

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние воздействия сильноточного импульсного пучка электронов на прочностные свойства и структуру керамических материалов

УДК 666.3:537.533

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Устюжанин Семён Вадимович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии»	Хасанов О.Л.	профессор, д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально - гуманитарных наук	Кашук И. В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л. А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии»	Хасанов О.Л.	профессор, д.т.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01

Код результата	Результат обучения
P1	Осуществлять сбор, анализ и обобщение научно-технической информации в области материаловедения и технологии материалов с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, глобальных информационных ресурсов
P2	Работать с патентным законодательством и авторским правом при подготовке документов к патентованию и оформлению ноу-хау
P3	Выполнять маркетинговые исследования и анализировать технологический процесс как объекта управления, разрабатывать технико-экономическое обоснование инновационных решений в профессиональной деятельности
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов, быть готовым к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, позволяющих получать и диагностировать материалы и изделия различного назначения.
P6	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов
P7	Внедрять системы управления качеством продукции в области материаловедения, эксплуатировать оборудование, позволяющее диагностировать материалы и изделия из них, в том числе наноматериалы
P8	Действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения, выбирать наиболее рациональные способы защиты и порядка в действиях малого коллектива в чрезвычайных ситуациях
P9	Общаться в устной и письменной формах на государственном языке РФ и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности, подготавливать и представлять презентации планов и результатов собственной и командной деятельности, формировать и отстаивать собственные суждения и научные позиции
P10	Самостоятельно осваивать новые методы исследования, изменять научный, научно-педагогический и производственный профиль своей профессиональной деятельности
P11	Применять принципы рационального использования природных ресурсов, основные положения и методы социальные, гуманитарные и экономические подходы при решении профессиональных задач с учетом последствий для общества, экономики и экологии.
P12	Использовать основные категории и понятия общего и производственного менеджмента в профессиональной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Хасанов О.Л.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Устюжанин Семён Вадимович

Тема работы:

Влияние воздействия сильноточного импульсного пучка электронов на прочностные свойства и структуру керамических материалов

Утверждена приказом директора (дата, номер)	59-76/С от 28.02.2021
---	-----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>1) Источники литературы: базы данных www.sciencedirect.com, www.elibrary.ru, www.scopus.com, www.elsevierscience.ru.</p> <p>2) Оборудование и лабораторный инвентарь НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского политехнического университета и Института сильноточной электроники СО РАН</p> <p>3) Объекты исследования: изделия из карбида бора.</p> <p>4) Требования к продукту: влияние обработки поверхности образца на его поверхностную структуру и свойства.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>1) провести литературный обзор по классификации, методам получения, применению и физико-химическим свойствам карбида бора; 2) провести напыление плёнок из алюминия и титана на поверхность образца; 3) провести модификацию поверхности образца после напыления сильноточным импульсным пучком электронов; 4) исследовать образец на трещиностойкость и морфологию поверхностного слоя.</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Изображение поверхности полученные разными методами, графики трещиностойкости, рентгенограммы, энергетические спектры.</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоемкость</p>	<p>Кащук И. В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Скачкова Л. А.</p>
<p>Приложение раздел на английском языке</p>	<p>Ажель Ю.П.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Разделы на русском языке: Литературный обзор, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность</p>	
<p>Разделы на иностранном языке: Литературный обзор</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>24.02.2021 г.</p>
--	----------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Директор НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии»</p>	<p>Хасанов О.Л.</p>	<p>профессор, д.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>4БМ92</p>	<p>Устюжанин Семён Вадимович</p>		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Уровень образования магистр
 Отделение школы Отделение материаловедения
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
 (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы: 14.06.2021

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.02.2020	1. Литературный обзор	20
20.03.2020	2. Экспериментальная часть	20
20.04.2020	3. Результаты и их обсуждение	30
25.05.2020	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоемкость	10
25.05.2020	5. Социальная ответственность	10
25.05.2020	6. Приложение на иностранном языке	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии»	Хасанов О.Л.	профессор, д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии»	Хасанов О.Л.	профессор, д.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 142 с., 47 рис., 29 табл., 42 источников, 1 прил.

Ключевые слова: Керамика карбида бора, титан, алюминий, поверхностный слой, осаждение, электронный пучок, трещиностойкость.

Объектом исследования являются: Структура, фазовый состав и свойства керамики из карбида бора, подвергнутой облучению интенсивным импульсным электронным пучком, а также поверхностного слоя системы «пленка (Ti/Al) / (B₄C-керамика) подложка», подвергнутой комбинированной обработке, сочетающей напыление тонкого титанового и алюминиевого покрытия и последующее облучением интенсивным импульсным электронным пучком.

Цель работы – выявление закономерностей эволюции структуры и фазового состояния в поверхностном слое в результате обработки интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком следующих материалов:

- Керамики из карбида кремния, полученной методом SPS;
- Системы «пленка (Ti/Al) / (B₄C -керамика) подложка».

В процессе выполнения работы проводилось облучение интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛО» керамики из карбида кремния, полученной методом SPS при различных плотностях энергии пучка электронов и системы «пленка (Ti/Al) / (B₄C - керамика) подложка» при различном количестве импульсов воздействия пучка электронов. Выполнено исследование дефектной субструктуры методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии, фазовый состав поверхностного слоя керамики исследовали методами рентгенофазового анализа, элементный состав изучали методами микрорентгеноспектрального анализа, определяли физико-механические характеристики. В результате выполненных исследований получены образцы с измененным элементным фазовым составом и состоянием дефектной структуры

поверхностного слоя, и увеличенными прочностными характеристиками.

Степень внедрения результатов исследования на настоящий момент не очевидна.

Область применения: аэрокосмическая, атомная, оборонная, промышленности и машиностроение (пары трения, коррозия, циклические нагрузки и т.д.),

Экономическая эффективность/значимость работы на данном этапе исследований не определена.

В будущем планируется продолжить исследования по модификации поверхности керамики на основе карбида бора с целью выявления оптимальных режимов обработки.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

политип: Структуры, имеющие различный порядок укладки кристаллографически сходных плотноупакованных слоёв или слоистых «пакетов» атомов.

вакуумно-дуговое нанесение покрытий: Физический метод нанесения покрытий (тонких плёнок) в вакууме путём конденсации на подложку (изделие, деталь) материала из плазменных потоков, генерируемых на катоде-мишени в катодном пятне вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала электрода.

модифицирование: Воздействие, при котором изменяются структура и свойства материала.

твёрдость: Свойство материала сопротивляться пластической деформации, вызванной местным контактным воздействием, обычно сводящегося к внедрению в материал более твёрдого тела - индентора.

морфология: Совокупная характеристика объектов, включающая в себя их размер, форму и пространственную организацию (агрегатную структуру).

электронный пучок: Поток электронов, движущихся по близким траекториям в одном направлении, имеющий размеры, значительно большие в направлении движения, чем в поперечной плоскости.

наноструктура: совокупность наноразмерных объектов искусственного или естественного происхождения, свойства которой определяются не только размером структурных элементов, но и их взаимным расположением в пространстве

Оглавление

РЕФЕРАТ	6
Определения	8
Оглавление	9
Введение	11
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	13
1.1 Керамика. Основные понятия.....	13
1.2 Основные свойства и структура керамических материалов.....	14
1.2.1. Структура керамики	14
1.2.2 Механические свойства.....	14
1.2.3 Термомеханические и термические свойства	14
1.2.4 Электрофизические и химические свойства.....	16
1.3. Методы получения порошков.....	17
1.3.1 Химические методы получения порошков.....	18
1.3.2 Физические методы получения порошков.....	19
1.4 Технологическая подготовка порошков	21
1.5. Компактирование порошковых материалов.....	22
1.5.1. Методы формовки	22
1.5.2. Методы спекания порошков.....	23
1.6. Области применения функциональных керамики	25
1.7 Методы улучшения свойств керамических материалов.....	26
1.7.1 Электронно- лучевая обработка материалов	26
1.7.2 Уникальность использования в современных технологиях СИПНЭ для модификации свойств материалов	27
1.7.3 Классификация электронных пучков	31
1.7.4 Направления модифицирования материалов	33
ГЛАВА 2. ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	35
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	49
3.1 Характеристика используемого порошка	49
3.2 Характеристика образцов керамики из карбида бора, полученных методом SPS	52
3.3. Структура, элементный и фазовый состав поверхностного слоя системы «металлическая пленка / (В ₄ С керамика) подложка», перед облучением импульсным электронным пучком	55
3.4. Структура, элементный и фазовый состав поверхностного слоя системы «металлическая пленка / (В ₄ С керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком.	66
3.5. Механические испытания.....	82
Заключение.....	86
ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	89
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	89
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	89
4.1.2 SWOT-анализ	91
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	94
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	94
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	95

4.3. Бюджет научно-технического исследования.....	99
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	104
ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	108
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	108
5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов	109
5.3 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	111
5.3.1 Организационные мероприятия.....	111
5.3.2 Технические мероприятия.....	112
5.4 Условия безопасной работы	118
5.5 Экологическая безопасность.....	120
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	122
Список используемых источников.....	126
Приложение раздел на английском языке	131

Введение

Благодаря уникальным комбинациям физических и механических свойств керамика из карбида бора широко используется в различных отраслях промышленности: в машиностроении, атомной энергетике, на предприятиях оборонной промышленности и силовой электронике [1, 2].

