь бор провзаимодействует с титаном. Состав исходной смеси представлен в таблице 1.

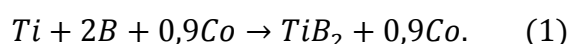


Таблица 1 – Состав исходной порошковой смеси системы Ti-B-Co

Компонент	Ti	B	Co
Количество, моль	1	2	0,9
Содержание в смеси, ат. %	25,8	22,7	51,6
Содержание в смеси, масс. %	39,4	17,8	42,8

Для проведения экспериментальных исследований использовались различные порошки титана с размером частиц основной фракции 20 мкм, 105 мкм и 125 мкм.

Исходные шихтовые заготовки массой 30 г диаметром 25 мм были получены методом одноосного прессования из заранее подготовленных порошковых смесей.

Характеристики горения исследовались термодинамическим методом при помощи установки «ТЕСТ», моделирующей реальные условия синтеза материала в экструзионной пресс-форме. Температура горения регистрировалась при помощи термопар марки ВР5-ВР20 через АЦП.

Изделия (компактные длинномерные электроды) из материала на основе диборида титана были получены методом СВС-экструзии. Также для последующей наплавки были получены

электроды диаметром 4 мм из материала на основе диборида титана (65 масс. %) с комплексной связкой железо-титан состава $Ti+1,7V+0,6Fe$ по известным режимам СВС-экструзии.

Электродуговая наплавка покрытий осуществлялась СВС-электродами за один проход на стальных заготовках из марок Ст3 и Сталь 45, широко используемых для производства деталей машиностроительной и сельхозтехники. Наплавку выполняли в среде аргона в диапазоне значений сварочного тока от 50 А до 110 А. Напряжение дуги составляло 12 В. ЭДН осуществлялась при постоянном токе прямой полярности. Для возбуждения дуги использовался вольфрамовый электрод диаметром 3,2 мм, СВС-электроды использовались в качестве присадочных материалов.

С целью проведения сравнительного анализа триботехнических характеристик совместно с Тамбовским государственным техническим университетом была проведена наплавка промышленными электродами «Сормайт» для износостойкой наплавки марки Т-620 диаметром 4 мм с рутилово-основным покрытием, сердечник – низкоуглеродистая проволока Св-08. Легирование наплавленных слоев осуществляется через покрытие электрода.

Третья глава посвящена исследованиям особенностей синтеза и формования материала состава $Ti+2V+0,9Co$ для установления рациональных режимов СВС-экструзии, изучению фазо- и структурообразования СВС-электродов и ряда их свойств.

Экспериментальные исследования характеристик горения состава $Ti+2V+0,9Co$ показали, что температура горения зависит как от относительной плотности заготовок, так и от размера частиц порошка титана (рисунок 1). Для составов с порошком титана с размером частиц основной фракции 20 мкм и 105 мкм увеличение относительной плотности с 0,55 до 0,7 приводит к увеличению температуры горения. Зависимость температуры горения от плотности для состава с крупным титаном (125 мкм) проходит через максимум. Это связано с тем, что увеличение плотности до определенного предела приводит к увеличению реакционной поверхности контакта между частицами порошка. Однако после достижения определенной (оптимальной) плотности дальнейшее ее повышение приводит к увеличению кондуктивного теплоотвода из зоны реакции, способствующего снижению температуры горения.

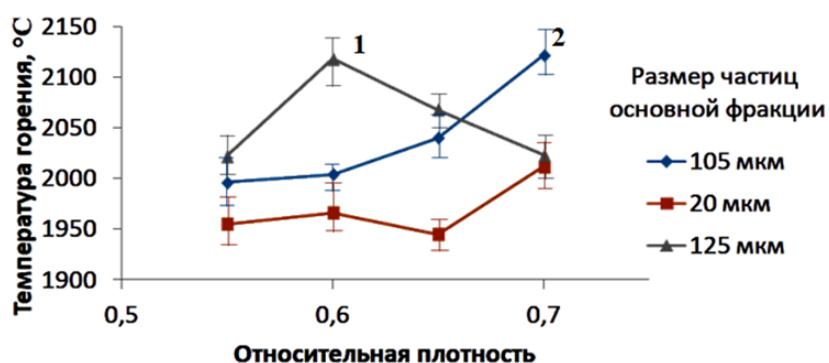


Рисунок 1 – Зависимость температуры горения от относительной плотности заготовок и гранулометрического состава порошка Ti

Для СВС-экструзии оптимальной относительной плотностью шихтовых заготовок считается та, при которой в процессе СВС реализуется максимальная температура горения. На рисунке 1 такие точки, отмеченные цифрами 1 и 2, соответствуют относительной плотности 0,6 и 0,7. Температура горения в них составляет ~2120 °C. Для получения заготовок относительной плотности 0,6 требуется усилие в 5 раз меньше усилия, необходимого для уплотнения смеси до относительной плотности 0,7. Упругое последствие после высоких давлений прессования может

вызвать образование расслоенных трещин в спрессованной заготовке. Кроме того, развитие упругого последействия в прессовках из порошков с меньшей дисперсностью происходит при более высоких давлениях. Поэтому для СВС-экструзии предпочтительнее использование шихтовых заготовок с относительной плотностью 0,6, изготовленных из порошковой смеси $Ti+2B+0,9Co$ с крупным порошком титана с размером основной фракции частиц 125 мкм.

Особенности пресс-оснастки для проведения процесса СВС-экструзии сводят к минимуму или полностью исключают взаимодействие материала с газами, входящими в состав атмосферы, поэтому фазообразование исследовалось с помощью метода разрешающей рентгеновской дифракции в инертной атмосфере гелия. Полученная дифракционная картина (рисунок 2) говорит о том, что синтез материала идет в несколько стадий. При плавлении компонента происходит тепловое расширение его кристаллической решетки, что на дифракционной картине отражается смещением рефлексов в сторону меньших углов. Однако СВС в исследуемой системе протекает с высокой скоростью (~20 мм/с) и фронт горения проходит место регистрации шириной 1,5-2 мм за доли секунды. Поэтому на дифракционной картине не видно признаков плавления исходных компонентов (Ti, Co и B) и сразу после исчезновения их рефлексов появляются рефлексы TiB_2 . В течение следующих 12 с рефлексы диборида титана смещаются в сторону больших углов, что вызвано уменьшением теплового расширения кристаллической решетки TiB_2 . По прошествии этого времени начинается кристаллизация двойного борида $Ti_3Co_{20}B_6$ или τ -фазы. Основным вклад в осуществление синтеза материала в режиме СВС вносит реакция взаимодействия титана и бора. В результате этой реакции не весь титан и бор вступают во взаимодействие друг с другом. Непрореагировавшие компоненты Ti и B, растворяясь в жидком кобальте ($T_{пл} = 1495 \text{ }^\circ\text{C}$), образуют τ -фазу.

