На правах рукописи

Антипов Михаил Сергеевич

ВЛИЯНИЕ НИХРОМА И ВОЛЬФРАМА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ СВС-ЭКСТРУЗИЕЙ

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

> АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

> > Черноголовка – 2025

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

Научный руководитель	Бажин Павел Михайлович доктор технических наук, заместитель директора по научной работе ИСМАН				
Официальные оппоненты	Страумал Борис Борисович доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, г. Черноголовка				
	Севостьянов Михаил Анатольевич кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, г. Москва				
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр Химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва				

Защита диссертации состоится <u>« 08 » октября 2025 года в 10.00</u> 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 Осипьяна, д.8.

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

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью организации) просьба направлять по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д. 8, ИСМАН, Диссертационный совет 24.1.124.01. и по электронной почте petrov@ism.ac.ru.

Автореферат разослан «____» ____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.т.н.

free

Петров Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Интенсивный износ и выход из строя металлорежущего инструмента (сверла, фрезы, метчики, резцы и т.д.) и, как следствие, простой целого комплекса оборудования для его замены, приводят к снижению производительности и увеличению себестоимости выпускаемой продукции на предприятиях. Также актуальной проблемой является износ медицинского стоматологического инструмента (экскаваторы, зажимы, зонды и др.). При этом на сегодняшний день существенным образом сказывается нехватка высококачественного металлорежущего и медицинского инструмента Российского производства. Одним из путей решения этой проблемы является создание защитных покрытий на инструменте методами PVD, CVD, оксидированием и т.д., каждый из которых имеет свою область применимости и ограничения. Для увеличения ресурса работы металлорежущего и медицинского инструмента перспективным представляется использование электроискрового легирования (ЭИЛ). При использовании данного метода достигаются высокая адгезия формируемых покрытий без заметного термического воздействия на обрабатываемую деталь, возможность локальной обработки поверхности ответственных деталей и узлов, в том числе крупногабаритных, отсутствие необходимости вести обработку в защитной среде, относительно простая методика нанесения защитного покрытия и т.д. На сегодняшний день для нанесения защитных покрытий методом ЭИЛ используют электроды на основе карбида вольфрама марок ВК и ТК, которые дороги и дефицитны, а также не в полной мере выполняют высокие требования, предъявляемые к защитным покрытиям на инструменте. Для успешной реализации метода ЭИЛ для массового применения на предприятиях необходимо решить проблему с расходуемыми электродами.

Перспективным направлением В получении твердосплавных, керамических И композиционных электродных материалов является использование процессов синтеза самораспространяющегося высокотемпературного (CBC) В сочетании с деформированием, которые реализуются высокотемпературным сдвиговым условиях В СВС-экструзии. Ранее сотрудниками лаборатории пластического деформирования материалов ИСМАН под руководством профессора А.М. Столина методом СВС-экструзии были получены различные по составу металлокерамические материалы на основе износостойкой составляющей (бориды, карбиды) и связующего металла (никель, кобальт, железо и др.), исследованы их структура и свойства. Отличительной особенностью было то, что используемые металлические матрицы не вступали в химическое взаимодействие с исходными компонентами или промежуточными продуктами горения и выполняли лишь функцию пластификатора. Принципиально новым направлением в продолжении развития метода СВС-экструзии является использование металлических связок, которые взаимодействуют с исходными реагентами и продуктами горения, что приводит к новым закономерностям фазо- и структурообразования при синтезе и последующем высокотемпературном сдвиговом деформировании с образованием новых упрочняющих фаз, способствующих повышению механических характеристик получаемых материалов. Поэтому изучение закономерностей формирования химического, фазового составов и микроструктуры материалов, установление влияния технологических параметров СВС-экструзии на всех стадиях формирования изделия, а также изучение влияния химического и фракционного состава структурных составляющих на физико-механические характеристики получаемых изделий при использовании металлических матриц, вступающих в химическое реагирование с исходными реагентами и продуктами горения, является актуальным направлением.

Актуальность работы подтверждается ее выполнением по проектам: Конкурс УМНИК-21 договор №17414ГУ/2022 от 22.04.2022 г., грант Президента Российской Федерации № МД-2909.2021.4.

Целью работы является разработка и получение методом CBC-экструзии длинномерных стержней на основе карбида титана с металлической связкой нихром (NiCr) и легирующей добавкой вольфрама, исследование их физико-механических характеристик и практического применения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

Исследовать влияние состава исходных компонентов Ti, C, (5-60) масс. % NiCr (X20H80) и легирующей добавки до 10 масс. % W, исходной плотности шихтовой заготовки на температуру и

скорость горения, на фазовый состав и структуру синтезированного материала, в условиях, моделирующих СВС-экструзию.

Изучить формуемость материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W в зависимости от содержания (5-60) масс. % NiCr, (5,10) масс. % W в условиях, сочетающих самораспространяющийся высокотемпературный синтез и высокотемпературное сдвиговое деформирование.

Исследовать формирование структуры, фазового состава и физико-механические характеристики материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W в зависимости от технологических параметров CBC-экструзии (время задержки перед прессованием, давление прессования, скорость перемещения плунжера пресса), исходного состава и параметров шихтовой заготовки.

Исследовать практическое применение полученных металлокерамических стержней в качестве электродов для нанесения защитных покрытий на металлорежущий и медицинский инструмент методом электроискрового легирования.

Научная новизна работы

1. Установлено влияние состава исходных компонентов и доли металлических связок в количестве (5-60) масс. % NiCr и (5,10) масс. % W, исходной плотности шихтовой заготовки в интервале 0,49-0,63 на температуру и скорость горения, а также на фазовый состав и структуру синтезированных материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W в условиях, моделирующих CBC-экструзию.

2. Впервые установлена взаимосвязь исходного состава синтезированных материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W и технологических параметров CBC-экструзии с фазовым составом, структурой и физико-механическими характеристиками экструдированных стержней. Установлено, что при CBC-экструзии за счет высоких температур горения и степени деформации в материале формируется упрочняющая фаза на основе карбида титана с небольшим содержанием хрома ($Ti_{0,97}Cr_{0,03}$)С, расположенная в нихромовой связке NiCr с локальным присутствием Cr_3C_2 . Установлено, что размер карбидных зерен уменьшается до 5,4 раза с увеличением доли нихромовой связки с 5 до 60 масс. %.

3. Впервые показано, что введение до 10 масс. % W в исходный состав материалов на основе TiC-NiCr в процессе CBC-экструзии приводит к образованию сложных карбидов ($Ti_{0,97}Cr_{0,03}$)С и ($Ti_{0,6}W_{0,4}$)С и зерен WC, расположенных в матрице NiCr. Установлено, что добавление до 10 масс. % W в исходную шихту ведет к увеличению микротвердости до 26,3 ГПа.