Самыми главными недостатками керамики из карбида бора являются ее хрупкость и, как следствие, низкая трещиностойкость, а также сложность обработки. К тому же, она непригодна для работ при циклических нагрузках, а также при механических или термических ударах.

Для улучшения физических, механических и трибологических свойств детали из керамических материалов, в частности карбида кремния, в ряде случаев достаточно повысить свойства лишь ее поверхности. Основными, на современном этапе развития науки и техники, методами модификации поверхности карбида кремния и материалов на его основе являются осаждение покрытий, лазерная обработка, имплантация и метод диффузионного насыщения поверхностного слоя легирующими элементами [4,5].

В настоящей работе исследуются структура фазовый состав и свойства керамики из карбида кремния, подвергнутой облучению интенсивным импульсным электронным пучком, а также поверхностного слоя системы «Ti/Al (пленка) / В₄С (подложка)», подвергнутой облучению интенсивным импульсным электронным пучком.

В ИСЭ СО РАН разработаны и функционируют импульсная электроннопучковая установка, применяемая для облучения поверхности твердых тел и установка для вакуумно-дугового нанесения покрытий. Обе эти разработки подразумевают использование уникальной технологии поверхностной обработки керамических и металлокерамических материалов. Научная новизна работы заключается в том, что используемые в работе установки для электрон-ионно-плазменной модификации по совокупности параметров являются уникальными не только в России, но и за рубежом [4].

Результаты исследований могут быть использованы в областях промышленности и техники (аэрокосмической, атомной, оборонной, промышленности и машиностроении), в условиях, когда основные эксплуатационные свойства детали определяются состоянием ее поверхности (пары трения, коррозия, циклические нагрузки и т.д.), а также высокие удельными характеристиками (удельный предел прочности и т.д.).

Результаты, полученные в работе, были представлены на Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (ТГУ, 27-30 апреля 2021);

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Керамика. Основные понятия

Керамика – это изделия из поликристаллических материалов, которые состоят из соединений неметаллов с металлами или друг с другом. Их получают формованием и обжигом исходного сырья, которым могут быть вещества природного происхождения (глины, силикаты, кварц и т.д.), а также вещества, полученные искусственно (чистые оксиды, карбиды, нитриды и др.). [5]

Керамические материалы по химическому составу разделяют на:

1. Оксидная керамика.
2. Безоксидная керамика.

Так же керамику разделяют по функциональному назначению:

1. Строительная,
2. Химически стойкая,
3. Тонкая,
4. Техническая,
5. Огнеупорная.

В настоящее время в различных областях техники используется техническая керамика, поэтому можно выделить следующие группы:

1. Конструкционная керамика,
2. Инструментальная керамика,
3. Электрорадиотехническая керамика.

1.2 Основные свойства и структура керамических материалов

1.2.1. Структура керамики

Структура большинства керамических изделий варьируется от относительно простой до очень сложной. Микроструктура может быть полностью аморфной (стекловидной); полностью кристаллической; или сочетание кристаллического и стекловидного. В последнем случае стеклообразная фаза обычно окружает мелкие кристаллы, связывая их вместе. [6]

Для фильтров необходима пористость и в таких случаях поры формируют специально. Но в большинстве работ требуется безпористая керамика, так как они сильно ухудшают прочностные свойства.

1.2.2 Механические свойства

При нормальной температуре для керамики характерно хрупкое разрушение, оно наступает после малой упругой деформации.

Сильнее всего на керамику влияют размер зерен, пористость и состав. Уменьшение размера зерна и увеличение содержания кристаллических фаз приводит к повышению прочности.

При 5%-ой пористости прочность снижается примерно на четверть от прочности материала без пор, а при 10%-ой уже в два раза.

Так же основной прочностной характеристикой керамики является способность материала противостоять распространению трещин, также известная как трещиностойкость.

И последняя важная характеристика - твердость

1.2.3 Термомеханические и термические свойства

Большинство керамических материалов используются для работы при высоких температурах. Для оценки термомеханических свойств

используются следующие характеристики: прочность керамики при рабочих температурах, температура деформации под нагрузкой и ползучесть.

Теплофизические свойства керамики - теплоемкость, тепловое расширение, теплопроводность. Эти свойства очень важны для керамических материалов, так как они определяют ее термостойкость.

Теплоемкость - количество тепла, которое расходуется при нагревании 1 кг вещества на 1 градус (удельная теплоемкость с), и которое используется для усиления колебаний атомов вещества и возбуждения электронов. Механизмы теплопередачи в твердом теле: упругими колебаниями атомов – фононами и движение электронов. Для оксидной керамики характерна передача тепла фононами. Коэффициент теплопроводности численно равен величине свободного пробега фонона.

КЛТР оксидов обычно повышается с увеличением температуры. Это объясняется ослаблением при этом сил связи ионов в кристаллической решетке.

Термические свойства показывают способность материала противостоять воздействию высоких температур. Для керамики к таким свойствами относят огнеупорность, термостойкость и термическое старение.

Огнеупорность характеризуется температурой расплавления керамического материала. Понятия « температура расплавления» и « температура плавления» отличаются друг от друга. Температура плавления – физическая характеристика перехода вещества из кристаллического состояния в жидкое, оно имеет строго определенное значение. Во многих керамических материалах кристаллическая фаза и аморфная присутствуют вместе, вследствие чего при нагреве переход к менее вязкому состоянию происходит постепенно. Температура расплавления – это достижение определенной вязкости материала.

Термостойкость – способность материала выдерживать колебания температуры в процессе эксплуатации, не разрушаясь.

1.2.4 Электрофизические и химические свойства

Электрофизические свойства технической керамики: диэлектрическая проницаемость ϵ , температурный коэффициент диэлектрической проницаемости TK_ϵ , удельное сопротивление ρ (Ом*м), диэлектрические потери $\text{tg } \delta$, электрическая прочность или пробивная напряженность $E_{\text{пр}}$.

Электрофизические свойства керамики зависят от структуры и состава кристаллических фаз. Кристаллические фазы — это кристаллы с ионными или ковалентными связями. Свободных электронов в керамических материалах почти нет.

С увеличением температуры электропроводность повышается, поскольку движение ионов в результате нагрева возрастает.

Электрическая прочность керамики – стойкость материала к воздействию электрического поля, которое выражается отношением пробивного напряжения к толщине диэлектрика.

Химические свойства керамики.

Распространенными химическими взаимодействиями керамики и других веществ являются:

1. Взаимодействие с кислотами и щелочами. Исследование коррозионной и стойкости материалов в различных растворах щелочей и кислот для оценки возможности изготовления из них деталей различной химической аппаратуры, подшипников, работающих в агрессивных средах и т.д.

2. Взаимодействие с расплавами. Безоксидную керамику используют также для изготовления деталей, которые будут находиться в контакте с расплавами металлов.

3. Взаимодействие с газами. Во многих случаях керамика должна быть стойкой к действию газообразных галогенов, сернистого газа, оксидов азота, различных углеводородов и др. Стойкость керамики зависит от ее химической природы, а также от ее структуры.

1.3. Методы получения порошков

Как правило, в природе не встречаются порошки, которые сразу пригодны для дальнейшего применения.

Физическими методами можно управлять составом, размером и формой частиц, но химические методы более универсальны и более производительны.



Рисунок 1– Основные используемые методы получения нанопорошков

В формировании структуры и свойств метод получения наноматериалов играет очень важную роль.

Область применения наноматериалов и набор свойств конечного продукта определяются их методом получения. Характеристики готового изделия (форма частиц, гранулометрический состав, величина удельной поверхности, содержание примесей) могут колебаться в весьма широких диапазонах, что зависит от способа получения.

1.3.1 Химические методы получения порошков

Химическое осаждение из паровой фазы

Технологии данной группы основаны на использовании химических реакций соединений металлов, которые находятся в газовой фазе. Эти соединения термически разлагаются с образованием твердого осадка (нанопорошка) и газообразных веществ. Или эти соединения вступают в химические реакции с образованием порошка и газообразных веществ [2]. Размер получаемых частиц можно регулировать температурой и скоростью осаждения.

Технологии высокоэнергетического синтеза

Данные технологии основаны на реакциях, которые протекают с высокой скоростью (далеко от равновесного состояния) при высокоэнергетическом воздействии. Нашли применение детонационный и плазмохимический методы получения нанопорошков [2].