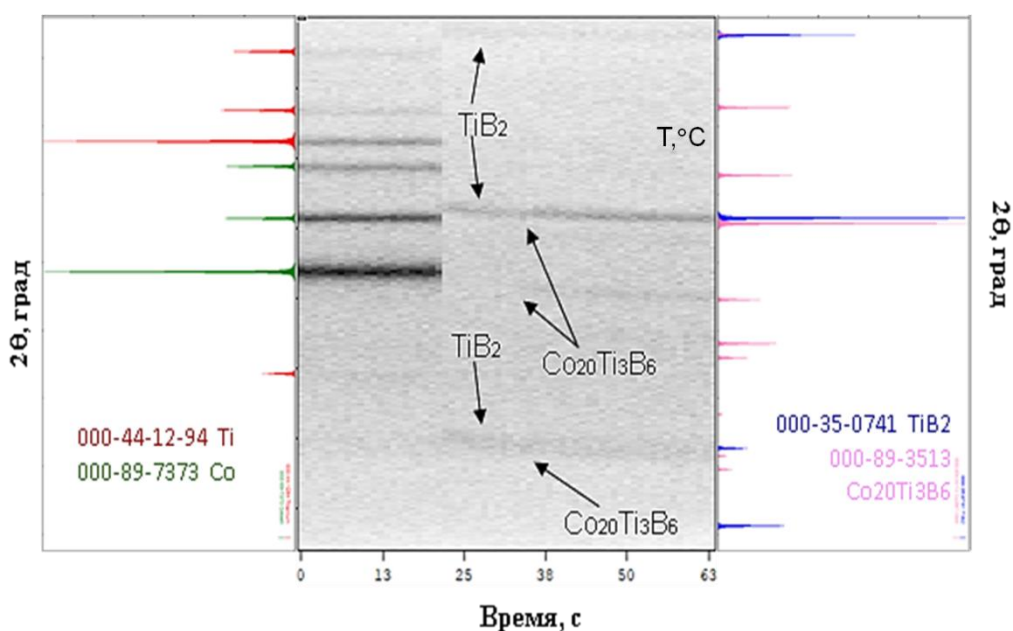


Рисунок 2 – Дифракционная картина СВС смеси состава $Ti+2B+0,9Co$ и дифрактограммы исходной порошковой смеси и синтезированного материала

Важной характеристикой синтезированного материала, позволяющей оценить его способность к пластическому деформированию, является формуемость. С реологической точки зрения принято считать, что критерием формуемости СВС-материалов является степень деформации. Большое влияние на нее оказывает время задержки – время от подачи напряжения на вольфрамовую спираль, при помощи которой происходит инициирование реакции, и до начала

приложения давления. На рисунке 3 представлены результаты исследования формуемости в зависимости от времени задержки, полученные при помощи метода свободного СВС-сжатия. Установлено, что с увеличением времени задержки степень деформации уменьшается. Максимальной пластичностью материал обладает в первые секунды после прохождения фронта горения, степень деформации достигает 0,83. С увеличением времени задержки до 6,7 с она снижается до 0,61.

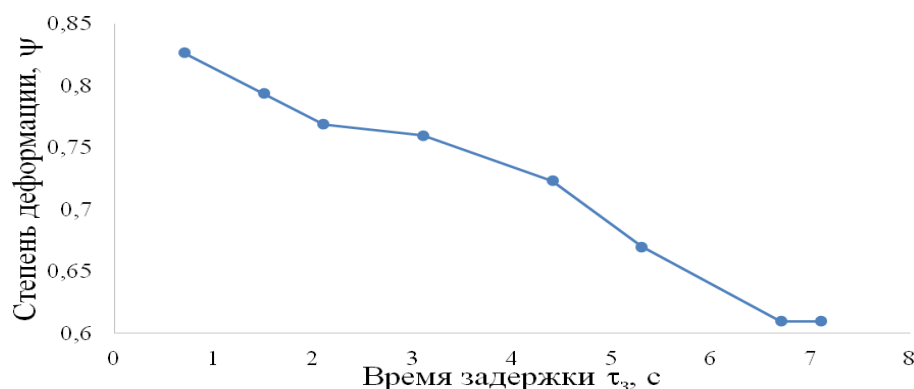


Рисунок 3 – Зависимость степени деформации материала исходного состава Ti+2B+0,9Co при свободном СВС-сжатии от времени задержки

Микроструктура материала после свободного СВС-сжатия (рисунок 4) представлена частицами диборида титана, расположенными в матрице, основным компонентом которой является кобальт, содержание титана в ней не превышает 10 масс. %. Согласно РФА, в материале присутствует τ -фаза (двойной борид $Ti_3Co_{20}B_6$) и борид кобальта Co_2B , количество которого увеличивается с увеличением времени задержки. Установлено, что при малых временах задержки (до 2 с) в результате недореагирования исходных порошковых компонентов в конечном продукте содержится несвязанный титан. Поскольку СВС-сжатие осуществлялось на воздухе, в структуре также присутствует малое количество оксида и нитрида титана. С увеличением времени задержки увеличивается средний размер частиц диборида титана с 1,4 мкм до 2,0 мкм. Таким образом, для дальнейших экспериментов по установлению рациональных режимов СВС-экструзии определен рекомендованный интервал времени задержки от 2 с и до 6,5 с.

На основе ранее разработанных математических моделей распределения температурных полей в материале образца на стадиях горения, прессования и выдавливания проведены численные расчеты, которые позволили теоретически спрогнозировать длину СВС-электродов в зависимости от различных технологических параметров СВС-экструзии. Численные исследования показали (рисунок 5а), что для СВС-экструзии наиболее предпочтительно использование исходных смесей с крупным порошком титана (125 мкм), поскольку это позволяет увеличить длину экструдированной части на 12 %. Согласно результатам, представленным на рисунке 5б, на длину СВС-электродов значительное влияние оказывает начальная пористость шихтовых заготовок. Для исследуемого состава Ti+2B+0,9Co максимальную длину экструдированной части при СВС-экструзии через плоскую матрицу способна обеспечить относительная плотность равная 0,6.

На рисунке 5 на результаты численных исследований также наложены экспериментально установленные температуры горения. Считается, что чем выше температура синтеза, тем больше температурно-временной интервал формуемости материала и тем большей длины электроды возможно получить. Полученные результаты численных исследований, отраженные на рисунке 5, согласуются с результатами предварительных экспериментальных исследований материала состава Ti+2B+0,9Co.