4. Выявлены закономерности влияния исходного состава применяемых электродов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W и энергии разряда при электроискровом легировании на формирование защитного покрытия на металлических подложках из быстрорежущей стали P6M5 и нержавеющей стали 08X17H13M2T. Установлено, что на поверхности защитного покрытия зерна упрочняющей фазы имеют размеры, схожие с размерами структурных составляющих в используемом электроде, а по мере приближения от поверхности покрытия к подложке их размер уменьшается и становится менее 100 нм. Установлены различия механических и трибологических свойств покрытий, полученных разработанными электродами и твердосплавными аналогами.

Практическая значимость работы

1. Разработан новый способ изготовления электродов для электроискрового легирования и электродуговой наплавки (патент РФ на изобретение № 2792027 от 15.03.2023 г.).

2. Разработано ноу-хау на технологические режимы СВС-экструзии для получения СВС-электродов из материалов на основе ТіС-нихром № 2-2021 от 18.11.2021 г.

3. Установлено оптимальное содержание нихромовой связки 20-40 масс. % NiCr, при которой достигается максимальная степень деформации, равная 0,67-0,7 для материалов на основе TiC-NiCr, и для материалов TiC-NiCr-W равная 0,61-0,69.

4. Разработаны и оптимизированы технологические режимы CBC-экструзии для получения длинномерных стержней диаметрами 3-10 мм и длиной до 300 мм из материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W с повышенными механическими свойствами по сравнению с имеющимися аналогами, которые были применены в качестве электродов для нанесения защитных покрытий методом электроискрового легирования на металлорежущий инструмент (сверла), ножи сельскохозяйственной техники, медицинский инструмент (экскаватор).

Основные положения, выносимые на защиту

Экспериментальные закономерности исследования температуры и скорости горения материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W в условиях, моделирующих CBC-экструзию, при изменении состава исходных компонентов Ti и C и доли металлических связок (5-60) масс. % NiCr и до 10 масс. % W, исходной плотности шихтовой заготовки в интервале 0,49-0,63.

Результаты исследования формуемости материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W в зависимости от доли металлических связок в исходной шихте, времени задержки перед приложением давления.

Экспериментальные результаты влияния технологических параметров CBC-экструзии (время задержки, скорость плунжера, давление прессования) на длину и качество получаемых длинномерных стержней.

Закономерности формирования фазового состава, структуры и физико-механических характеристик длинномерных стержней, полученных методом CBC-экструзии, из материалов на основе TiC-(20-40) масс. % NiCr- (5,10) масс. % W.

Результаты исследования влияния состава электрода, полученного из материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W, энергии разряда электроискрового легирования на фазовый состав и строение защитного покрытия, его механические, трибологические и коррозионные характеристики, а также показатели микробной адгезии.

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

Диссертационная работа Антипова М.С. «Влияние нихрома и вольфрама на структуру и свойства композиционных материалов на основе карбида титана, полученных СВС-экструзией» соответствует паспорту научной специальности: 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» - формуле паспорта диссертации, т.к. в диссертационной работе рассматриваются процессы горения, самораспространяющийся высокотемпературный синтез и высокотемпературное сдвиговое деформирование материалов на основе TiC-NiCr и TiC-NiCr-W, способы влияния на механизмы физико-химических превращений и на процессы фазо- и структурообразования композиционных материалов путем введения нихрома и вольфрама, приводящих к повышению физико-механических свойств получаемых стержней, представляющих практическую ценность.

Диссертационная работа соответствует областям исследования паспорту специальности:

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

пункт 4 «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения...», «связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками горения...», «...макрокинетика процессов горения...»;

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

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: научно-практической конференции стоматологов ФМБА России «Актуальные вопросы профилактики и лечения заболеваний полости рта», 18-19 апреля 2024 г., г. Москва; XXI Международная школа-конференция имени Б.А. Калина по направлению "Перспективные технологии получения материалов и методы их исследования" в цикле регулярных научных конференций «Новые материалы», 17–19 октября 2023 г., г. Москва; XIX и XX Российская ежеголная конференция молодых научных сотрудников И аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 2022-2023 гг., г. Москва; VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз2022), 22-25 марта 2022 г., г. Москва; XII-XIV Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», 2020-2022 гг., г. Тамбов; XVIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» 30 ноября – 03 декабря, 2021 г., г. Москва; Современная химическая физика на стыке физики, химии и

биологии 29 ноября - 3 декабря 2021 г., г. Черноголовка; XI Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии 06–09 апреля 2021 г., г. Москва.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 8 статей в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus (в т.ч. Q1), 11 тезисов в сборниках перечисленных выше конференциях, получен 1 патент РФ и 1 ноу-хау.

Личный вклад автора

Автором выполнен анализ литературных данных по классификации твердых сплавов и их методам получения, автор принял участие в постановке цели и задач диссертационного исследования. Автором лично проведены экспериментальные исследования по изучению температуры и скорости горения, формуемости, СВС-экструзии длинномерных стержней, выполнен количественный и качественный анализ полученных данных, на основе которых обобщены и сделаны соответствующие выводы. Автором были представлены научные результаты в виде публикаций, патента РФ, ноу-хау и выступлений на научно-практических конференциях.

Достоверность полученных результатов

Достоверность экспериментальных результатов и выводов подтверждается использованием современных аттестованных методов и методик при исследовании фазового состава, структуры, физико-механических металлокерамических композиционных материалов и трибологических свойств нанесенных защитных покрытий, а также подтверждается физически обоснованными экспериментальными результатами. Полученные научные результаты проведенных экспериментов хорошо воспроизводимы, согласуются с теоретическими данными, сопоставимы с научными результатами других исследователей.

Структура и объем работы

Диссертационная работа содержит введение, 5 глав, выводы и список используемых источников и приложение. Общий объем работы составляет 158 страниц, включая 81 рисунок, 26 таблиц и библиографию из 167 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен литературный обзор, соответствующий тематике диссертационной работы. Литературный обзор включает в себя описание традиционных твердых сплавов групп ВК и ТК, основных методов их получения. Показана возможность реализации процесса CBC в сочетании с высокотемпературным сдвиговым деформированием для получения длинномерных стержней, которые применяются в качестве электродов для нанесения защитных покрытий.

Во второй главе представлены объекты исследования и их характеристики, описание применяемого оборудования в данной работе и методики проведения экспериментов. Также приведены методики исследования получаемых образцов, которые включают в себя – исследование микроструктуры, фазового состава и физико-механические характеристики полученных материалов и покрытий на их основе. Все исследования проводились при помощи стандартных взаимодополняющих, аттестованных физико-химических методов и методик.