Плазмохимический синтез осуществляется с использованием низкотемпературной плазмы дугового или тлеющего разрядов. Исходное сырье— металлы, галогениды или другие соединения. Из- за высокой температуры плазмы (до 10000 К) и высоких скоростей взаимодействия обеспечивается переход практически всех исходных элементов в газообразное состояние и их последующим взаимодействием и конденсацией продуктов в виде порошка с частицами правильной формы, имеющими размеры от 10 до 200 нм. Установки с дуговыми плазмотронами обеспечивают высокие температуры и мощность, а с помощью СВЧ-плазмотронов получают наиболее чистые и однородные нанопорошки. В

активных средах с содержанием углерода, азота, бора или кислорода с помощью плазмохимического синтеза получают порошки карбидов, нитридов, боридов и оксидов разных элементов, а также многокомпонентные соединения [2].

Технологии осаждения из растворов

Группа технологий осаждения из растворов – одна из наиболее изученных методов получения нанопорошков, объединенных общей чертой – проведение химических реакций в водных растворах солей.

Золь-гель процесс состоит из следующих стадий:

- приготовление растворов алкоксидов,
- их каталитическое взаимодействие с последующим гидролизом,
- конденсационная полимеризация,
- дальнейший гидролиз.

В качестве продукта процесса получают оксидный полимер (гель). Его подвергают старению, промывке, сушке и термообработке.

1.3.2 Физические методы получения порошков

Методы физического осаждения из паровой фазы

Данные методы получения порошков в настоящее время используются наиболее широко. Данная группа методов позволяет получать сложно легированные порошки, причем сплавы заданного состава можно получать как испарением предварительно легированного материала, так и одновременным испарением отдельных компонентов. Размер частиц получаемых порошков в зависимости от разновидности метода и технологических параметров может составлять от 5 до 100 нм [2].

Взрывное испарение (электровзрыв проводника). Данный метод основан на выделении очень большого количества энергии за малый промежуток времени. При этом материал испаряется, и затем за счет быстрого увеличения объема охлаждается с конденсацией паров в частицы малого размера. В ряде случаев часть материала может не успеть испариться, расплавляется и взрывным образом разделяется на жидкие

капли. Для подвода необходимого количества энергии используются мощный импульс электрического тока, дуговой разряд или импульс лазерного излучения [2]. Схема получения порошка из проволоки взрывным испарением приведена на рисунке 2.

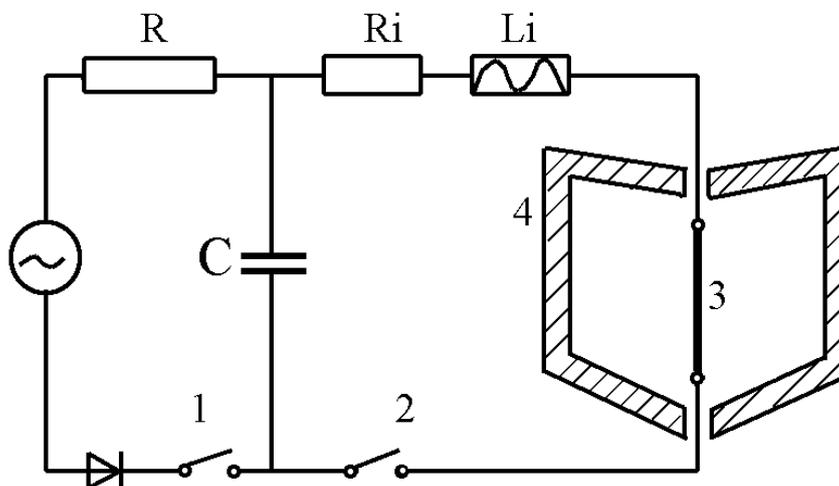


Рисунок 2 – Схема получения порошка из проволоки взрывным испарением: 1– зарядный контур, 2– разрядный контур, 3– взрывающаяся проволока, 4– камера с инертным газом

Механическое размельчение.

В порошковой металлургии широко распространено механическое измельчение компактных материалов. Под измельчением понимают уменьшение начального размера частиц материала путем разрушения их под действием внешних усилий, преодолевающих внутренние силы сцепления. Измельчение дроблением, разломом или истиранием – старейший метод перевода твердых веществ в порошкообразное состояние. Он может быть или самостоятельным способом получения порошков, или дополнительной операцией при других способах их изготовления. Наиболее целесообразно применять механическое измельчение при производстве порошков хрупких материалов.

При измельчении комбинируются те или иные усилия, например раздавливание и удар (при получении крупных частиц), истирание и удар (при тонком измельчении) [13]. При дроблении твердых тел затрачиваемая

энергия расходуется на упругие и пластические деформации, выделение теплоты и образование новых поверхностей, которые и являются конечной целью размола.

При механическом размельчении с использованием мельниц уменьшение размеров частиц материала происходит в результате интенсивного раздавливания между рабочими органами мельницы. В зависимости от вида материала и требуемых свойств порошка используются в основном планетарные, шаровые и вибрационные мельницы [2].

Простейшим аппаратом для измельчения является *шаровая вращающаяся мельница*, которая представляет собой стальной цилиндрический барабан, внутри которого находятся размольные тела, чаще всего стальные или твердосплавные тела [14].

1.4 Технологическая подготовка порошков

Подготовка порошков к формованию является важным процессом в общей технологии производства материалов. В практике порошковой металлургии металлические порошки чаще всего производят на специализированных заводах, поэтому невозможно учесть все характеристики, которые требуют потребители для заказываемых порошков. Почти всегда возникает необходимость в специальных операциях подготовки порошков для контроля определенных химических, физических и технологических характеристик, обеспечивающих выпуск продукции с нужными конечными свойствами. Даже при производстве порошков непосредственно самими потребителями необходимы некоторые дополнительные операции перед формованием порошков. К основным операциям при подготовке порошков к формованию относятся отжиг, рассев и смешивание.

Отжиг — это вид обработки порошков, который применяют с целью повышения их пластичности, и, следовательно, улучшения свойств

уплотняемости, прессуемости и формуемости. Во время отжига устраняются искажения кристаллической решетки металла в слоях около поверхности частиц, и происходит восстановление оксидов, которые остались при получении. Нагрев осуществляется в защитной среде (восстановительная, инертная или вакуум) при температуре порядка 0,4—0,6 от температуры плавления порошка.

Чаще всего отжигу подвергаются порошки, которые получены механическим измельчением твердых материалов, электролизом водных растворов или разложением карбониллов. Они содержат большое количество оксидов и растворенных газов

Необходимо помнить о возможности появления своеобразной сегрегации, т. е. расслоения компонентов с различными плотностями. Приготовление порошковой смеси обычно завершает цикл подготовки порошков к формованию [14].

1.5. Компактирование порошковых материалов

1.5.1. Методы формовки

Компактирование является технологическим процессом, в результате которого из порошка получают готовую деталь. Процесс обычно проводят в две стадии: формовка и спекание. В ряде методов обеспечивается совмещение этих стадий в одну. Для получения объемных наноматериалов из порошков в основном используется формовка при комнатной температуре с последующим спеканием [2].

В порошковой металлургии в настоящее время применяются множество технологий формовки. Для прессования нанопорошков наиболее широкое распространение получила технология одноосного прессования. Используются такие его методы как: статическое (прессование в пресс-формах или штамповка), динамическое (магнитно-импульсное и взрывное) и вибрационное (ультразвуковое) прессование [2].

При изостатическом прессовании порошка его помещают в эластичную или деформируемую оболочку. Получаемые формовки

отличаются практически однородной плотностью (правда иногда во внутренних объемах формовки она несколько меньше) и не имеют выраженной анизотропии свойств. Недостатком является достаточная сложность и дороговизна оборудования и сложность выдерживания точности размеров формовки [2].

Гидростатическое прессование проводят при использовании резиновых или других эластичных оболочек толщиной 0,1-2 мм. Оболочку с порошком помещают в рабочую камеру гидростата и нагнетают туда жидкость (масло, вода, глицерин и др.) под высоким давлением (от 100 до 1200 МПа). Получаемые формовки могут иметь сложную форму

Газостатическое прессование проводят при использовании металлических оболочек (капсул) из алюминия или пластичных сталей. Форма оболочек – простая, максимально приближенная к готовым изделиям. Часто газостатическому прессованию подвергают уже полученную ранее другими методами заготовку. Металлическую капсулу помещают в газостат, в рабочей камере которого создают давление до 200...300 МПа [2].

Квазигидростатическое прессование – упрощенный вариант гидростатического прессования. Порошок помещают в эластичную оболочку, прессующийся при одностороннем или двустороннем приложении давления в обычном прессовом оборудовании. Материал оболочки (резиновая масса, эпоксидные смолы и т.д.) должен под давлением вести себя как жидкость, иметь определенное значение упругости и не слипаться с порошком.

1.5.2. Методы спекания порошков

Процесс спекания бескислородной керамики можно регулировать путем подбора дисперсности, морфологии и дефектности порошков неметаллических тугоплавких соединений.