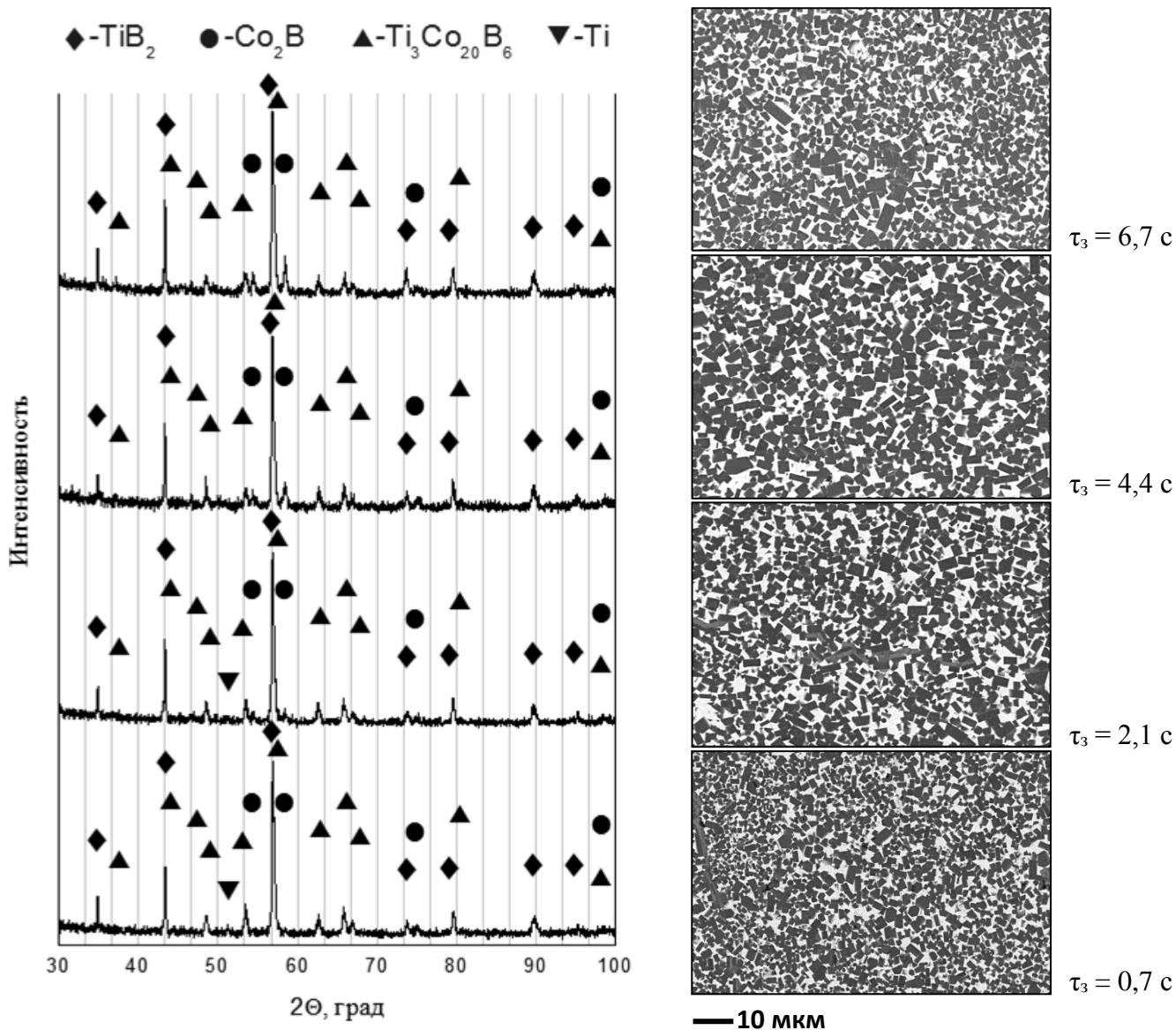


Рисунок 4 – Дифрактограмма и микроструктура материала после свободного СВС-сжатия после разного времени задержки τ_3

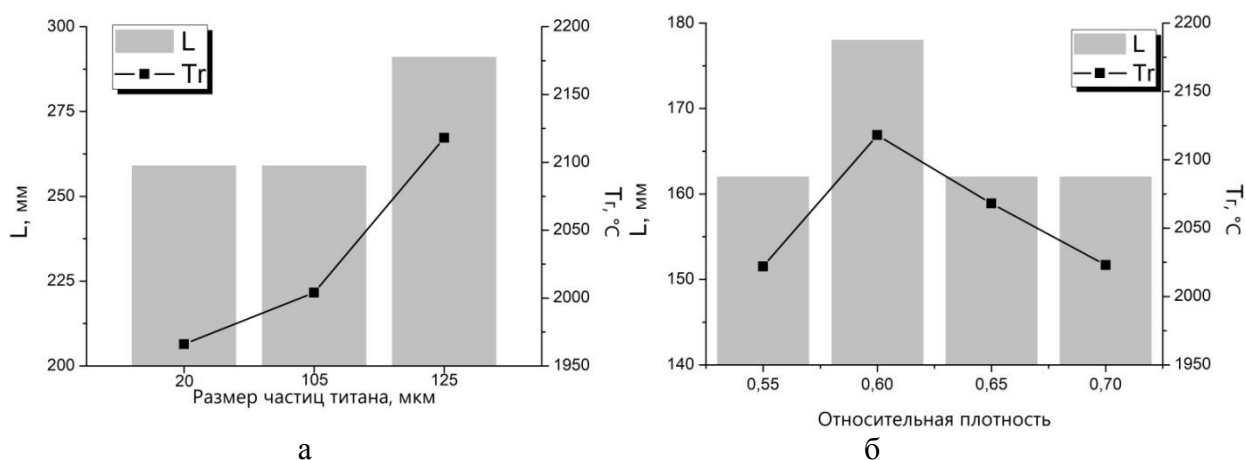


Рисунок 5 – Графики зависимости длины СВС-электродов (L) от гранулометрического состава порошка титана (а) и относительной плотности исходных таблеток (б) с нанесенными реальными температурами горения (T_r)

Так как время задержки является одним из важнейших параметров процесса СВС-экструзии, определяющим способность материала к высокотемпературному сдвиговому деформированию, было изучено его влияние на длину экструдированных СВС-электродов. Следует различать длину СВС-электродов и количество выдавленного материала. За длину электрода принимается длина бездефектной части экструдированного материала. Полученная зависимость длины СВС-электродов и массы выдавленного материала от времени задержки представлена на рисунке 6.

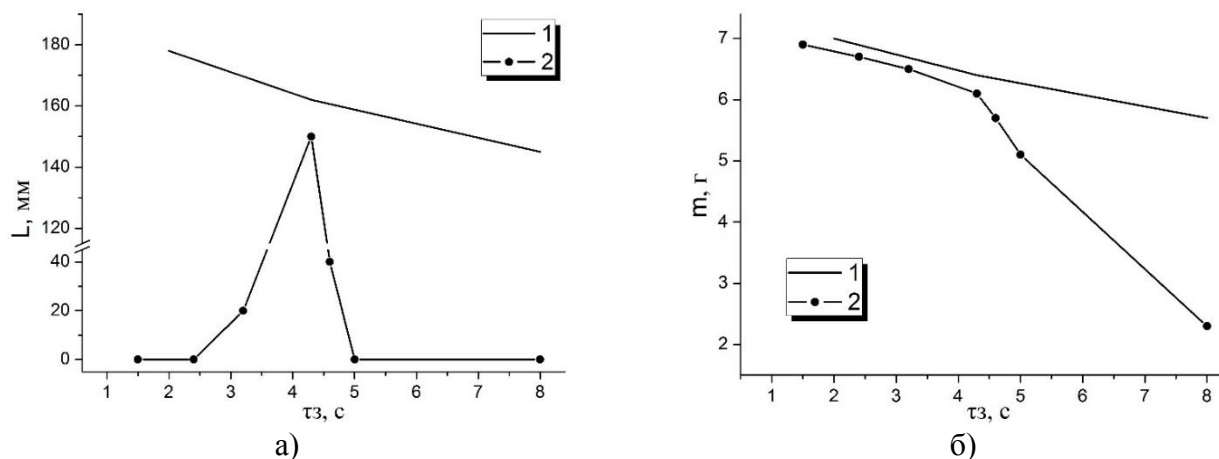


Рисунок 6 – Зависимость длины экструдированной части L (а) и массы выдавленного материала m (б) от времени задержки τ_z : 1 – численные исследования; 2 – экспериментальные результаты

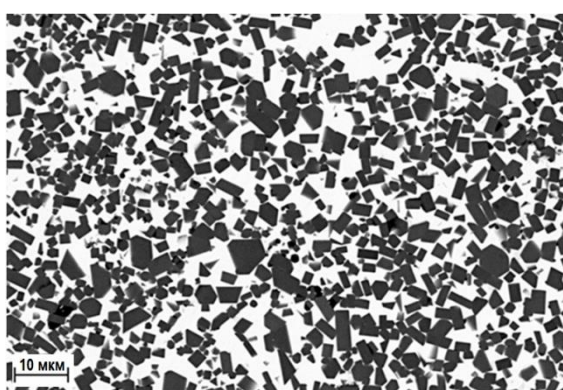
При малых временах задержки (менее 3,2 с) в материале присутствуют частицы продуктов синтеза и большое количество расплава, в результате чего в реакционной камере образуется суспензия, обладающая вязкоупругими свойствами. Вследствие этого при деформировании вязкость материала и его сопротивление выдавливанию увеличиваются, и сформировать компактный электрод не удастся (рисунок 6а). Материал выдавливается в виде отдельных частей и масса выдавленного материала при малых временах задержки максимальна (рисунок 6б). В то же время при позднем приложении давления при временах задержки от 5 с и более тепловые потери в результате остывания материала приводят к снижению его способности к пластическому деформированию, и, как следствие, уменьшению длины экструдированных СВС-электродов. Материал, застывая в области формующего пояса, закупоривает отверстие формующей матрицы. Масса выдавливаемого материала также снижается. Оптимальным временем задержки является время перед приложением давления равное 4,4 с. При данном времени задержки исследовалось влияние давления прессования и скорости перемещения плунжера пресса на длину экструдированной части. Проведенные исследования позволили определить наиболее рациональные значения параметров процесса СВС-экструзии для получения СВС-электродов $Ti+2V+0,9Co$ с качественной бездефектной поверхностью:

- характеристики шихтовых заготовок: крупный порошок титана с размером частиц основной фракции 125 мкм; диаметр – 25 мм, относительная плотность – 0,6;
- характеристики формующей матрицы: диаметр профилирующего отверстия – 3 мм, высота формующего пояса – 3 мм;
- значения технологических параметров: время задержки – 4,4 с, давление прессования – 50 МПа, скорость перемещения плунжера пресса – 60 мм/с.