Исследование способности материала к высокотемпературному формованию проводилось в условиях свободного CBC-сжатия, схема эксперимента представлена на рисунке 1. Сущность проведения CBC-сжатия заключается в следующем: в верхней части исходной шихтовой заготовки помещали вольфрамовую спираль, на которую подавали электрический ток, в результате инициировался послойный процесс горения в режиме CBC. После прохождения фронта горения через всю заготовку и после заданного времени плунжером пресса деформировали синтезированный материал. Формуемость определяли, как степень деформации, которую рассчитывали по формуле 1:

$$\psi = \frac{S_{\rm K} - S_{\rm H}}{S_{\rm H}},$$
где
(1)

 $S_{\rm H}$ - площадь поперечного сечения исходной шихтовой заготовки, мм²;

 S_{κ} - площадь поперечного сечения деформированного материала, мм².



Рисунок 1 – Схема проведения СВС-сжатия

Получение длинномерных стержней проводили методом CBC-экструзии, который сочетает процессы CBC с высокотемпературным сдвиговым деформированием. Сущность проведения CBC-экструзии (рисунок 2a) заключается в том, спрессованная шихтовая заготовка (3) изолируется асбестовой тканью (4) с целью уменьшения теплопотерь при горении и помещается в пресс-форму (2). В верхней части шихтовой заготовки размещается инициирующее устройство (1) в виде вольфрамовой проволоки, к которой подавался электрический ток. Тепловой импульс от вольфрамовой спирали инициирует процесс послойного горения в режиме CBC. После прохождения волны горения через всю заготовку, по истечении заданного времени, синтезированный материал плунжером пресса экструдируется через формующую матрицу (5), где материал подвергается сдвиговой деформации, после чего попадает в канал для экструдированного стержня (6). В качестве неподвижной части выступает пуансон (7). В ходе CBC-экструзии были получены цилиндрические стержни диаметрами 3-10 мм длиной до 300 мм (рисунок 2б).



Рисунок 2 – Схема СВС-экструзии (а), длинномерные стержни, полученные СВС-экструзией (б)

Объектами исследования являлись шихтовые смеси, изготовленные из коммерческих порошков (таблица 1), обеспечивающие получение длинномерных стержней методом СВС-экструзии, состоящих из основных износостойких составляющих на основе карбидов титана и металлической матрицы NiCr и с добавками 5 и 10 масс. % легирующего элемента вольфрама. Составы представлены в таблице 2.

Порошок	Марка	ΓΟСΤ ΤΥ	Чистота	Средний размер
	порошка	1001,15	реагента, %	частиц, мкм
Ti	ПTC-1	ТУ-14-22-57-92	99,0	45
С	П-803	ГОСТ 7885-86	99,1	1
NiCr	ПХ20Н80	ГОСТ 13084-88	99,5	56-160
W	ПВ2	ТУ 14-22-143-2000	99,9	3,8-6,0

<u>Таблица 1 – Свойства коммерческих порошков</u>

№ состава		Содержание исходных реагентов, масс. %				
	Обозначение состава	Ti	С	NiCr	W	
1	TiC-5NiCr	76	19	5	-	
2	TiC-10NiCr	72	18	10	-	
3	TiC-20NiCr	64	16	20	-	
4	TiC-30NiCr	56	14	30	-	
5	TiC-40NiCr	48	12	40	-	
6	TiC-50NiCr	40	10	50	-	
7	TiC-60NiCr	32	8	60	-	
8	TiC-20NiCr-5W	60,8	15,2	19	5	
9	TiC-20NiCr-10W	57,6	14,4	18	10	
10	TiC-30NiCr-5W	53,2	13,3	28,5	5	
11	TiC-30NiCr-10W	50,4	12,6	27	10	
12	TiC-40NiCr-5W	45,6	11,4	38	5	
13	TiC-40NiCr-10W	43,2	10,8	36	10	

Таблица 2 – Содержание исходных компонентов в смеси

Третья глава посвящена получению методом CBC-экструзии длинномерных стержней на основе TiC-NiCr. В условиях, моделирующих CBC-экструзию (рисунок 3a), исследованы температура и скорость горения следующих составов TiC-(5-60)NiCr в зависимости от массового содержания нихрома и относительной плотности шихтовой заготовки. На рисунке 3а представлен характерный вид термограммы и схема, моделирующая процесс CBC-экструзии. По результатам экспериментальных исследований были определены оптимальные относительные плотности 0,5-0,62 шихтовых заготовок, при которых достигается максимальная температура и скорость горения. Установлено, что увеличение массового содержания нихрома с 5 до 60 масс. % ведет к снижению температуры с 2450 до 1610 °C и скорости горения с 50 до 3,8 мм/с. На рисунке 36 представлены характерные зависимости температуры и скорости горения от относительной плотности вначале повышается температура горения, а доходя до максимального значения 0,58 она падает. В процессе горения шихтовых заготовок вне зависимости от сувеличеные относительной вне зависимости от относительной плотности вначале повышается температура горения, а доходя до максимального значения 0,58 она падает. В процессе горения шихтовых заготовок вне зависимости от исследуемого состава наблюдался стационарный фронт горения.



Рисунок 3 – Характерный вид термограмм: а – для состава TiC-30NiCr, б – зависимость температуры и скорости горения от относительной плотности

Важной характеристикой синтезированных материалов на основе TiC-(5-60)NiCr, позволяющей оценить его способность к пластическому деформированию, является формуемость. Критерием формуемости является степень деформации синтезированного материала. На рисунке 4 представлены экспериментальные зависимости влияния содержания металлических матриц никеля и нихрома на степень деформации.



Рисунок 4 – Влияние содержания металлической связки (Ni и NiCr) на степень деформации

По полученным экспериментальным зависимостям массового содержания NiCr установлено, что увеличение доли металлической связки с 5 до 30 масс. % ведет к повышению степени деформации с 0,64 до 0,7. Из рисунка 4 видно, что после прохождения экстремума (0,7) происходит снижение степени деформации до 0,63. Такую зависимость можно объяснить следующим образом. С одной стороны, увеличение доли металлической связки приводит к повышению способности синтезированного материала к пластическому деформированию. С другой стороны, чем больше металлической связки в материале, тем в большей степени она забирает тепло, выделенное из ведущей реакции Ti+C, которое уходит на ее нагрев и расплавление, тем самым снижая формуемость синтезированного материала. Для сравнения полученных результатов, проведено исследование формуемости материалов с применением никелевой матрицы. Установлено, что максимальная степень деформации достигается для состава TiC-30NiCr – 0,70, в то время как для материала на основе TiC-40Ni степень деформации равняется 0,61. Такое снижение способности к формованию можно связать с температурой плавления металлической связки на основе Ni, которая составляет 1455°C, в то время как для NiCr – 1400°C.