Как известно, для карбида бора характерна низкая концентрация и подвижность дефектов решетки, а также заторможенность диффузионных

процессов. С этими особенностями связаны большие трудности при получении поликристаллических спеченных материалов, поскольку в решетках ковалентных кристаллов подавлены процессами диффузионно-вязкого течения, ответственные за массоперенос и уплотнение при твердофазном спекании. Поэтому для получения бескислородной керамики, в отличие от традиционных способов получения гетерогенных керамических материалов на легкоспекающихся оксидных связках потребовалась разработка новых методов спекания, позволяющих управлять структурообразованием.

Методы физического активирования позволяют осуществить спекание за счет непосредственного контакта между частицами основной фазы. В ковалентных кристаллах неметаллических тугоплавких соединений коэффициенты диффузии намного ниже, чем в ионных или металлических кристаллах. Поэтому ускорения уплотнения порошковых заготовок можно достичь при использовании ультрадисперсных порошков, в процессе спекания которых сокращаются пути диффузии и увеличивается доля зернограничной диффузии.

Повышенная активность при спекании дисперсных порошков связана с избыточным содержанием дефектов, приводящих к увеличению эффективного коэффициента диффузии, деформации по механизму активированного скольжения дислокаций и зернограничного скольжения.

Одним из путей активирования спекания является повышение дисперсности и удельной поверхности порошка, которое должно способствовать росту усадки.

Другой путь активирования твердофазного спекания связан с использованием порошков, подвергнутых какому-либо высокоэнергетическому воздействию, приводящему к существенной деформации и, следовательно, повышению концентрации дефектов в решетке. Так, при взрывной обработке порошков достигается давление ~ 12 ГПа. При этом, как показывает рентгеноструктурный анализ, повышается

уровень микроискажений второго рода. Спекание порошков, обработанных взрывом, приводит к снятию напряжений и некоторому увеличению усадки.

Наиболее эффективный путь достижения высокой плотности бескислородной керамики – горячее прессование с использованием активирующих добавок. В этом процессе совмещаются явления физического и химического активирования.

Каждый из рассмотренных методов спекания бескислородной керамики способствует формированию специфического структурного состояния.

Используя различные методы спекания с учетом фазового состава, активности и реакционной способности неметаллических тугоплавких соединений, возможно получение однофазных и композиционных керамических материалов с управляемой структурой и свойствами.

1.6. Области применения функциональных керамики

Карбид бора отличается уникальным сочетанием свойств, которые делают его предпочтительным материалом для широкого спектра инженерных применений. Карбид бора используется в огнеупорных материалах из-за его высокой температуры плавления и термической стабильности, он используется в качестве абразивных порошков и покрытий из-за его чрезвычайной стойкости к истиранию, отличается хорошими баллистическими характеристиками благодаря высокой твердости и низкой плотности, используется как поглотитель нейтронного излучения. Кроме того, карбид бора является высокотемпературным полупроводником, который потенциально может быть использован в новых электронных устройствах.

Химическое применение карбида бора определяется его использованием в качестве компонента смесей для диффузионного борирования сталей, результатом которого является повышение твердости

и износостойкости поверхности стали со значительным увеличением срока службы готовых изделий.

Карбид бора термодинамически устойчивое соединение и обладает износостойкостью, что делает возможным применять его в химическом машиностроении в качестве деталей различных агрегатов, которые взаимодействуют с агрессивными и одновременно абразивными средами.

Карбид бора используется в качестве полупроводникового материала, так как он обладает некоторыми подходящими для этих целей термоэлектрическими свойствами. Но используется в небольшом количестве, так как получение материала с заданной чистотой, а значит и воспроизводимыми свойствами, является технологически сложной задачей.

Небольшая плотность позволяет использовать карбид бора как защитный элемент - специальные бронепластины, которые поглощают и рассеивают энергию средств поражения (холодного, стрелкового оружия и осколков) для защиты вертолетов и личного состава вооруженных сил.

1.7 Методы улучшения свойств керамических материалов

1.7.1 Электронно-лучевая обработка материалов

Обработка поверхности различных металлов и сплавов концентрированными потоками энергий все шире применяется в инженерии поверхности. Целью такой обработки является модифицирование структуры и улучшение эксплуатационных свойств рабочего поверхностного слоя деталей машин и конструкций. В результате взаимодействия импульсного электронного пучка с поверхностью металлического материала может происходить оплавление и последующее выглаживание поверхности, а также структурная модификация поверхностного слоя на глубину от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров, которая может приводить к возрастанию микротвёрдости (за счёт измельчения структуры зёрен), коррозионной стойкости, уменьшению коэффициента трения [1].

Наряду с уменьшением шероховатости поверхности, изменением химического состава приповерхностного слоя, наблюдается текстурирование поверхности в виде направленной перекристаллизации расплавленного слоя. Таким образом, появляется возможность управления оптическими, механическими и электрическими свойствами поверхности за счет ориентированных определенным образом структурных образований, а также существенным образом изменить каталитическую и адсорбционную способность поверхности.

1.7.2 Уникальность использования в современных технологиях СИПНЭ для модификации свойств материалов

Развитие современного общества зависит от трех взаимосвязанных факторов: экономики, энергоресурсов и экологии, определяющих развитие следующей важной триады: наука- технология- производство, т.е., по сути, наличие мобильной и высокоэффективной научно- технической базой, позволяющей разрабатывать и оперативно внедрять в производственный процесс новые ресурсосберегающие и экологически чистые технологии.

Материалы играют большую роль в направлениях перечня критических технологий, например, в энергетике, транспорте. Достойное внимание разработке новых материалов уделено в российском перечне технологий двойного назначения. Материалы определяют возможности реализации научно- технических идей.

- усложнением создаваемой техники, например, для эксплуатации при высоких температурах, механических нагрузках, в агрессивных средах (газах, жидкостях, жидких металлах), в различных физических полях (электрических, магнитных), при радиационном воздействии и др.;
- стремлением получить более высокие параметры и КПД техники;
- повышением надежности и безопасности техники;
- снижением материалоемкости изделий;
- улучшением дизайна и потребительских свойств продукции;
- расширением области применения техники и устройств.

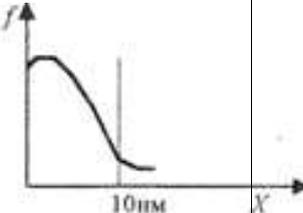
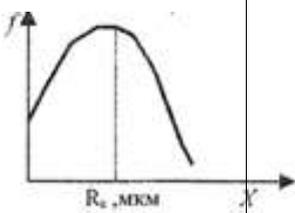
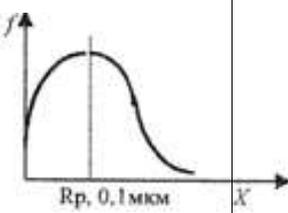
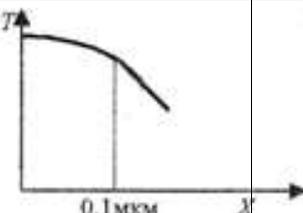
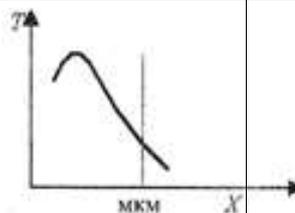
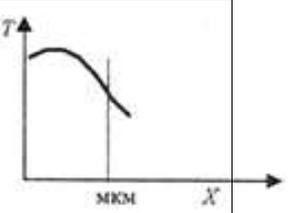


Рисунок 3 - Схема возможных путей создания нового материала

Как видно из рис. 3 технология получения материалов заканчивается модифицированием поверхности слоев, т.е. изменением структурно-фазового состояния приповерхностного слоя без изменений в объеме. Рассмотрим далее основные проблемы и возможности модифицирования в результате воздействия на материалы и изделия тепловых потоков с целью изменения структуры и состава или получения нового материала.

В последние годы интенсивно разрабатываются радиационно-пучковые технологии (РПТ) как получения, так и модифицирования материалов. Научной основой РПТ являлись результаты исследования взаимодействия электронов, ионов, атомов и их кластеров, плазмы, лазерного и гамма-излучения с твердым телом. При увеличении количества энергии, переносимой частицами или излучением, характер их воздействия на поверхность твердого тела утрачивает чисто радиационный аспект и становится термическим. В этой связи мощные электронные и ионные пучки, лазерное излучение можно рассматривать как концентрированные потоки энергии. Каждый из видов радиационного воздействия может быть использован и для модификации, и для получения новых материалов.

Таблица 1 Особенности воздействия концентрированных потоков энергии

Параметр	Виды воздействия		
	Лазерное	Электронное	Ионное
Передача энергии в твердом теле	Электронам	Электронам и ядрам	Атомам, электронам, ядрам
Проникновение излучения и глубина мишени			
Распределение температуры			
Требования к вакууму в рабочей камере	нет	да	да

При коротком импульсном (десятки наносекунд) воздействии РПТ возможны следующие процессы:

➤ возбуждение и эволюция интенсивных механических возмущений в мишени;

- гидродинамическое движение расплава и образующегося пара;
- плазмообразование;
- интенсивное испарение вещества;
- дефектообразование (например, кратерообразование и формирование шероховатости поверхности).