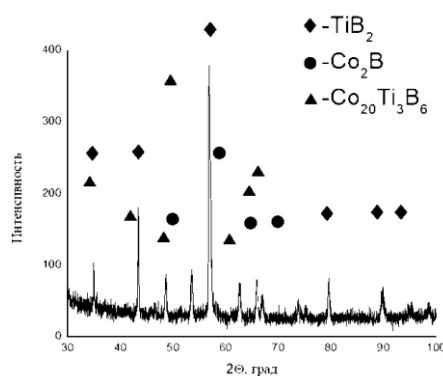
СВС-экструзия при таких условиях позволяет получить электроды диаметром 3 мм длиной 150 мм, что на 7,5 % меньше, чем прогнозируемая математической моделью длина. Теоретически

спрогнозированное влияние времени задержки на количество экструдированного материала согласуется с экспериментальными данными, что видно из рисунка 6б.

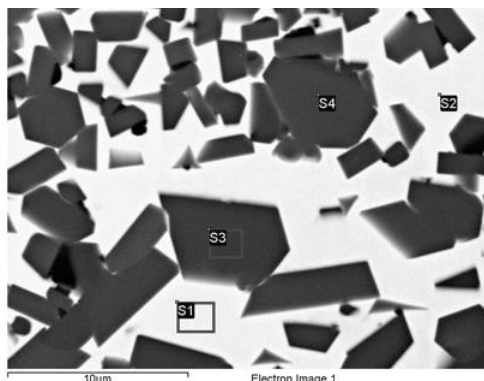
Важной характеристикой наплавочных электродов является однородность их структуры и фазового состава во всем объеме материала. Поэтому образцы для исследований отбирались из разных частей полученных СВС-электродов. Установлено, что СВС-электроды характеризуются однородной структурой по всей длине. Согласно результатам рентгенофазового и энергодисперсионного анализов, представленных на рисунке 7, основной упрочняющей фазой в материале СВС-электрода является диборид титана. Средний размер частиц TiB_2 составляет 1,8 мкм, их концентрация, согласно оценке по снимкам микроструктуры площади, занимаемой частицами, составляет 51 %. Матрица представлена τ -фазой ($Ti_3Co_{20}B_6$). Распределение микротвердости в продольном и поперечном сечениях СВС-электродов также однородно, ее значения лежат в пределах 1288-1782 кг/мм². Удельное электросопротивление полученного материала составило $2,43 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, плотность – 5,7 г/см³.



а

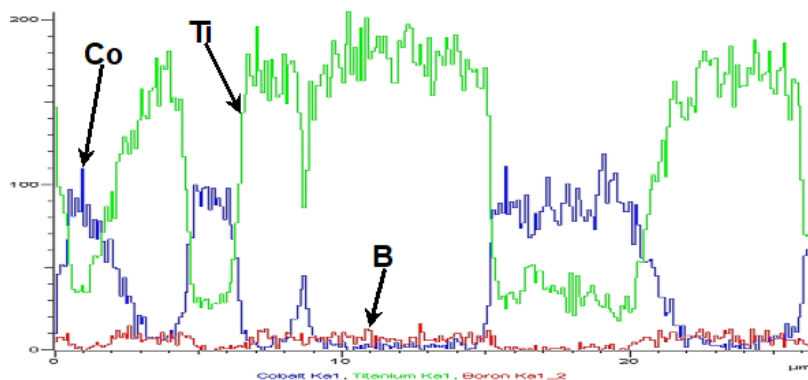
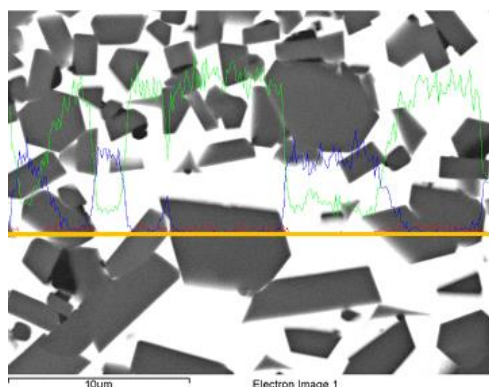


б



Спектр	Содержание элемента, масс. %		
	B	Ti	Co
S1	–	9,0	91,0
S2	–	9,0	91,0
S3	31,4	67,4	1,2
S4	33,1	66,9	–

в



г

Рисунок 7 – Микроструктура (а), дифрактограмма (б) и результаты энергодисперсионного анализа (в, г) СВС-электродов

В четвертой главе была исследована возможность получения покрытий со сплошной зоной сплавления путем наплавки на сталь полученными СВС-электродами. Как известно, при создании наплавленных слоев важным фактором, оказывающим большое влияние на качество и долговечность покрытий, является формирование зоны сплавления наплаваемого материала с материалом основы. Отсутствие или минимальное количество дефектов (несплошностей, пор, трещин) в зоне контакта покрытие-подложка так же, как и образование переходного диффузионного слоя, оказывает положительное влияние на адгезионную прочность покрытий. Микроструктура наплавленных слоев изучалась при помощи методов сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального и рентгенофазового анализов, изменение микротвердости исследовано по сечению покрытий.

Наплавка осуществлялась в атмосфере аргона на стальную подложку марки Ст3 в один проход. Исследовались покрытия, полученные ЭДН СВС-электродами $Ti+2B+0,9Co$ и $Ti+1,7B+0,6Fe$ при силе тока 80 А и 70 А, соответственно. Поверхность наплавленных слоев при визуальном осмотре не имела видимых дефектов (трещин, пор, кратеров). Толщина полученных покрытий составила 3-3,5 мм.

Согласно результатам РФА (рисунок 8), в покрытиях формируется сложный фазовый состав. Основная упрочняющая фаза TiB_2 переносится в покрытие и распределена по всей его высоте. Также в наплавленном слое формируются новые фазы ($FeTi$, Co_3Fe_7) и твердый раствор на основе железа ($Fe_{0,975}Ti_{0,025}$). Их образование обусловлено взаимодействием в сварочной ванне расплавленных наплавочного материала и материала подложки.

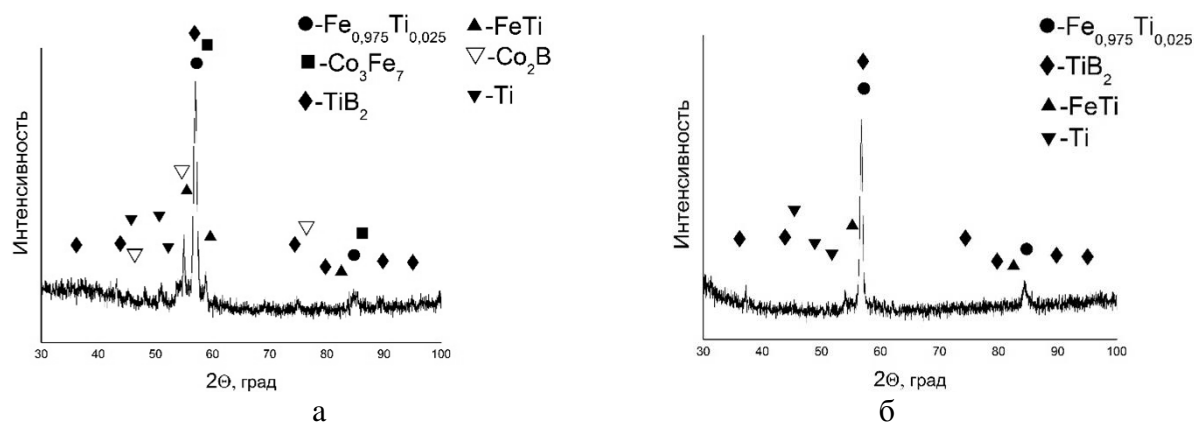


Рисунок 8 – Дифрактограммы поперечных сечений покрытий, наплавленных СВС-электродами $Ti+2B+0,9Co$ (а) и $Ti+1,7B+0,6Fe$ (б)

В микроструктуре присутствуют белые включения вольфрамсодержащей фазы, согласно ЭДА анализу, $Ti_{0,4}W_{0,4}B$. При контакте вольфрамового электрода с материалом основы, например во время зажигания дуги, возможен частичный переход вольфрама в зону наплавки и, как следствие, в покрытие. Результаты РФА не показали присутствие вольфрамсодержащих фаз в покрытии, так как его содержание мало (до 5 масс. %).