На основе проведенных исследований температуры, скорости горения и формуемости были выбраны следующие составы TiC-(20-60)NiCr для проведения CBC-экструзии. Экспериментально установлены оптимальные технологические параметры СВС-экструзии (время задержки, скорость плунжера пресса и давление прессования), при которых достигается максимальная длина экструдированного стержня без видимых дефектов и трещин. Одним из важных технологических параметров метода СВС-экструзии, существенно влияющим на способность синтезированного материала к пластическому деформированию и, как следствие, к экструзии, является время задержки, отсчитываемое от момента инициирования химической реакции и до момента приложения давления. На основе полученных экспериментальных зависимостей длины экструдированного стержня от времени задержки (рисунок 5а) установлены оптимальные интервалы, при которых его длина максимальна. Эти зависимости носят экстремальный характер. При малых значениях времени задержки синтезированный материал выдавливается в виде отдельных частей, а при больших временах задержки материал остывает, теряет свои пластичные свойства, и экструзия прекращается. Установленная зависимость длины экструдированного стержня от скорости плунжера пресса также имеет экстремальный характер (рисунок 5б). При малых скоростях материал остывает в большей степени и теряет свои пластичные свойства, чем при больших. При этом следует отметить, что существует предельное значение скорости плунжера пресса, при превышении которой длина экструдированного стержня резко падает. Это наиболее заметно при экструзии стержней с меньшим диаметром (3 мм), т.к. скорость остывания после экструдирования у них выше, чем у стержней большего диаметра (5 мм). В отличие от предыдущих экспериментальных зависимостей, влияние длины экструдированного стержня от давления прессования имеет пороговое значение (рисунок 5в). При давлении до 50 МПа зависимость имеет линейный характер: с увеличением давления прессования увеличивается длина экструдированного стержня. При повышении давления прессования более 60 МПа оно уже не оказывает влияния на длину экструдированного стержня, т.к. синтезированный материал обладает пластичными

свойствами в определенном температурном диапазоне, то для его деформирования достаточно относительно невысокое давление (менее 50 МПа).



Рисунок 5 – Технологические параметры CBC-экструзии для состава TiC-30NiCr: а – время задержки, б – скорость плунжера, в – давление прессования

Микроструктура материала после CBC-экструзии (рисунок 6а, б) представлена в виде округлых зерен карбидной фазы на основе карбида титана с небольшим содержанием хрома ($Ti_{0,97}Cr_{0,03}$)С, локальным присутствуем карбидной фазы Cr_3C_2 и металлической матрицы NiCr. По результатам энергодисперсионного анализа (ЭДА) показано, что в зернах характерных для TiC возможно присутствие небольшого количества Cr со стехиометрией ($Ti_{0,97}Cr_{0,03}$)С (рисунок 6б). Для образца после CBC (рисунок 6в) также наблюдаются округлые зерна характерные для карбида титана, которые расположены в металлической матрице NiCr, при этом ЭДА не показал наличия хрома в зернах TiC и карбидную фазу Cr₃C₂.



Рисунок 6 – Микроструктура и энергодисперсионный анализ материала состава TiC-30NiCr: а, б – после CBC-экструзии, в – после CBC

Для исследования равномерности распределения фазового состава по длине экструдированных стержней были подготовлены образцы из трех областей, которые механически диспергировали до порошка с размером частиц менее 50 мкм для проведения рентгенофазового анализа (РФА) (рисунок 7а). Установлено, что вне зависимости от места съемки и диаметра стержня,

материал состоит из карбида титана с небольшим содержанием хрома ($Ti_{0,97}Cr_{0,03}$)С, небольшого содержания карбида хрома C_3C_2 (рисунок 7в) и металлической матрицы NiCr. Образование двойного карбида возможно при реализации процесса CBC-экструзии за счет высоких степеней деформации (до 0,99), при которых происходит замещение атомов титана атомами хрома с последующим образованием двойного карбида. Для расчета параметров кристаллической решетки TiC был добавлен Si в исследуемый порошок, а также для исключения аппаратной ошибки. Для определения количества замещенного титана атомами хрома была построена линейная зависимость Вегарда, которая показала, что максимальная доля Cr в зерне TiC может составлять до 5 ат. %. Установлено, что полученный материал методом CBC содержит карбид титана и нихром, при этом не было обнаружено образование карбидов ($Ti_{0,97}Cr_{0,03}$)С и Cr_3C_2 (рисунок 76).



Рисунок 7 – Рентгенофазовый анализ: а – стержень на основе TiC-30NiCr диаметром 3 мм после CBC-экструзии, б – образец после CBC, в – фрагмент дифрактограммы «а» в угловом диапазона 35-62°

Экспериментально установлено, что увеличение массового содержания NiCr до 60 масс. % в исходном составе приводит к снижению температуры и скорости горения и, как следствие, к уменьшению среднего размера карбидных зерен с 4,3 мкм до 0,8 мкм. Исследовано влияние степени деформации на размер карбидного зерна на примере состава TiC-30NiCr и проведено сравнение полученных экспериментальных значений с теоретическими (рисунок 8a, б). Установлено, что с увеличением степени деформации с 0,89 до 0,99 при CBC-экструзии происходит измельчение зеренной структуры. Экспериментальные кривые (кривые 3 и 4) находятся в диапазоне полученных

теоретических значений изменения среднего размера зерна, тем самым подтверждая хорошую качественную сходимость теории и практики.



Рисунок 8 – Зависимости среднего размера карбидного зерна: а – от степени деформации (диаметра) экструдированного стержня, б – результаты теоретических расчетов распределения среднего размера карбидного зерна по длине и радиусу экструдированного стержня

Установлено, что среднее значение микротвердости (таблица 3) полученных стержней и модуля Юнга находятся на уровне известных твердых сплавов ВК8 и T15K6, при этом их плотность существенно ниже. Так, например, для состава TiC-30NiCr среднее значение микротвердости составила 14,5 ГПа, модуль Юнга - 215-300 ГПа, плотность - 5,66 г/см³, что ниже в 2,6 раза по сравнению с плотностью сплава ВК8 и в 2 раза по сравнению с T15K6.