Кратерообразование на поверхности может возникнуть при филаментации (расслоении) пучка ионов или электронов, вследствие экранирования поверхности паром легколетучих компонентов (адсорбированных элементов), из-за выхода на поверхность пузырьков растворенных газов, избирательного плавления (испарения) фаз и перехода их в плазму, бомбардировки расплавленного участка поверхности "хвостом" импульса и др.

Ускорители электронных пучков можно разделить на сильноточные (от 0,4 до 150 А/см²), низкоэнергетические (до 100 кэВ) и высокоэнергетические (более 200кэВ).

Концентрированные потоки энергии находят применения как для получения новых материалов, так и для модифицирования.

Модифицирование материалов (поверхностного слоя):

- сверхбыстрая закалка сплавов, в том числе из жидкого состояния (термоупрочнение);
- изменение структуры (аморфизация, измельчение зерна, квазипериодические или многозонные структуры) материалов и предварительно нанесенных покрытий;
- изменение элементного состава и фазового состояния путем имплантации элементов из плазмы и жидкофазного перемешивания (легирования) атомов мишени и пленки, предварительно нанесенной на мишень;
- формирование заданного рельефа поверхности путем ее оплавления (заглаживание покрытий, увеличение адгезионной способности подложки);

- объемное ударное упрочнение путем формирования волн напряжений в мишени;

- наплавка покрытий или слоев;

- удаление ранее нанесенных покрытий или слоев.

Метод электронно-лучевой обработки обладает следующими технологическими преимуществами перед традиционными методами упрочнения, в том числе поверхностного:

- постоянной глубиной обработки, в частности закалки;

- минимальным короблением изделия;

- высоким к. п. д. при генерировании луча и поглощения его энергии, т.е. низкими затратами энергии;

- независимостью поглощения энергии от оптических свойств и шероховатости поверхности, отсутствием необходимости нанесения покрытия на поверхность для повышения ее поглощающей способности;

- высокой стабильностью и воспроизводимостью параметров излучения, простотой контроля характеристик;

- возможностью сканирования луча с высокой частотой и большой амплитудой (>50 мм), высокой надежностью (по сравнению с механической системой развертки лазерного луча) электромагнитной системы сканирования;

- экологической чистотой.

1.7.3 Классификация электронных пучков

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показал, что при обработке электронными пучками твердых тел с целью их модификации применяются:

- низкоэнергетические (до десятков кэВ) сильноточные электронные пучки с плотностью тока до нескольких кА/см²;

- высокоэнергетические (несколько МэВ) импульсные сильноточные электронные пучки с длительностью импульса 10⁻⁸-10⁻⁶с и плотностью потока энергии до сотен Дж/см² на импульс;

Перспективными являются низкоэнергетические сильноточные импульсные электронные пучки, позволяющие регулировать в широком интервале энергию электронов, глубину их проникновения в материал, характеристики и динамику полей температур и напряжений. Объемный характер выделения энергии и возможность изменения длительности импульса делают импульсный электронный пучок универсальным источником. Различают высокоэнергетические и низкоэнергетические сильноточные электронные пучки (ВСЭП и НСЭП соответственно). НСЭП имеют существенные преимущества перед ВСЭП, так как позволяют обеспечить высокую плотность энергии пучка электронов (до 35 Дж/см^2) при низком ускоряющем напряжении и энергии электронов, не превышающей 20-30 кэВ, что существенно упрощает радиационную защиту. Поэтому исследования модификации и свойств материалов, обработанных НСЭП, являются актуальными.

Электронный пучок обладает большой удельной мощностью (отношением мощности пучка к площади его сечения в фокусе), благодаря чему нагревание происходит очень быстро и в строго определенном месте. Воздействие высокоэнергетических электронных пучков приводит к локальному высокоскоростному нагреву образца и его расплавлению. Этот вид пучков (остросфокусированный электронный пучок) применяется при электронно-лучевой резке металлов и сплавов, и имеет преимущества по сравнению с традиционными способами резки (механической, абразивной, ацетилено-кислородной, электроэрозионной, дуговой и др.) по скорости резки, ширине реза, шероховатости поверхности реза, глубине области термического влияния.

Такие воздействия ведут, в частности, к перераспределению элементов сплавов на значительной глубине и к аномальному массопереносу в зоне кристаллизации.

С помощью расфокусированных низкоэнергетичных сильноточных электронных пучков (НСЭП) проводят модифицирующую обработку поверхности.

При обработке поверхности электронными и ионными пучками имеют место морфологические изменения и изменения ее элементного состава [5].

1.7.4 Направления модифицирования материалов

Конечной целью модификации является изменение физических, физико-механических и физико-химических свойств материалов (изделий), улучшение эксплуатационных свойств изделий, включая износостойкость, жаростойкость, коррозионно-усталостную прочность, трещиностойкость, радиационную стойкость, снижение потерь на трение и др.

Хорошо известны следующие направления модифицирования [3]:

- нанесение покрытий и пленок;
- изменении топографии (рельефа) поверхности;
- изменение структуры приповерхностного слоя на различные глубины;
- изменение элементного состава и фазового состояния слоя;
- изменение дефектов структуры вблизи поверхности.

Изменение структуры и дефектов структуры приповерхностного слоя на различные глубины. Проводится с целью существенного изменения свойств изделий. Наиболее эффективный способ изменения структуры сложнолегированных материалов — это термообработка приповерхностного слоя, включая закалку и последующий (при необходимости) отпуск. Для закалки необходимо быстро нагреть и охладить поверхностный слой материала. Наиболее распространенные технологии изменения структуры приповерхностного слоя материалов:

- поверхностная пластическая деформация;
- поверхностная техническая обработка, включая индукционный нагрев, сверхбыстрый нагрев концентрированными потоками энергии и

быстрое охлаждение, например, за счет теплопроводности металлов или дополнительным теплоотводом;

- ударно-волновое воздействие (например, взрывом).

Изменение элементного и фазового состава приповерхностного слоя.

Это один из наиболее эффективных способов модифицирования фазового состояния и, следовательно, свойств материала.

Для этого применяют широкий ряд традиционных и перспективных технологий:

- термохимическая обработка;
- электролитическое насыщение поверхностного слоя, включая хромирование, алитирование, титанирование, оксидирование;
- механическое легирование;
- жидкофазное перемешивание атомов, предварительно нанесенного покрытия, при воздействии концентрированным потоком энергии.

К числу наиболее заметных структурно-фазовых изменений следует отнести:

- увеличение параметра кристаллической решетки;
- разворот плоскостей;
- диспергирование микроструктуры;
- образование аморфной и ультрадисперсной фаз;
- накопление радиационных дефектов;
- загрязнение материала примесями;
- растворение и образование радиационно-стимулированных и радиационно-индуцированных фаз;
- расслоение твердых растворов, упорядочение;
- массоперенос в приповерхностном слое и в объеме;
- создание пересыщенных твердых растворов;
- изменение магнитного состояния сплавов;
- образование слоистых структур;

ГЛАВА 2. ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение керамики на основе В₄С ограничено низкой трещиностойкостью данного материала. Исследования показали, что применение нанопорошков и адекватных методов их формования позволят в разы увеличить трещиностойкость данной керамики благодаря микроструктуре с наноразмерным масштабом (создать в поверхностном слое субмикро- и нанокристаллическое состояние). Соблюдение этого условия позволит локализовать пластическую деформацию на наномасштабном уровне, тем самым обеспечивая равномерное распределение упругих напряжений и повышая энергию зарождения критических концентраторов напряжения.

В связи с этим, целью данной работы является установление закономерностей эволюции фазового и элементного состава, состояния дефектной субструктуры и механических свойств поверхностного слоя систем:

1. Плёнка Ti / (В₄С – керамика) подложка;
2. Плёнка (Ti+Al) / (В₄С – керамика) подложка;

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Изготовить методом SPS керамические образцы из порошка карбида бора.
2. Подготовить поверхность полученных образцов – провести шлифовку и полировку поверхности образцов до «зеркального блеска»
3. На установке «КВИНТА» на поверхность подготовленных керамических образцов нанести пленку: а) Ti; б) двухслойную пленку Al / Ti (сначала наносится пленка алюминия, потом на нее пленка титана). Толщина пленок алюминия и титана 100 нм.
4. Подготовленные образцы с нанесенными пленками облучить интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛО».

Режимы облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; длительность импульса пучка электронов 200 мкс; количество импульсов 30; частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$; плотность энергии пучка электронов для системы «пленка (Ti) / (B₄C) подложка» - 20 Дж/см^2 , для системы «пленка (Al / Ti) / (B₄C) подложка» - 10 Дж/см^2 . Перед одлучение образцы нагревали до температуры $\approx 700 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Провести исследование полученных образцов (структура, фазовый и элементный состав поверхностного слоя керамики, морфология, дефектная субструктура, физико-механические характеристики) методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, рентгенофазового анализа.