Можно отметить зональное строение микроструктуры покрытий: приповерхностная зона с крупными структурными составляющими, затем следует зона, в которой наблюдается измельчение структурных составляющих, а на границе наплавки и подложки формируется переходная зона. Высокая скорость теплоотвода способствует образованию мелкодисперсной структуры в области, близкой к подложке, размер структурных составляющих при приближении к поверхности покрытия укрупняется. На границе подложка-наплавленный слой вследствие взаимной диффузии легирующих элементов из СВС-электродов и железа формируется

переходный слой (рисунок 9). Выполненные исследования позволяют заключить, что граница подложка-наплавленный слой характеризуется непрерывностью сплавления.

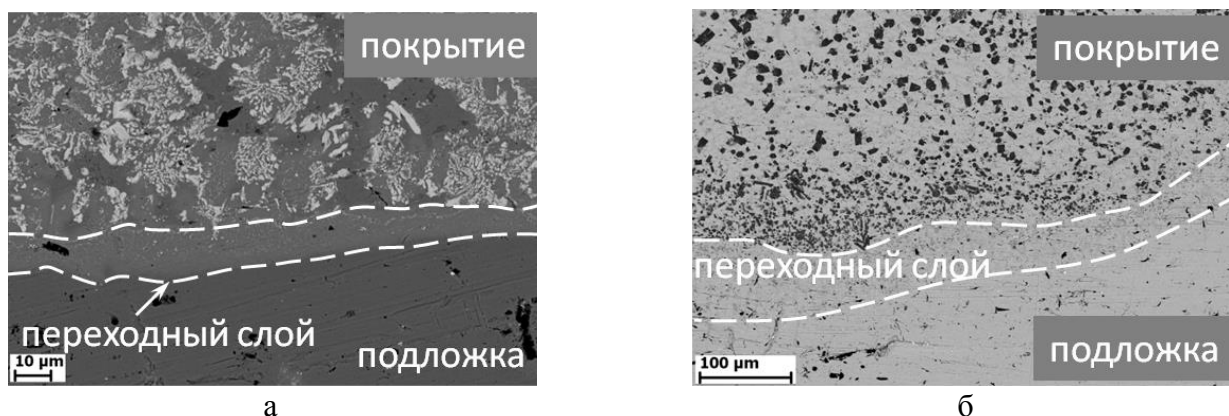


Рисунок 9 – Микроструктура покрытий, наплавленных в атмосфере аргона СВС-электродами Ti+2B+0,9Co (а) и Ti+1,7B+0,6Fe (б)

Наплавленные покрытия обладают повышенной микротвердостью по всей толщине по сравнению с микротвердостью стальной подложки (160-200 кг/мм²). Разброс значений микротвердости наплавленных покрытий (рисунок 10) связан с тем, что измерения микротвердости проводились по всей поверхности шлифа, индентор попадал как непосредственно в матрицу и упрочняющие частицы, так и в межфазные границы. Микротвердость отдельных упрочняющих частиц достигает значений 1450 кг/мм². Повышенная микротвердость матрицы металлокерамического покрытия (400-600 кг/мм²) связана с эффектом твердорастворного упрочнения железа элементами наплавляемых СВС-электродов, преимущественно кобальта.

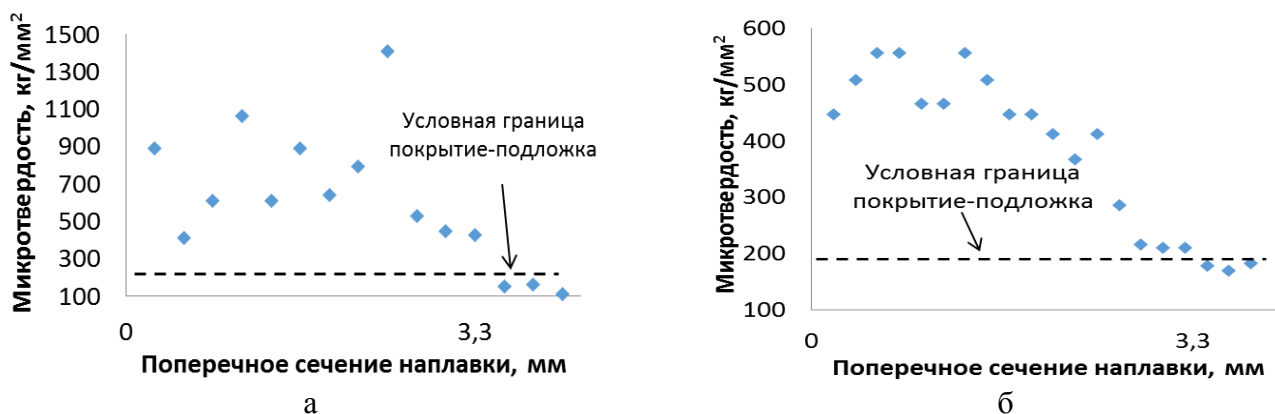


Рисунок 10 – Изменение микротвердости по толщине покрытий, наплавленных в атмосфере аргона СВС-электродами системы Ti+2B+0,9Co (а) и Ti+1,7B+0,6Fe (б)

Сплошная зона сплавления, присутствие упрочняющих фаз диборида титана в покрытиях, а также повышенная микротвердость наплавленных слоев дают основание полагать, что у рассматриваемых в данной главе СВС-электродов есть перспективы применения в качестве материалов для износостойкой наплавки.

Пятая глава посвящена изучению влияния силы сварочного тока на качество и строение покрытий. Изложены результаты анализа структуры и свойств покрытий, наплавленных на сталь 45 полученными СВС-электродами Ti+2B+0,9Co. Для сравнения наплавка также

осуществлялась СВС-электродами $Ti+1,7B+0,6Fe$ и промышленными электродами для износостойкой наплавки Т-620.

Для исследования триботехнических характеристик покрытий были отобраны образцы по внешним характеристикам наплавленного валика, при визуальном осмотре которых отсутствовали видимые трещины и поры (таблица 2). При ЭДН СВС-электродами $Ti+2B+0,9Co$ качественные валики получались при силе тока 100-110 А, СВС-электродами $Ti+1,7B+0,6Fe$ – при 70-80 А. Установлено, что наплавка при более высоких значениях силы сварочного тока приводит к выгоранию СВС-электродов: чем выше ток, тем интенсивнее происходит испарение электродного материала. Промышленными электродами марки Т-620 покрытия наплавливались при 150 А в среде воздуха.