Четвертая глава посвящена исследованию получения методом CBC-экструзии длинномерных стержней на основе TiC-NiCr при дополнительном введении вольфрама в исходную смесь. В условиях, моделирующих CBC-экструзию, исследованы температура и скорость горения в зависимости от количества вольфрама и относительной плотности шихтовых заготовок. Установлено, что температура и скорость горения для составов TiC-(20-40)NiCr-(5,10) W снижается с увеличением доли вольфрама в исходной смеси. Так, температура горения снижается с 2180 до 1950 °C и скорость горения с 16,6 до 8,3 мм/с. На рисунке 9 представлен характерный вид термограмм, а также зависимости температуры и скорости горения от относительной плотности исходной шихтовой заготовки на примере для составов TiC-30NiCr-(5,10)W.



Рисунок 9 – Характерный вид термограмм: а – для состава TiC-30NiCr-5W, б – для состава TiC-30NiCr-10W, в, г – зависимости температуры и скорости горения от относительной плотности исходной заготовки

При исследовании формуемости (рисунок 10) установлено, что максимальная степень деформации достигается для составов TiC-30NiCr-5W и TiC-30NiCr-10W равная 0,69 и 0,68 соответственно. По полученным экспериментальным зависимостям видно, что максимальная степень деформации для состава TiC-30NiCr незначительно выше по сравнению с составами, в которые добавляется 5 и 10 масс. % W. Установлено, что полученные максимальные значения степени деформации для изучаемых составов находятся в доверительных интервалах, тем самым позволяя вводить тугоплавкий элемент, такой как вольфрам, без существенной потери пластичности синтезированного материала.



Рисунок 10 – Зависимости степени деформации от содержания нихрома и вольфрама в исходной смеси

На основе проведенных исследований температуры, скорости горения и формуемости для проведения CBC-экструзии были выбраны составы TiC-(20-40)NiCr-(5,10)W. Экспериментально были установлены оптимальные технологические параметры CBC-экструзии для составов TiC-(20-40)NiCr-(5,10)W (время задержки, скорость плунжера пресса и давление прессования), при которых достигается максимальная длина стержня без видимых макродефектов. Зависимости длины экструдированного стержня от технологических параметров для изучаемых составов аналогичны зависимостям для составов TiC-NiCr. В качестве примера, на рисунке 11 представлен характерный вид полученных зависимостей длины стержня от технологических параметров CBC-экструзии для состава TiC-30NiCr-5W.



Рисунок 11 – Технологические параметры CBC-экструзии для состава TiC-30NiCr-5W: а – время задержки, б – скорость плунжера пресса, в – давление прессования

Микроструктура полученного материала (рисунок 12) после CBC-экструзии представляется в виде округлых зерен карбидных фаз ($Ti_{0,97}Cr_{0,03}$)С и ($Ti_{0,6}W_{0,4}$)С, металлической матрицы NiCr, и с локальным присутствием следов карбида вольфрама - WC. Для фазы ($Ti_{0,6}W_{0,4}$)С наблюдается кольцевая микроструктура. В качестве ядра выступает TiC (на рисунке 12 серая область), далее следует чередование зон, одна из которых обогащена вольфрамом вследствие растворимости WC в кристаллической структуре TiC за счет реакции замещения (на рисунке 12 светлая область).



Рисунок 12 – Микроструктура и энергодисперсионный анализ материала состава TiC-30NiCr-5W

Установлено, что рентгенофазовый анализ полученных стержней после CBC-экструзии (рисунок 13а) вне зависимости от места съемки и диаметра стержня имеет следующий набор фаз: карбид титана с небольшим содержанием хрома (Ti_{0,97}Cr_{0,03})C, титано-вольфрамовый карбид (Ti_{0,6}W_{0,4})C, карбид вольфрама WC и металлическая матрица NiCr. Результаты РФА спека, полученного методом CBC без приложения давления (рисунок 13б), показали, что его фазовый состав включает в себя карбид титана с небольшим содержанием вольфрама (Ti_{0,98}W_{0,02})C и металлическую матрицу NiCr. Образованные при CBC-экструзии фазы (Ti_{0,97}Cr_{0,03})C и (Ti_{0,6}W_{0,4})C не обнаружены, что подтверждает влияние сдвигового высокотемпературного деформирования и высокие степени деформации на фазовый состав полученных стержней.



Рисунок 13 – Рентгенофазовый анализ: а – стержней состава TiC-30NiCr-5W после CBCэкструзии, б – спека состава TiC-30NiCr-5W после CBC без приложения давления

Исследованы физико-механические свойства полученных стержней из следующих составов TiC-30NiCr-(5,10)W. Установлено, что добавление 5 и 10 масс. % W в исходную шихту ведет к увеличению среднего значения микротвердости до 2,2 раза по сравнению с материалами группы СТИМ-2/30H и до 1,4 раза по сравнению с полученными материалами на основе TiC-30NiCr, при этом их микротвердость в 1,6 раза выше по сравнению с твердым сплавом BK8, а плотность ниже в 2,5 раза (таблица 3). С увеличением микротвердости наблюдается и увеличение значений модуля Юнга для исследуемых составов. Так, для состава TiC-30NiCr модуль упругости достигается до 300 ГПа, а для состава TiC-30NiCr-10W – 540 ГПа. Для твердого сплава BK8 наблюдаются повышенные значения модуля Юнга, но сравнивая его минимальное (240 ГПа) и максимальное (600 ГПа) значения можно предположить о неоднородности материала, что нельзя сказать о полученных материалах в данной работе.

Обозначение состава	Микротв ердость, ГПа	Среднее значение микротве рдости, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Среднее значение модуля Юнга, ГПа	Плотно сть, г/см ³	Порист ость, %	Удельное электросопро тивление, мкОм·см
TiC-30NiCr	11,5-17,4	14,5	215-300	258	5,66		155
TiC-30NiCr- 5W	13,9-18,8	16,4	360-430	395	5,81		165
TiC-30NiCr- 10W	14,1-26,3	20,2	410-540	475	6,01	0,5-1	173
СТИМ-2/30Н	8,5-9,5	9,0	-	-	5,8		57,7
СТИМ-3Б	9,6-12,5	11,1	-	_	5,37		47,5
BK8	6,4-18,9	12,7	240-600	420	14,8	~5	27,6
Т15К6	11,7-25,6	18,7	450-520	485	11,5	\sim	64,3

Таблица 3 – Сравнение физико-механических свойств полученных материалов с аналогами

В пятой главе исследован процесс нанесения защитных покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ) на установке SE-5.01 (г. Томск). Технологические режимы нанесения защитных покрытий представлены в таблице 4. В качестве электродов применялись стержни следующих составов: TiC-30NiCr, TiC-30NiCr-(5,10)W. Выбор данных составов обоснован повышенными значениями микротвердости по сравнению с другими материалами. В качестве исходной подложки была выбрана быстрорежущая сталь P6M5, которая широко применяется для изготовления металлорежущего инструмента.