Для изготовления керамики использовали порошок B₄C со средним размером частиц 60 мкм, измельченный на пневмо-циркуляционном аппарате до субмикронной размерности (средний размер частиц порошка 0,8 мкм) при сохранении чистоты полученного сырья. В порошок-основу вводилась добавка из 10 мас.% нанопорошка карбида бора.

Образцы керамики изготавливались в форме таблеток диаметром 14 мм и толщиной 3 мм методом SPS-спекания (установка SPS 155 (SPSSYNEX)) (Рис. 4).



Рисунок 4 – Установка для спекания в плазме искрового разряда SPS-S515

Плазменно-искровое спекание – одна из новейших технологий получения высококачественных материалов. Метод SPS сочетает в себе простоту прессования порошков в закрытых пресс-формах с достоинствами метода горячего прессования. Принцип SPS-метода заключается в совместном воздействии на порошковый материал импульсным (3,3...1000 мс) мощным электрическим разрядом между двумя электродами (энергия в разряде 1...100 кДж) и механическим давлением. Материал в зоне воздействия разогревается до высоких температур, вплоть до плазменного состояния, происходит высокоскоростное спекание частиц в местах контактов, исходный масштаб которых при этом сохраняется в зернах.

Основные технические параметры:

- Максимальное усилие прессования – 50 кН;
- Размер рабочей камеры: диаметр – 70 мм, высота – 200 мм (в открытом состоянии);
- Потребляемая энергия: трехфазный переменный ток напряжением 200 В, частотой 50 Гц;
- Ток в электродах рабочей камеры: до 2000 А;
- Напряжение на электродах рабочей камеры: до 20 В;
- Температура в рабочей камере: до 2400 °С.

Осаждение металлической пленки толщиной 0,1 мкм на образцы керамики осуществляли на установке «КВИНТА» вакуумно-дуговым методом при испарении катода соответствующего металла (рис. 5).



Рисунок 5 – Внешний вид автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установки «КВИНТА»

Автоматизированная вакуумная ионно-плазменная установка «КВИНТА» предназначена для дугового азотирования и напылении наноструктурных упрочняющих и защитных покрытий на образцы и детали машин большой протяженности. Установка автоматизирована и позволяет проводить технологические процессы по технологической карте в автоматическом режиме, что обеспечивает высокую повторяемость результатов процессов.

В составе программы управления присутствует технологическая карта для осуществления сотен различных шагов в едином технологическом цикле. Каждый из шагов характеризуется своим набором параметров, которые можно установить с помощью меню управления шагами технологического процесса. Технологическая карта позволяет производить технологические процессы

полностью в автоматическом режиме, вести учет проведенных экспериментов и мгновенно выполнять повторный запуск нужного техпроцесса, тем самым обеспечивая повторяемость экспериментов, исключая ошибки оператора.

Установка «КВИНТА» позволяет проводить равномерную ионно-плазменную обработку изделий, обладает высокой энергетической эффективностью. Области применения: научно-исследовательские, опытно-конструкторские, учебные учреждения, где разрабатываются и изучаются новые технологии; авиакосмическая промышленность, медицина, все отрасли машиностроения и т.д.

Облучение системы «металлическая пленка / (В₄С) подложка» осуществляли на установке «СОЛО». Общий вид установки «СОЛО» приведен на рис. 6.



Рисунок 6 – Общий вид установки «СОЛО» для импульсной модификации поверхности металлов и сплавов, металлокерамических и керамических материалов электронным пучком

Основные технические характеристики установки «СОЛО»:

1. Размеры установки – 1350 x 2150 x 2000 мм;
2. Размеры рабочей вакуумной камеры – 600 x 500 x 400 мм;
3. Амплитуда тока электронного пучка – (20-300) А;
4. Энергия электронов – (5-25) кэВ;
5. Длительность импульса тока электронного пучка – (20-200) мкс;
6. Частота следования импульсов – (0,3-15) с⁻¹;
7. Рабочее давление – (0,01 – 0,05) Па;
8. Рабочий газ – Ar, N₂;
9. Диаметр отпечатка (зона поверхностного оплавления) – (2-5) см;
10. Размер области сканирования манипулятором – 200 x 200 мм.

Импульсная электронно-пучковая установка СОЛО с электронным источником на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы позволяет генерировать электронный пучок с током до 300 А, энергией электронов до 25 кэВ, длительностью импульса (20-200) мкс, плотностью энергии в импульсе до 80 Дж/см², частотой следования импульсов до 15 с⁻¹. Все параметры данной установки можно регулировать плавно и независимо друг от друга. Использование ускоряющего напряжения до 25 кВ не требует наличия дополнительной радиационной защиты.

В состав установки входят: импульсный электронный источник на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией плазменной границы, вакуумная камера прямоугольной формы со смотровым окном и двухкоординатным столом-манипулятором, блоки питания электронного источника, система управления установкой на основе персонального компьютера и работающих под его управлением блоков на основе микроконтроллеров, система газового питания, система диагностики параметров электронного источника и электронного пучка.

Пористость образца керамики определялась на приборе для измерения удельной поверхности дисперсных и пористых материалов СОРБИ-М (рис. 7).

Принцип действия прибора основан на измерении объема газа-адсорбата, десорбированного с поверхности исследуемого образца. Полученные данные используются для расчета удельной поверхности по четырёхточечному методу Брунауэра-Эммета-Тейлора (далее — метода БЭТ).

Перед началом измерений проба исследуемого образца известной массы, проходит предварительную стадию подготовку (термотренировку). В ходе измерений через ампулу пропускают стационарный поток газовой смеси, состоящей из газа-носителя и газа-адсорбата. Процесс измерений состоит из нескольких циклов, каждый из которых проводится при определённых значениях парциального давления газа-адсорбата и включает в себя стадии установки состава газа, адсорбции и десорбции. Во время адсорбции при температуре кипения жидкого азота происходит захват молекул газа-адсорбата на поверхности исследуемого образца и устанавливается динамическое равновесие между слоем адсорбированного вещества и окружающим газом. В процессе десорбции температуру повышают и адсорбированное вещество высвобождается с поверхности исследуемого образца. При этом происходит изменение состава протекающей газовой смеси, что регистрируется датчиком теплопроводности в виде так называемого десорбционного пика. Площадь этого пика пропорциональна объёму десорбированного газа. В свою очередь объём десорбированного газа пропорционален полной площади поверхности исследуемой навески. Удельная поверхность определяется как полная поверхность, деленная на массу навески.



Рисунок 7 – Прибор для измерения удельной поверхности дисперсных и пористых материалов СОРБИ-М

Основные технические параметры:

- Диапазон измерения полной поверхности образцов – $4 \text{ м}^2 - 12 \text{ м}^2$;
- Предел допускаемой относительной погрешности измерения удельной поверхности – $\pm 6\%$
- Диапазон поддержания температуры термотренировки образца – $50 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$
- Предел абсолютной погрешности поддержания температуры термотренировки образца – $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Перед исследованием поверхность образцов шлифовали и полировали на шлифовально полировальном станке «Полилаб» (рис. 5). Ручной однодисковый шлифовально-полировальный станок Полилаб П12М — прибор, предназначенный для проведения металлографической пробоподготовки. Скорость вращения приводного круга настраивается в пределах $50 - 1000 \text{ об/мин}$.



Рисунок 8 – Шлифовально полировальный станок «Полилаб»

Рельеф поверхности изучался полуконтактным методом в сканирующей зондовой нанолaborатории Integra Aura.



Рисунок 8 – Сканирующая зондовая нанолaborатория Integra Aura.

В сканирующей зондовой микроскопии используется взаимодействие между твердотельным нанозондом, приближенным к объекту исследования на некоторое малое расстояние - характерную длину затухания взаимодействия «зонд-объект». Для получения изображения объекта используются прецизионные системы механического сканирования нанозондом над образцом (или образцом над зондом), причем система автоматического

регулирования стабилизирует параметры наноконтакта между зондом и объектом в процессе сканирования. Пространственное разрешение сканирующих зондовых микроскопов определяется характерным размером наноконтакта между зондом и образцом.

Основные технические параметры:

- Размер образца – до 40 мм в диаметре, до 15 мм в высоту;
- Разрешение позиционирования – разрешение - 5 мкм, минимальное перемещение – 2 мкм;
- Поле сканирования – не более 1x1x1 мкм;

Фазовый состав материала изучали методами рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (рис. 9).



Рисунок 9 – Дифрактометр XRD-7000s

Морфологию и дефектную субструктуру керамики исследовали методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (прибор JEM 2100F, JEOL) (рисунок 8). Технические характеристики прибора приведены в таблице 4.



Рисунок 10 – Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100F.

Технические характеристики микроскопа JEM 2100F

Характеристика	Значение
Разрешение по точкам	0,19 нм
Разрешение по линиям	0,1 нм
Ускоряющее напряжение	От 80 до 200 кВ
Диапазон увеличений	От x50 до x1 500 000

Фольги (объект исследования материала методами просвечивающей электронной микроскопии) изготавливали методами ионного утонения тонких (100 мкм) пластинок на приборе Ion Slicer EM 09100IS (рис. 9).