Таблица 2 – Режимы наплавки, обеспечивающие формирование покрытий без видимых дефектов

№	Режим наплавки	Материал наплавки
1	100 А, Ar	$Ti+2B+0,9Co$, Ø3 мм
2	110 А, Ar	
3	70 А, Ar	$Ti+1,7B+0,6Fe$, Ø4 мм
4	80 А, Ar	
5	150 А, воздух	Т-620, Ø4 мм
6	без наплавки	подложка – сталь 45

Толщина покрытий, наплавленных по режиму №1 и №2 составляет 2-2,3 мм. В микроструктуре наплавленного слоя матрица представлена зернами твердого раствора кобальта в железе (рисунок 11а), концентрация титана в твердом растворе не превышает 1,5 масс. %. Упрочняющие боридные частицы TiB_2 , являющиеся центрами кристаллизации, имеют форму многогранников. Согласно литературным данным, температура в области горения дуги может достигать значений 5000-7000 °С, что в 1,5-2 раза выше температуры плавления диборида титана (3230 °С). Также известно, что TiB_2 обладает высокой удельной теплоемкостью (при 1273 °С – 1093,7 Дж/(кг·К), у кобальта 631,6 Дж/(кг·К)), в связи с чем для его расплавления требуется больше энергии. Учитывая это и то, что время нахождения наплавочного материала в зоне дуги невелико, можно заключить, что полное растворение всех частиц TiB_2 в процессе наплавки не происходит (растворяются частицы малого размера), а перенос материала на подложку осуществляется за счет плавления матрицы СВС-электродов.

Концентрация упрочняющих частиц в наплавленном слое составляет ~30 %. Из литературы известно, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладают защитные покрытия, доля упрочняющей фазы в которых составляет 25-30 %. В полученных по режиму №1 покрытиях преобладающий размер частиц TiB_2 составляет 2-5 мкм, размеры некоторых частиц достигают 11 мкм. Частицы диборида титана TiB_2 распределены по всему объему наплавки. Формируется переходный слой толщиной 16-20 мкм, представляющий собой твердый раствор кобальта в железе.

Для покрытий, наплавленных по режиму №2, характерно образование из частиц TiB_2 , вытянутых в одном направлении конгломератов, максимальный размер которых достигает 250-300 мкм. Ближе к зоне сплавления формируется область, в которой размер упрочняющих частиц преимущественно не превышает 5,5 мкм.

Микротвердость переходной зоны и покрытий, наплавленных СВС-электродами $Ti+2B+0,9Co$, превышает микротвердость подложки в 1,5 и 4 раза, соответственно.

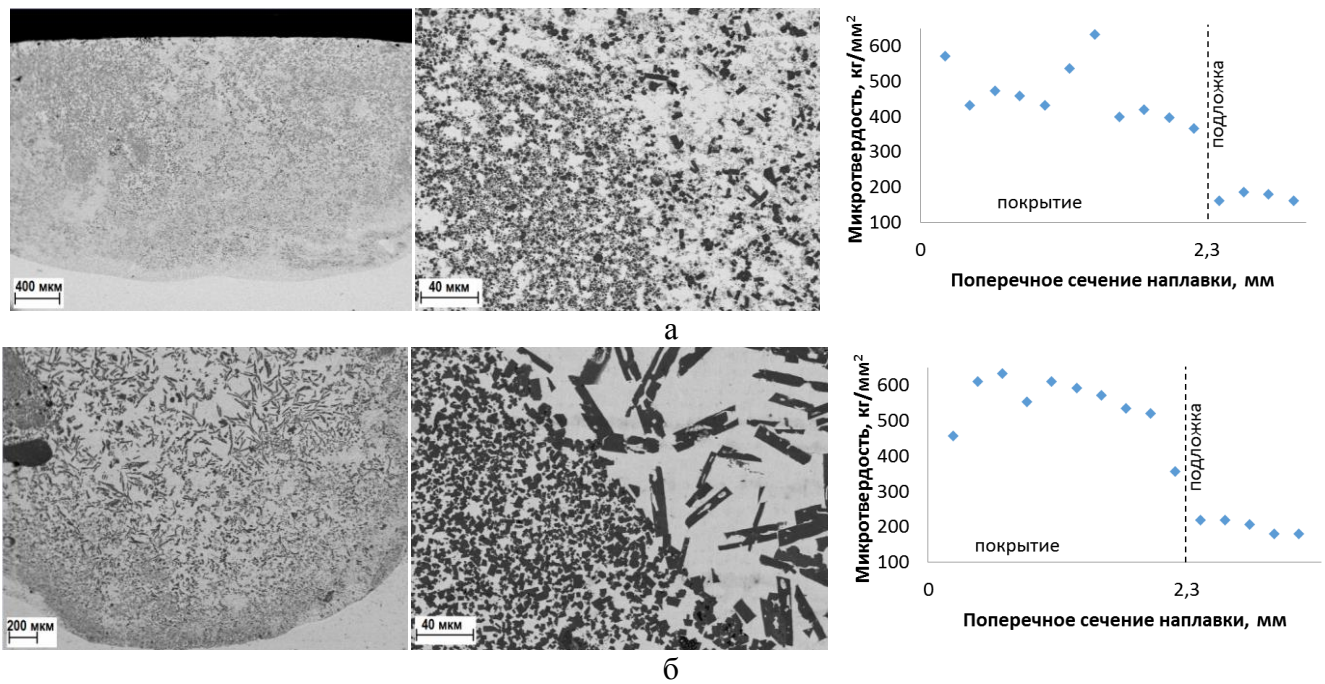


Рисунок 11 – Микроструктура и микротвердость покрытий, наплавленных СВС-электродами системы Ti+2V+0,9Co при 100 А (а) и 110 А (б)

Толщина покрытий, наплавленных СВС-электродами Ti+1,7V+0,6Fe по режимам №3 и №4 в обоих случаях составила 2,7-3,1 мм. В микроструктуре наплавки упрочняющие частицы TiV₂ распределены по всему наплавленному слою (рисунок 12), их концентрация в покрытии составляет ~30 %. Установлено, что наплавка при сварочном токе 80 А (режим №4, размер частиц 5,5-9 мкм) приводит к укрупнению частиц в 3-3,5 раза по сравнению с наплавкой при 70 А (режим №3, средний размер частиц 1-2,5 мкм). Это связано с большим перегревом сварочной ванны, который создает условия для роста частиц TiV₂ до размеров 29-32 мкм. Микротвердость покрытий по глубине наплавки мало изменяется и превышает микротвердость подложки в 2,1-2,5 раз при токе наплавки 70 А и в 1,9-2,4 раза при токе 80 А.