Таблица 4 – Технологические режимы нанесения защитных покрытий

№ образца	Частота колебаний э/м вибратора, Гц	С, мкФ	U, B	Энергия разряда, Дж	
1	160±10	180	50	0,2	
2		200	50	0,3	
3		250	70	0,6	
4		300	80	1	
5	Металлическая подложка Р6М5				

В настоящей работе были построены экспериментальные зависимости суммарной эрозии анода и суммарного привеса катода от времени нанесения защитных покрытий, приведенных к единице площади обрабатываемой поверхности подложки при четырех режимах ЭИЛ. Полученные зависимости имеют классический вид для процессов ЭИЛ, т.е. суммарная эрозия анода и суммарный привес катода изменяются симбатно (рисунок 14). На кривых вначале наблюдается привес, далее присутствуют перегибы, которые соответствуют максимальному привесу катода и максимальной убыли анода. После прохождения максимума происходит процесс обратной эрозии материала покрытия на CBC-электрод. Точка перегиба характеризует порог хрупкого разрушения материала формируемого покрытия и соответствует максимальному накоплению остаточных и термических напряжений. Эти напряжения возникают под действием нестационарных и резко неравномерных температурных полей, создаваемых периодическими электрическими разрядами.



Рисунок 14 – Зависимости суммарной эрозии анода и суммарного привеса катода: a – TiC-30NiCr, б – TiC-30NiCr-5W, в – TiC-30NiCr-10W

Поскольку процесс ЭИЛ протекает в трех агрегатных состояниях, то было исследовано влияние энергии разряда на количество перенесенных карбидных зерен в твердой фазе и коэффициент переноса. Установлено, что с увеличением энергии разряда с 0,2 до 1 Дж происходит увеличение перенесенных зерен в твердой фазе с 3 до 29 %, при этом коэффициент переноса также повышается с 62,5 до 92,5 % (рисунок 15). Например, при ЭИЛ СВС-электродами известной марки СТИМ-2/30H (упрочняющая фаза TiC, расположенная в металлической матрице никеля) коэффициент переноса составляет более 70 масс. %, а для промышленных аналогов электродов марки T15K6 он составляет 45-55 масс. %, для BK8 - 60-65 масс. %. Снижение коэффициента переноса материала можно связать с тугоплавкостью компонентов в электроде. Следовательно, можно контролировать процесс нанесения защитных покрытий и регулировать технологические режимы под разные задачи.



Рисунок 15 – Зависимости количества перенесённых зерен в твердой фазе и коэффициента переноса электродного материала от энергии разряда

РФА показал, что защитные покрытия, полученные электродом состава TiC-30NiCr (рисунок 16а), состоят из карбидной фазы (Ti_{0,97}Cr_{0,03})C, интерметаллидной матрицы Fe_{0,7}Ni_{0,3} и твердого раствора на основе никеля Cr-Ni-Fe-C. Во время процесса нанесения покрытия при взаимодействии материала CBC-электрода и исходной подложки происходит образование интерметаллида Fe_{0,7}Ni_{0,3}. Это подтверждает химическое взаимодействие расплавленных компонентов материалов используемого электрода и подложки, что обусловливает их высокую адгезионную прочность. При нанесении защитных покрытий электродами с добавлением 5 и 10 масс. % W дополнительно в покрытии наблюдается упрочняющая фаза (Ti_{0,6}W_{0,4})C (рисунок 16б).



Рисунок 16 – Рентгенофазовый анализ покрытий, полученных электродами: a – TiC-30NiCr, б – TiC-30NiCr-(5,10)W

На рисунках 17 и 18 представлены результаты СЭМ и ЭДА поперечного сечения покрытий, нанесенных на подложку P6M5. Микроструктура полученных покрытий представлена преимущественно в виде округлых карбидных зерен, расположенных в металлической матрице. На поверхности нанесенных покрытий наблюдаются зерна микронного размера, а при приближении к подложке размер карбидных зерен уменьшается до 100 нм. Из рисунков видно, что образцы с покрытиями в поперечном сечении имеют три области: покрытие, переходная зона и материал исходной подложки. На границе покрытия и подложки за счет высоких температур происходит диффузионно-конвективное перемешивание материала электрода с поверхностью исходной подложки.



Рисунок 17 – Характерный вид микроструктуры и концентрационные кривые распределения химических элементов по выделенной линии поперечного сечения покрытия, нанесённого электродом состава TiC-30NiCr



Рисунок 18 – Характерный вид микроструктуры и концентрационные кривые распределения химических элементов по выделенной линии поперечного сечения покрытия, нанесённого электродами составами TiC-30NiCr-10W

Проведены трибологические испытания полученных защитных покрытий по схеме «шарикдиск» при нагрузке 30 Н. В качестве контртела использовался шарик из карбида вольфрама диаметром 5 мм. Для сравнения были выбраны коммерческие электроды из твердых сплавов марок ВК8, Т15К6 и СТИМ-2/30Н. Также было исследовано влияние энергии разряда на шероховатость (рисунок 19), толщину наносимого покрытия (рисунок 20), приведенный износ и коэффициент трения. Установлено, что при увеличении энергии разряда с 0,2 до 1 Дж происходит увеличение шероховатости Ra с 4,39 до 6,52 мкм и толщины наносимого покрытия с 23 до 79 мкм. Толщина нанесенных покрытий коммерческими электродами составила: ВК8 и T15К6 – 55 мкм, СТИМ-2/30H – 54 мкм.



Рисунок 19 – Зависимость шероховатости нанесенного покрытия от энергии разряда ЭИЛ: а – TiC-30NiCr, б - TiC-30NiCr-5W, в – TiC-30NiCr-10W, г – коммерческие электроды



Рисунок 20 –Зависимость толщины наносимого покрытия от энергии разряда: а – TiC-30NiCr, б - TiC-30NiCr-5W, в – TiC-30NiCr-10W

Приведённый износ (рисунок 21), как критерий износостойкости защитных покрытий, показал, что максимальный износ наблюдается у исходной подложки P6M5 - 26,2·10⁻⁵ мм³/Н·м, а достигается нанесенного электродом минимальный покрытия, состава V TiC-30NiCr-10W - 4,86·10⁻⁵ мм³/Н·м. Значения приведенного износа покрытий, нанесенных коммерческими электродами ВК8 и T15K6 равны 7,3·10⁻⁵ мм³/Н·м и 7,97·10⁻⁵ мм³/Н·м соответственно. Износ покрытий на основе СТИМ-2/30Н составил 6,49·10⁻⁵ мм³/Н·м. Таким образом, полученные защитные покрытия позволили увеличить износостойкость в 5,3 раза по сравнению с исходной подложкой Р6М5 и до 1,6 раза по сравнению с аналогами. Установлено, что механизм износа полученных покрытий является абразивным. Коэффициент трения для исходной подложки Р6М5 составил 0,25, а для остальных случаев – 0,21.