Рисунок 10 – прибор Ion Slicer EM 09100IS.

Система Ion Slicer EM-09100IS предназначена для подготовки образцов к исследованиям в растровых и просвечивающих электронных микроскопах путем ионного утонения, без применения растворителя или химических реактивов.

Отличительной особенностью данного прибора является то, что он не требует приготовления диска, утоненного в центре. Предварительная пробоподготовка для Ion Slicer заключается лишь в изготовлении параллелепипеда размерами 2.8мм x 0.5мм x 0.1мм, который затем закрывается специальной защитной лентой и утоняется пучком ионов аргона. Энергия пучка не превышает 8 кВ, а угол падения можно варьировать от 0 до 6 по отношению к наибольшей грани образца. Это позволяет минимизировать радиационные повреждения и, тем самым, сохранить исходные структуру и фазовый состав образца, а после этого изучить их методами электронной микроскопии.

Процедура пробоподготовки включает в себя следующие шаги:

1) Отрезка образца. От исследуемого объекта должен быть отрезан образец длиной 2.8 мм и шириной 0.8 мм.

2) Утонение образца. На следующем этапе требуется утонение образца до толщины 0.1 мм. Для полировки можно использовать маленькое двухстороннее лезвие. Показателем того, что образец утоньшился до 0.1 мм и полировку можно останавливать, будет исчезновение окраски на лезвии.

3) Ионное утонение.

После того, как образец приведен к размерам 2.8 мм длины, 0.8 ширины и 0.1 толщины, он помещается в держатель и запускается процесс травления. Длительность травления, в среднем, составляет около двух часов и зависит от условий, в которых проводится обработка.

Процесс утонения контролируется по изображению, получаемому с CCD-камеры, и управляется при помощи персонального компьютера.

Ion Slicer крайне эффективен для обработки мягких материалов, неоднородных твердых растворов, минералов, композитов, керамик, пористых структур и т.п.

Структуру и элементный состав керамики и системы «пленка/подложка» изучали методами сканирующей электронной микроскопии.

Морфологию и элементный состав поверхностного слоя керамики исследовали методами сканирующей электронной микроскопии. В работе использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-7500FA (JEOL, Япония) с энергодисперсионным микроанализатором EDXS (рис. 10).

Сканирующая электронная микроскопия применяется для исследования морфологии поверхности различных материалов неорганического происхождения при высоком разрешении (до 1 нм), получения изображения во вторичных и отражённых электронах; полуколичественного и количественного элементного анализа поверхности, картирования элементного состава; микроструктурного анализа: текстурного анализа, построения карт ориентировки кристаллитов, дискриминации фаз и построения карт распределения кристаллических фаз, определения размера и формы зёрен и частиц, определения типа границ, построения полюсных фигур.



Рисунок 11 – Сканирующий электронный микроскоп JSM-7500FA

Методы просвечивающей дифракционной электронной микроскопии и сканирующей электронной микроскопии использовали для исследования морфологии частиц порошка. Это позволило оценить размер, форму, степень агломерированности наночастиц и изучить элементный и фазовый состав, строение нанокристаллов керамики и модифицированного слоя.

Физико-механические характеристики выявляли методом динамической микротвердомерии алмазной пирамидкой Берковича в режимах «нагрузка- разгрузка» и «нагрузка-удержание нагрузки» при нагрузке на индентор в 1 Н (нанотвердомер DУН-211S, Shimadzu, рисунок 11).

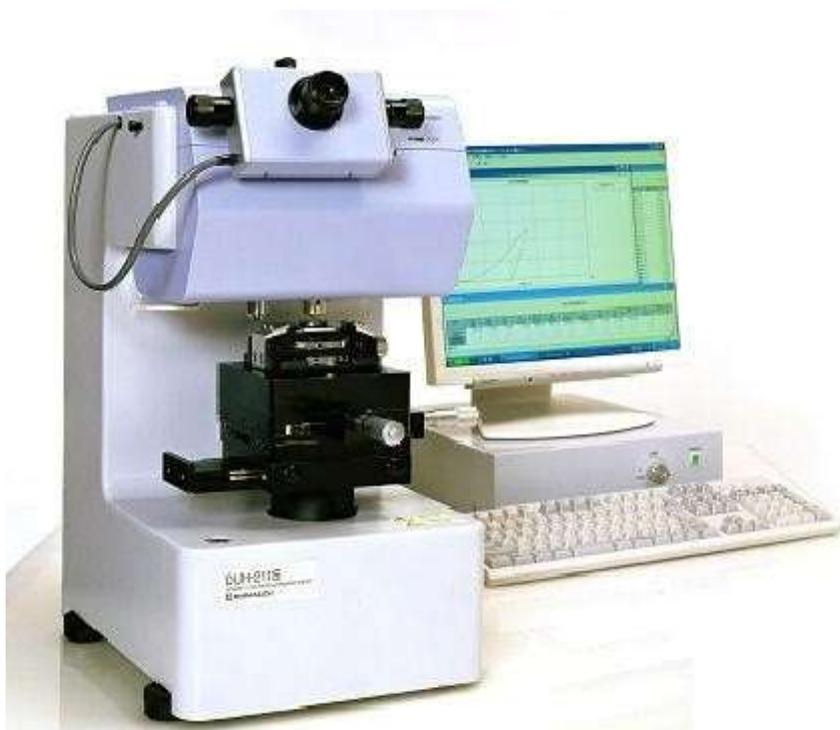


Рисунок 11 – Ультрамикротвердомер Shimadzu DУН-211S

Возможности DУН-211S: диапазон нагрузки 0,1-1961 мН; режимы: нагрузка-удержание; нагрузка-разгрузка; циклическое испытание; испытание с установкой глубины; нагрузка-разгрузка с установкой глубины; с пошаговой нагрузкой.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Характеристика используемого порошка

Для изготовления образцов был использован и взят за основу порошок V_4C со средним размером частиц 60 мкм (производство НИИ стали, рис. 12), измельченный на пневмо-циркуляционном аппарате до субмикронной размерности (средний размер частиц порошка 0,8 мкм) при сохранении чистоты полученного сырья. В порошок-основу вводилась добавка из 10 мас. % нанопорошка карбида бора (рис. 12).

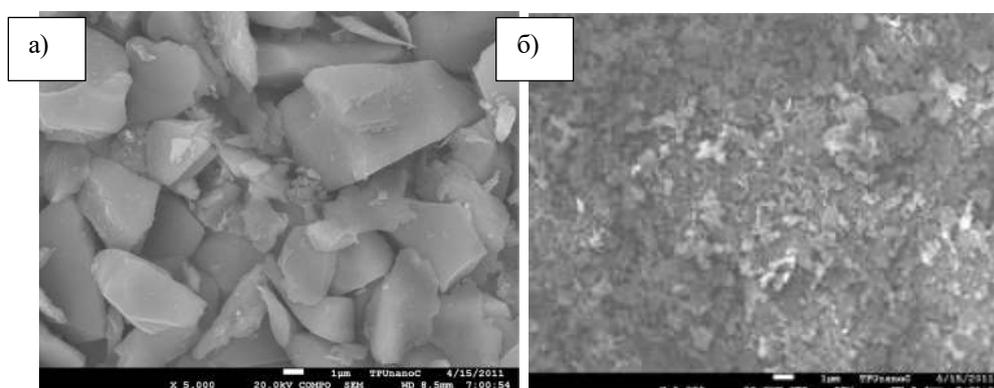


Рисунок 12. СЭМ – изображения частиц: а) - исходного порошка; б) - порошковой смеси из субмикронного порошка с добавкой 10 мас% нанопорошка

Исследования, выполненные методами просвечивающей электронной микроскопии, показали, что частицы нанопорошка являются кристаллическими образованиями; имеют как сферическую форму с размерами (10 – 60) нм, так и пластинчатую, толщиной 1 нм и поперечным сечением до 100 нм (рис. 12). В своём большинстве частицы имеют кристаллическую структуру, о чём свидетельствуют как кольцевые микроэлектрограммы с дискретным расположением точечных рефлексов (рис 13) так и упорядоченное расположение атомов в кристаллической решётке (рис 13)

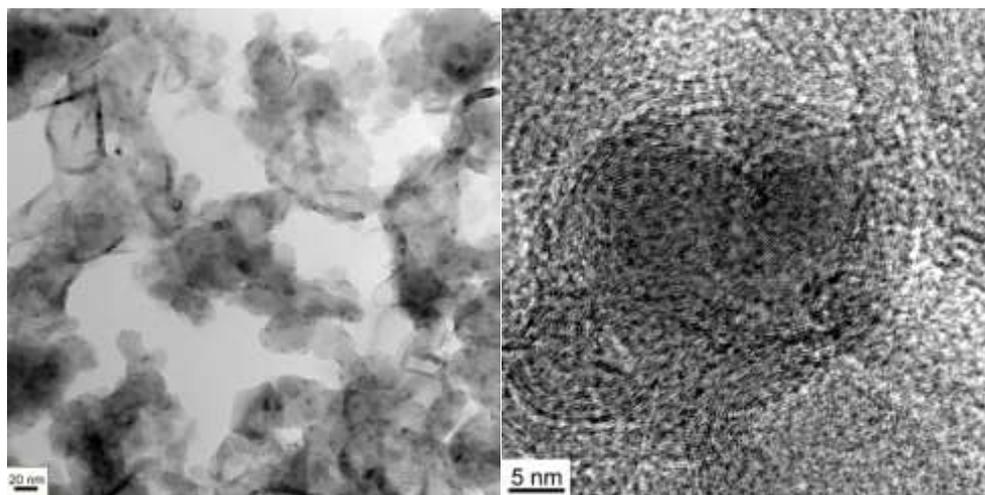


Рисунок 13. Электронно-микроскопическое изображение частиц нанопорошка: *a* - сферическая и пластинчатая форма частиц порошка, *б* - кристаллическая структура нанопорошка.