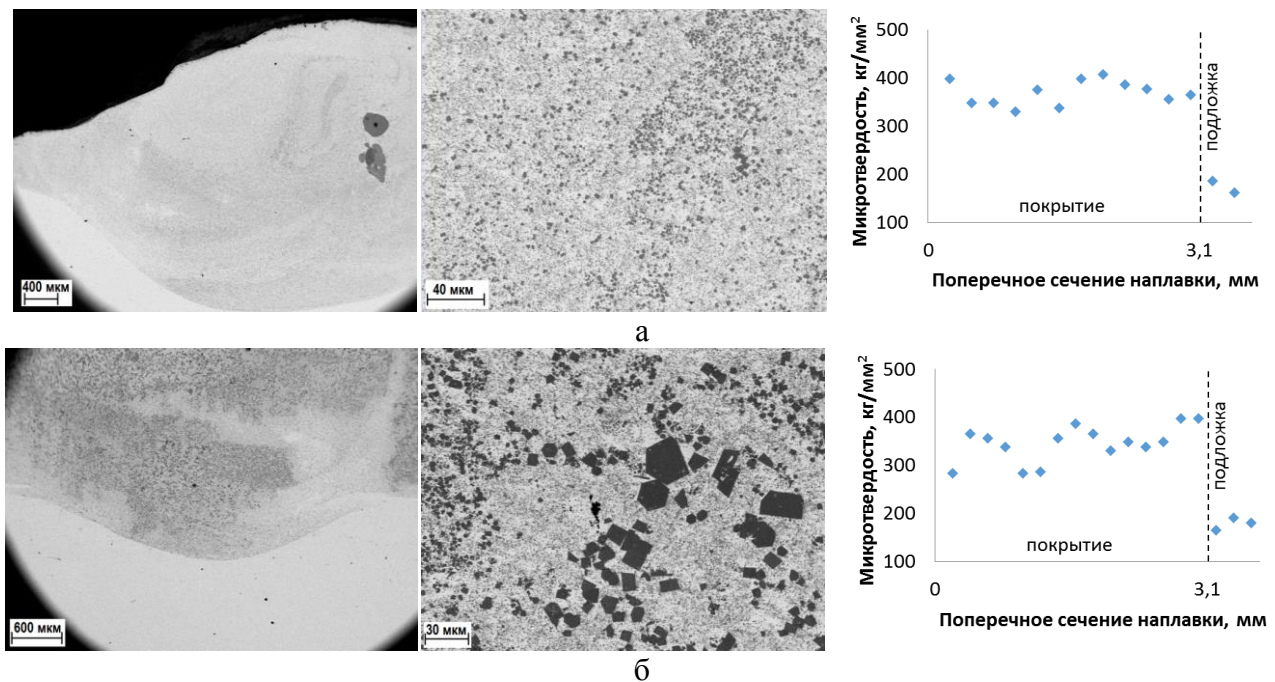


Рисунок 12 – Микроструктура и микротвердость покрытий, наплавленных СВС-электродами Ti+1,7V+0,6Fe при 70 А (а) и 80 А (б)

Покрyтия, наплавленные промышленными электродами Т-620 (режим №5) имели следующий химический состав: 8,5-9,5 масс. % Cr, 2,1-2,5 масс. % Si, 0,4-0,6 масс. % С, 0,3-0,5 масс. % Mn, остальное – Fe. Микроструктура полученных слоев (Рисунок 13а) однородная и представлена вытянутыми в направлении кристаллизации первичными карбидами, согласно результатам рентгенофазового анализа (рисунок 13б), Fe₁₄Cr₂C размером от 35 мкм до 160 мкм и эвтектическими колониями [γ-Fe + Fe₁₄Cr₂C].

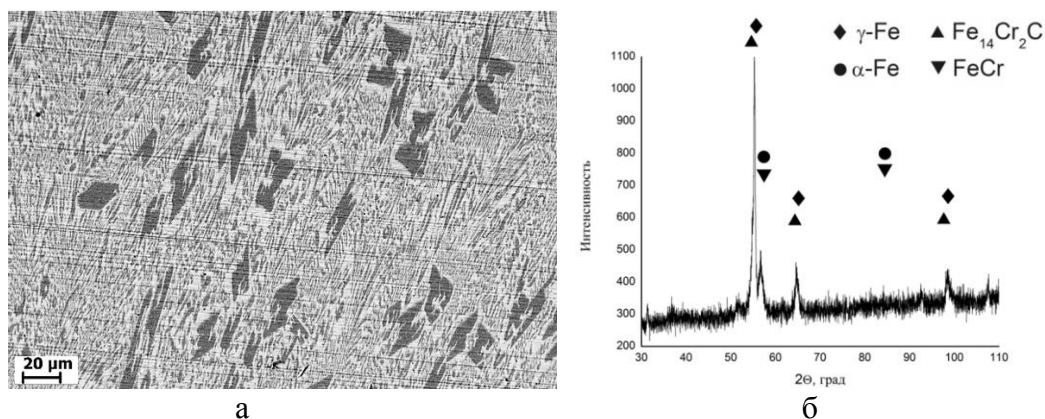


Рисунок 13 – Микроструктура (а) и дифрактограмма (а) покрытий, наплавленных промышленными электродами Т-620

Трибологические испытания проводились на образцах, наплавленных по режимам №1-5 и на необработанной поверхности стали долот (режим №6). По результатам трибологических испытаний, приведенным на рисунке 14, установлено, что наибольший износ характерен для покрытий, наплавленных СВС-электродами при более высоких значениях силы сварочного тока: 110 А для Ti+2В+0,9Со (режим №2) и 80 А для Ti+1,7В+0,6Fe (режим №4). Покрyтия, наплавленные промышленными электродами для износостойкой наплавки Т-620 (режим №5) показали уровень износа на порядок ниже, однако в 1,8 раз выше стальной поверхности (без наплавки – режим №6). Наилучшую износостойкость показали покрyтия, наплавленные СВС-электродами Ti+2В+0,9Со и Ti+1,7В+0,6Fe при 100 А и 70 А, соответственно. Их приведенный износ в первом случае был на уровне шероховатости $1 \cdot 10^{-7}$ и во втором случае составил 2,58 мм³/Н·м. Для этих покрытий также характерен низкий коэффициент трения до 0,06.

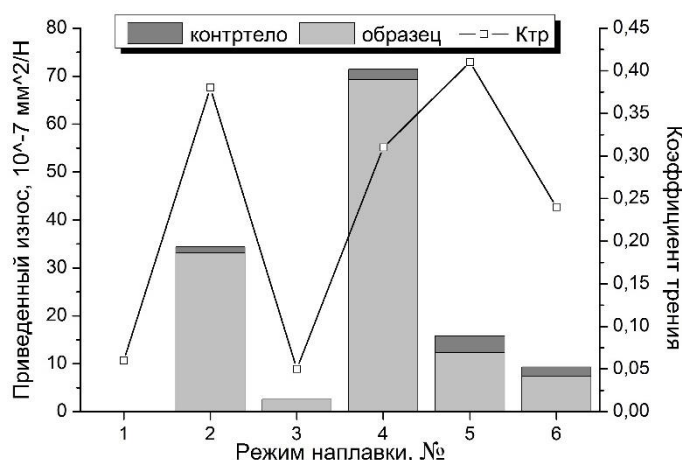


Рисунок 14 – Приведенный износ образцов после трибологических испытаний и установившийся коэффициент трения

Из экспериментальных зависимостей коэффициента трения (рисунок 15) видно, что для образцов, наплавленных СВС-электродами Ti+2V+0,9Co по режиму №1 область приработки практически отсутствует, а коэффициент трения остается постоянным на протяжении всего испытания. Для образцов, также наплавленных СВС-электродами Ti+1,7V+0,6Fe по режиму №3, характерна небольшая область приработки и постоянный коэффициент трения.