Рисунок 21 – Износ нанесенных защитных покрытий и исходной подложки Р6М5

В работе проведена сравнительная оценка коррозионной стойкости образцов, изготовленных из стали 08X17H13M2T с защитными покрытиями под влиянием щелочных дезинфектантов с учетом оценки применения оригинальной методики микробной адгезии и конфокальной электронной микроскопии в эксперименте in vitro. Были получены защитные покрытия на основе TiC-NiCr при трех режимах ЭИЛ: 0,1, 0,3 и 0,9 Дж. Модельные образцы были изготовлены из стоматологического инструмента – экскаватора. В качестве агрессивной среды были выбраны рабочие растворы дезинфицирующего класса: «Трилокс», «Венделин», «Мегадез орто». Проведенные коррозионные испытания по соответствующим протоколам при комнатной температуре 20°C и времени выдержки 120 часов не показали изменения массы образцов, что

свидетельствует об отсутствии деградации покрытия. Показано, что на контрольных образцах (без покрытия) установлено увеличение микробной адгезии и признаки, указывающие на деструкцию и коррозию, зависящие от концентрации дезинфицирующего средства. Оптимальные результаты по показателям микробной адгезии S. aureus и C. albicans были получены на образцах с защитным покрытием, полученном при 0,3 Дж и имеющих шероховатость Ra 3,26 мкм. Таким образом, в работе показана принципиальная возможность снижения микробной адгезии путем нанесения защитного покрытия методом ЭИЛ на медицинский инструмент при использовании разработанных электродных материалов.

На сверла диаметрами 8 и 10 мм, изготовленные из быстрорежущей инструментальной стали P6M5 (рисунок 22a), были нанесены защитные покрытия электродами следующих составов TiC-(20-40)NiCr. Установлено, что за счет нанесенных защитных покрытий удалось повысить износостойкость сверл до 11,6 раз по сравнению с используемыми, а также установлено, что в процессе сверления существенно уменьшается нагрев в зоне резания и обеспечивается хорошее стружкообразование. Также были нанесены защитные покрытия электродами составов TiC-30NiCr и TiC-30NiCr-(5,10)W на ножи соломоизмельчителя (рисунок 22б), которые были установлены на зерноуборочный комбайн «TUCANO» и показали увеличение ресурса работы до 2,3 раза по сравнению с используемыми. Была изготовлена опытная партия ножей (рисунок 22в), которые были установлены на сдвижные косилки ORSI на трактор MT3 82 для сезонного покоса травы в г.о. Черноголовка.



Рисунок 22 – Нанесенные защитные покрытия: а – сверла Р6М5 диаметром 8 и 10 мм, б – ножи соломоизмельчителя, в – ножи для косилки

Общие результаты и выводы по работе

1. Впервые установлено влияние состава исходных компонентов Ti, C, (5-60) масс. % NiCr и легирующей добавки 5 и 10 масс. % W, исходной плотности шихтовой заготовки 0,49-0,63 на температуру и скорость горения, на фазовый состав и структуру синтезированных материалов. Показано, что в условиях, моделирующих CBC-экструзию, увеличение доли NiCr с 5 до 60 масс. % в исходном составе ведет к снижению температуры горения с 2450°C до 1610°C и скорости горения с 50 мм/с до 3,8 мм/с.

2. Впервые исследована формуемость материалов на основе TiC-(5-60)NiCr и TiC-(20-40)NiCr-(5,10)W в зависимости от содержания NiCr и вольфрама в условиях, сочетающих самораспространяющийся высокотемпературный синтез и высокотемпературное сдвиговое деформирование. Показано, что максимальная степень деформации равная 0,67-0,7 достигается при содержании 20-40 масс. % NiCr, при добавлении 5 масс. % W максимальная степень деформации равная 0,67-0,7 достигается при содержании 20-40 масс. % W – 0,68.

3. Установлены оптимальные технологические параметры CBC-экструзии (время задержки перед прессованием, давление прессования, скорость перемещения плунжера пресса) для материалов на основе TiC-(20-60) масс. % NiCr и TiC-(20-40) масс. % NiCr-(5,10) масс. % W, в результате которых были получены длинномерные стержни диаметром 3-10 мм и длиной до 300 мм без видимых дефектов.

4. Установлено, что полученные стержни на основе TiC-NiCr состоят из округлых зерен карбида титана с небольшим содержанием хрома (Ti_{0,97}Cr_{0,03})C, которые расположены в нихромовой связке NiCr с локальным присутствием фазы Cr₃C₂. Установлено, что размер карбидных зерен для составов на основе TiC-NiCr уменьшается более чем в 5 раз с 4,3 до 0,8 мкм при увеличении нихромовой связки с 5 до 60 масс. %. При добавлении 5 и 10 масс. % W дополнительно наблюдаются зерна (Ti_{0,6}W_{0,4})C, представленные в виде кольцевой микроструктуры, с локальным присутствием фазы WC по всему объему экструдированного стержня. Установлено, что вне зависимости от диаметра стержня фазовый состав в материале не изменяется.

5. Впервые установлено, что добавление 5 и 10 масс. % W в исходную шихту Ti-C-NiCr ведет к увеличению среднего значения микротвердости до 2,2 раза по сравнению со СТИМ-2/30H и до 1,4 раза по сравнению с полученными материалами TiC-30NiCr, при этом микротвердость в 1,6 раза выше по сравнению с твердым сплавом BK8, а их плотность уменьшается в 2,6 раза. Показано, что с увеличением доли упрочняющих фаз в полученных материалах наблюдается повышение модуля Юнга до 540 ГПа.

6. Полученные стержни были использованы в качестве электродов для нанесения защитных покрытий методом электроискрового легирования. Установлено, что полученные защитные покрытия состоят преимущественно из упрочняющей фазы $(Ti_{0,97}Cr_{0,03})C$, расположенной в интерметаллидной матрице $Fe_{0,7}Ni_{0,3}$ и твердом растворе Cr-Ni-Fe-C. При добавлении до 10 масс. % W дополнительно наблюдается фаза $(Ti_{0,6}W_{0,4})C$. Показано, что на поверхности покрытий карбидные зерна имеют размеры, как в используемых электродах, а по мере приближения к подложке их размер уменьшается и становится менее 100 нм.

7. Проведенные трибологические испытания показали, что приведенный износ покрытий, полученных коммерческими электродами BK8 и T15K6, выше до 1,6 раза по сравнению с электродами на основе TiC-NiCr-W и до 1,3 раза электродами на основе TiC-NiCr. Установлено, что износ исходной подложки P6M5 в 5,3 раза больше, чем у покрытий на основе TiC-NiCr-W и в 4,2 раза больше, чем у покрытий на основе TiC-NiCr.

8. Исследована коррозионная стойкость разработанных защитных покрытий в зависимости от энергии разряда при ЭИЛ (шероховатость Ra 2,55-3,73 мкм) на медицинском инструменте – экскаваторе, изготовленном из хирургической стали (08X17H13M2T), в агрессивных химических щелочных дезинфектантах «Трилокс», «Мегадез орто» и «Венделин» при комнатной температуре и времени выдержки 120 часов. Показано, что на контрольных образцах (без покрытия) установлено увеличение микробной адгезии и признаки, указывающие на деструкцию и коррозию, зависимые от концентрации дезинфицирующего средства. Оптимальные результаты по показателям микробной адгезии S. aureus и C. albicans были получены на образцах с защитным покрытием, полученным при 0,3 Дж и имеющих шероховатость Ra 3,26 мкм.

Публикации по теме диссертации:

1. Antipov, M. S. The effect of tungsten on the temperature, combustion rate, and structure of a TiC–NiCr-based material synthesized in the SHS mode / M. S. Antipov, A. S. Ivanov, A. O. Sivakova, P. M. Bazhin // Physics of Metals and Metallography. -2025. -T. 126. $-N_{2}$ 1. -C. 42–47. DOI: 10.1134/S0031918X24601082.

2. Gvetadze R. Cermet coatings obtained by electric spark alloying to increase service life of dental instruments / R. Gvetadze, S. Arutyunov, S. Kryuchkov, **M. Antipov**, P. Bazhin, M. Mustafaev, A. Deshev, V. Tsarev, M. Andreev, I. Katkov, S. Agasieva, V. Avdeeva // Ceramics International. – 2024. – T. 50. – C. 52613–52621. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.10.112.

3. Антипов, М. С. Особенности процесса измельчения зеренной структуры материала TiC-NiCr, полученного методом CBC-экструзии / М. С. Антипов, Л. С. Стельмах, А. М. Столин, П. М. Бажин // Неорганические материалы. – 2024. – Т. 60. – № 2. – С. 154–163. DOI: 10.31857/S0002337X24020039.

Antipov, M. S. Distinctive Features of the Grain Size Reduction Process in a TiC–NiCr Material Produced by SHS Extrusion / M. S. Antipov, L. S. Stel'makh, A. M. Stolin, P. M. Bazhin // Inorganic Materials. – 2024 – T. 60. – № 2. – C. 154–163. DOI: 10.1134/S0020168524700894.

4. Дешев, А.В. Влияние щелочных дезинфектантов на микробную адгезию и антикоррозионные свойства медицинских инструментов из нержавеющей стали с металлокерамическими покрытиями / А. В. Дешев, М. Ш. Мустафаев, Р. Ш. Гветадзе, Т. В. Царева, М. С. Антипов, П. М. Бажин, С. Д. Арутюнов // Клиническая стоматология. – 2024. – Т. 27. – № 4. – С. 89–97. DOI: 10.37988/1811-153X_2024_4_89.

5. Антипов, М. С. Влияние легирующего элемента W на структуру и свойства металлокерамических материалов на основе Ti + C + NiCr, полученных методом CBC-экструзии / М. С. Антипов, А. С. Иванов // Новые огнеупоры. – 2024. –Т. 8. – С. 35–41. DOI: 10.17073/1683-4518-2024-8-35-41.

6. Антипов, М. С. Структура, механические и трибологические свойства композиционных покрытий на основе Ti-Cr-C-Ni-Fe / М. С. Антипов, П. М. Бажин, А. С. Константинов, А. П. Чижиков, А. О. Жидович, А. М. Столин // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26. – № 4. – С. 117–128. DOI: 10.55652/1683-805Х_2023_26_4_117.

Antipov, M. S. Structure and mechanical and tribological properties of Ti–Cr–C–Ni–Fe composite coatings / M. S. Antipov, P. M. Bazhin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, A. O. Zhidovich, A. M. Stolin. // Physical Mesomechanics. – 2023. – T. 26. – \mathbb{N} 6. – P. 691–700. DOI: 10.1134/S1029959923060085.

7. Антипов, М. С. Формуемость, фазовый состав и микроструктура материалов на основе TiC - (5-50 мас. %) NiCr, полученных в условиях свободного CBC-сжатия / М. С. Антипов, П. М. Бажин, А. П. Чижиков, А. С. Константинов, А. М. Столин, Н. Ю. Хоменко // Журнал неорганической химии. – 2022. – Т. 67. – № 10. – С. 1498–1504. DOI: 10.31857/S0044457X22100361.

Antipov, M. S. Formability, Phase Composition, and Microstructure of TiC–(5–50 wt %) NiCr–Based Materials Obtained by Free SHS Compression / M. S. Antipov, P. M. Bazhin, A. P. Chizhikov, A. S. Konstantinov, A. M. Stolin, N. Yu. Khomenko // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2022. – T. $67. - N_{\odot}. 10. - P. 1658-1664.$ DOI: 10.1134/S0036023622100564.

8. Антипов, М. С. Металлокерамический материал на основе карбида титана для повышения стойкости шиберных затворов / М. С. Антипов, А. П. Чижиков, А. С. Константинов, П. М. Бажин // Новые огнеупоры. – 2021. – Т. 4. – С. 34–37. DOI: 10.17073/1683-4518-2021-4-34-37.

Antipov, M. S. Sintered Material Based on Titanium Carbide to Increase the Service Life of Slide Gates / M. S. Antipov, A. P. Chizhikov, A. S. Konstantinov, P. M. Bazhin // Refractories and Industrial Ceramics. – 2021. – T. 62. – №. 2. – P. 208–211. DOI: 10.1007/s11148-021-00584-7.

Патент

Антипов М.С., Бажин П.М., Столин А.М., Чижиков А.П., Константинов А.С. «Способ изготовления электродов для электроискрового легирования и электродуговой наплавки», патент РФ на изобретение № 2792027 от 07.07.2022 г.

Hoy-xay

Антипов М.С., Бажин П.М., Столин А.М., Константинов А.С., Чижиков А.П. «Технологические режимы СВС-экструзии для получения СВС-электродов из материалов на основе TiC-Hихром», № 2-2021, 2021 г.