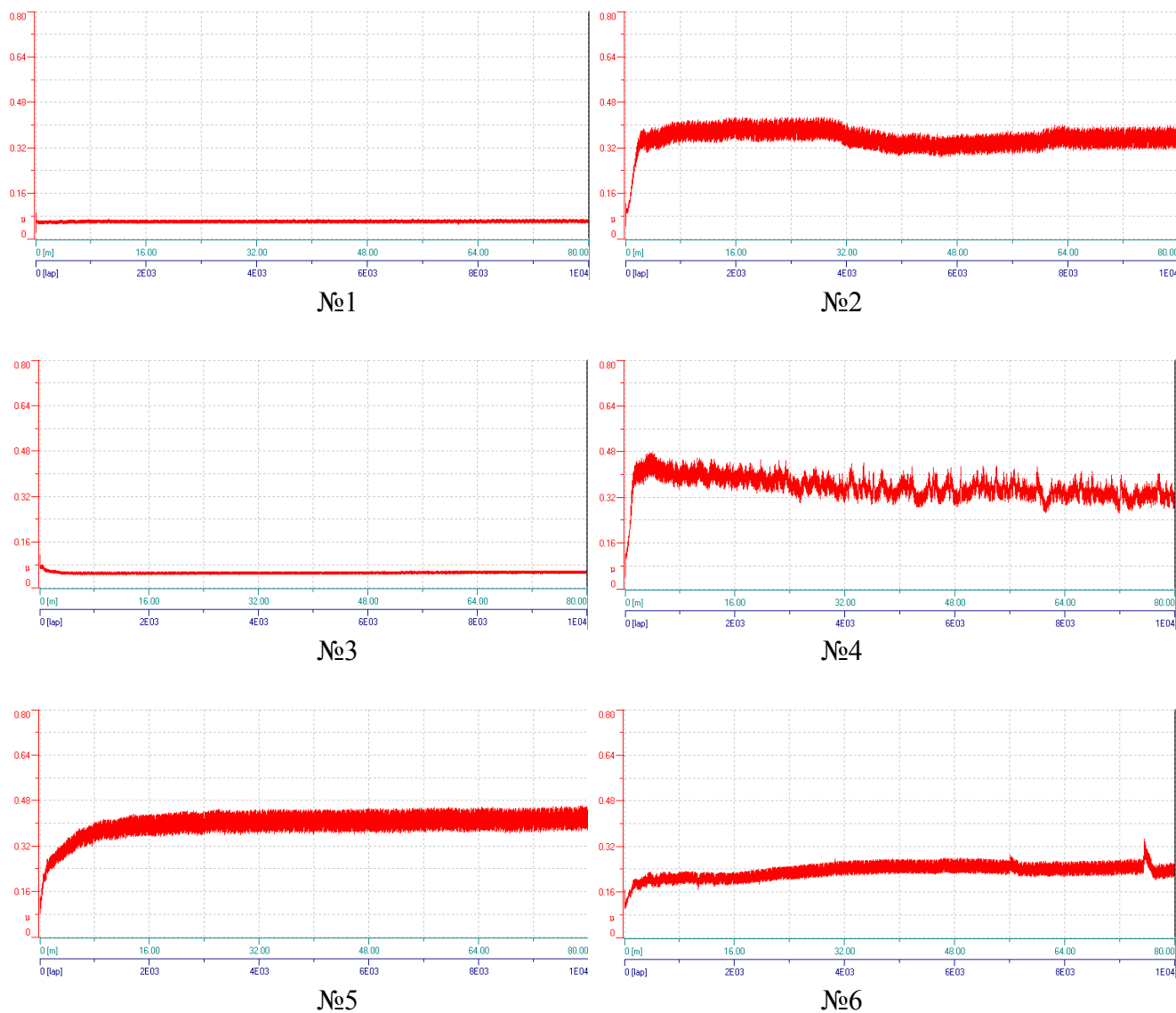


Рисунок 15 – Экспериментальные зависимости коэффициента трения от пробега

Таким образом, при наплавке при низких токах достигается значительно более высокий уровень износостойкости, что связано со структурными факторами наплавленных слоев. Присутствие в микроструктуре покрытий мелкодисперсных твердых упрочняющих частиц, распределенных по всему наплавленному слою, хорошо удерживающихся пластичной матрицей, способствует повышению как микротвердости наплавленного слоя, так и его износостойкости.

В ООО «АГРОГАЗСТРОЙ» Орловской области по режиму, показавшему формирование покрытий с наилучшими триботехническими характеристиками, СВС-электродами состава Ti+2V+0,9Co были наплавлены защитные покрытия на рабочие поверхности зубьев ковшей малогабаритных экскаваторов компании Hitachi (рисунок 16).



а



б

Рисунок 16 – Внешний вид ковша экскаватора (а) и зубьев ковшей с наплавленными СВС-электродами $Ti+2Co+0,9V$ защитными покрытиями (б)

В результате полевых испытаний было установлено, что износ деталей в процессе эксплуатации снижается, а срок их эксплуатации увеличивается в 2,6 раза, что позволяет снизить затраты на ремонт и закупку деталей.

Общие результаты и выводы по работе

Впервые изучены закономерности фазо- и структурообразования материала, полученного из состава $Ti+2V+0,9Co$ методом СВС-экструзии. Установлено, что в процессе СВС в первую очередь образуется фаза TiV_2 и при дальнейшем охлаждении формируются τ -фаза ($Ti_3Co_{20}V_6$) и Co_2V .

Исследовано влияние технологических параметров процесса получения материала из шихты состава $Ti+2V+0,9Co$ в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с высокотемпературным деформированием. На основе известных математических моделей установлены рациональные режимы процесса СВС-экструзии для получения электродов длиной более 100 мм. Определены характеристики формуемости материала. Установлено, что с увеличением времени задержки в синтезированном материале глубже проходят диффузионные процессы и увеличивается количество боридов кобальта.

Впервые методом СВС-экструзии получены электроды из порошковой смеси состава $Ti+2V+0,9Co$ диаметром 3 мм, длиной 150 мм. Показано, что структура таких изделий однородная во всем объеме материала. Установлено повышение микротвердости электродов по сравнению с микротвердостью электродов с комплексной металлической связкой железо-титан исходного состава $Ti+1,7V+0,6Fe$.

Показана возможность получения покрытий методом ЭДН, наплавленных СВС-электродами, с высокой адгезионной прочностью и износостойкостью. Установлено, что упрочняющие износостойкие частицы TiV_2 распределены по всему наплавленному слою, обеспечивая высокие значения микротвердости покрытия по всему сечению наплавки.

Впервые определены рациональные режимы наплавки металлокерамических покрытий СВС-электродами исходного состава $Ti+2V+0,9Co$ и $Ti+1,7V+0,6Fe$, при которых формируемый защитный слой обладает высоким уровнем триботехнических характеристик по сравнению с покрытиями, полученными наплавкой промышленными электродами Т-620. Установлено, что такие покрытия способствуют увеличению износостойкости поверхности в более чем 3 раза и снижению коэффициента трения в 6-8 раз по отношению к промышленной наплавке.

Разработанные СВС-электроды исходного состава $Ti+2V+0,9Co$ и режимы наплавки прошли полевые испытания на ООО «АГРОГАЗСТРОЙ». Установлено, что нанесение покрытий на зубья ковшей малогабаритных экскаваторов компании Hitachi обеспечивает увеличение срока службы упрочненных деталей в 2,6 раза.

Публикации по теме работы

1. Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, П.М. Бажин, А.М. Столин, **А.О. Жидович**. Особенности строения композиционных металлокерамических покрытий, формируемых с использованием многокомпонентных паст на железной основе // Композиты и наноструктуры. 2019. – Т. 11. – № 2. – С. 64-68.
2. **А.О. Zhidovich**, А.М. Stolin, А.Р. Chizhikov, Р.М. Bazhin, А.С. Konstantinov. The Effect of Gas Atmosphere on the Coating Formation by Electric Arc Surfacing with Cermet SHS Electrodes of the TiB_2-Co_2V Composition// Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2021. – Т. 6. – № 3. – С. 216-224. DOI: 10.17277/jamt.2021.03.pp.216-224
3. **А.О. Жидович**, А.М. Столин, А.П. Чижиков, А.С. Константинов. Исследование покрытий, полученных методом электродуговой наплавки в атмосфере аргона СВС-электродами системы $Ti-Co-V$ // Сварочное производство. – 2022. – №4. – С. 15-19. DOI: 10.34641/ТМ.2021.234.12.049
А.О. Жидович, А.М. Столин, А.П. Чижиков, А.С. Константинов. Исследование покрытий, полученных методом электродуговой наплавки в атмосфере аргона СВС-электродами системы $Ti-Co-V$ // Технология машиностроения. – 2021. – № 12. – С. 5-10. DOI: 10.34641/ТМ.2021.234.12.049
4. Р.М. Bazhin, N.V. Titov, **А.О. Zhidovich**, V.V. Avdeeva, A.V. Kolomeichenko, А.М. Stolin. Features of the carbo-vibroarcsurfacing in the development of multicomponent cermet wear-resistant coatings // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Т. 429. – № 127952 – С. 1-14. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127952
5. L.S. Stel'makh, **А.О. Zhidovich**, А.М. Stolin, S.V. Karpov. Establishment of rational modes of direct production of long products from powders of refractory compounds by SHS-extrusion // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2022. – Т. 7. – № 3. – С. 172-180. DOI: 10.17277/jamt.2022.03.pp.172-180

Патенты

Столин А.М., Бажин А.М., Чижиков А.П., Константинов А.С., **Жидович А.О.** «Способ получения электродов для электроискрового легирования на основе композиционного материала TiB_2-Co_2V ». Патент РФ на изобретение от 09.09.2022 г.