Анализ представленных на рисунок 13 характерных изображений структуры нанопорошка B_4C перед спеканием, полученных методами электронной дифракционной микроскопии, демонстрирует наличие двух фракций – порошка с размерами частиц сотни нанометром и нанопорошка. Микроэлектроннограмма, полученная с порошка, содержит точечные рефлексы, что указывает на кристаллическое строение исследуемого порошка (рис. 14, б). Анализ микроэлектроннограммы дает основание заключить, что порошок обеих фракций является карбидом бора состава B_4C .

Анализ представленных на рис. 14 характерных изображений структуры нанопорошка B_4C перед спеканием, полученных методами электронной дифракционной микроскопии, демонстрирует наличие двух фракций – порошка с размерами частиц сотни нанометром и нанопорошка. Микроэлектроннограмма, полученная с порошка, содержит точечные рефлексы, что указывает на кристаллическое строение исследуемого порошка (рис. 14, б). Анализ микроэлектроннограммы дает основание заключить, что порошок обеих фракций является карбидом бора состава B_4C . Удельная поверхность

порошковой смеси определена методом БЭТ (Брунаурэра – Эммета – Теллера) на установке «СОРБИ – М». Результаты приведены в таблице 2.

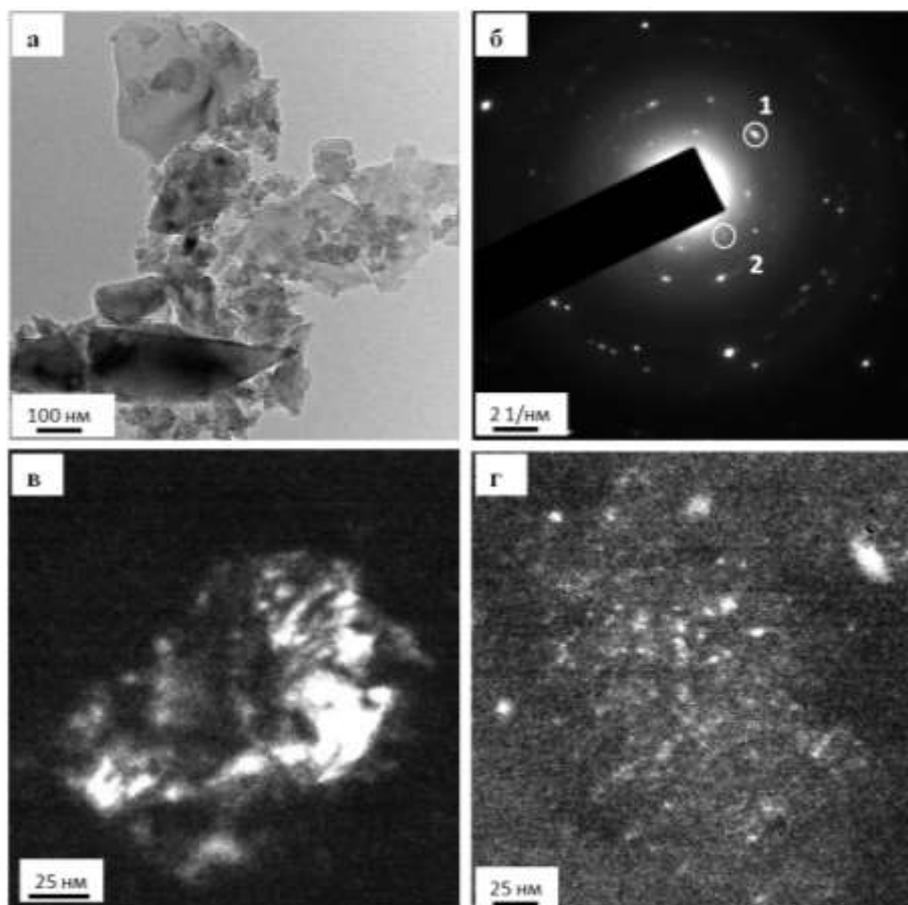


Рисунок 14. Электронно-микроскопическое изображение структуры порошка перед спеканием; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, олученные в рефлексах $[021]V_4C$; $[003]V_4C$, соответственно (рефлексы, в которых получены темные поля, указаны на (б): 1 – для (в), 2 – для (г)).

Таблица 2. Удельная поверхность порошка B_4C

Время измерения	Код образца	масса, г	Измеренная Ауд. м ² /г	Коэффициент корреляции
00:52	B4C 10%-01	0.3196	16.75 ±0.102	0.99994
01:03	B4C 10%-02	0.4999	15.92 ±0.178	0.99981
01:07	B4C 10%-03	0.3215	14.83 ± 0.145	0.99986

3.2 Характеристика образцов керамики из карбида бора, полученных методом SPS

SPS - инновационная технология спекания для получения наноструктурных материалов, композитных материалов и градиентных материалов. В основе метода лежит модифицированный метод горячего прессования: электрический ток пропускается непосредственно через пресс-форму и прессуемую заготовку. С помощью импульсного электротока достигается очень быстрый нагрев и очень малый по продолжительности рабочий цикл, что позволит подавить рост зерна и получить равновесное состояние. Это открывает возможности создания совершенно новых материалов с ранее недоступными свойствами, а также получение материалов с субмикронным или наномасштабным зерном и материалов с уникальными или необычными композициями.

Образцы керамики для наших исследований изготавливались в форме таблеток диаметром 14 мм и толщиной 3 мм методом SPS-спекания (установка SPS 155 (SPSSYNEX)) Использовался следующий режим спекания: температура спекания $T_{\text{спекания}} = 1950^{\circ}\text{C}$; давление подпрессовки $P = 90 \text{ МПа}$; длительность спекания $t_{\text{выдержки}} = 10 \text{ мин}$).

На рисунке 15 представлен график спекания методом СПС образца из карбида бора при выбранном технологическом режиме.

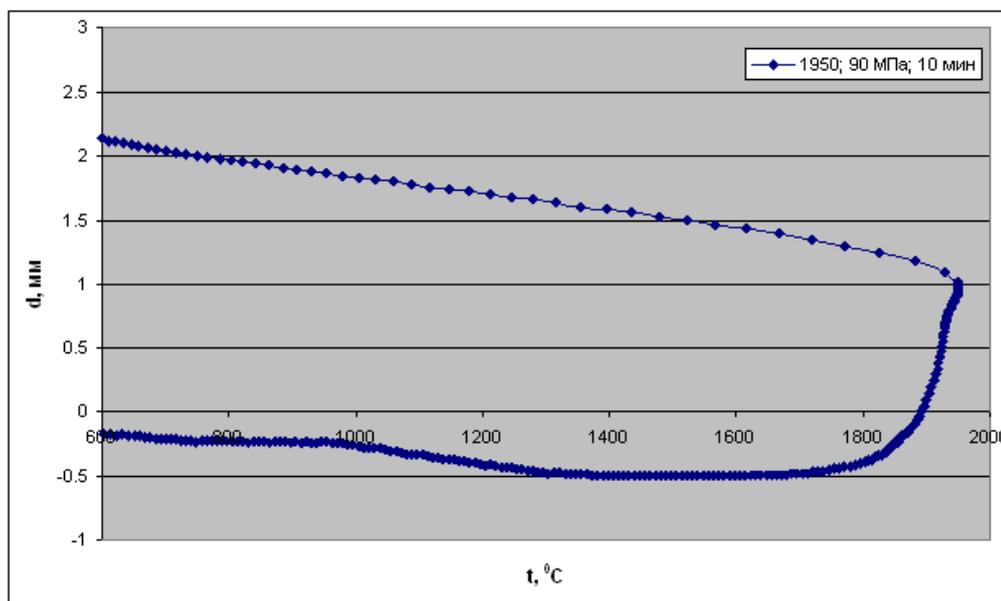


Рисунок 15. Зависимость высоты компакта В4С от температуры СПС

Для измерения микротвердости, трещиностойкости и микроструктурных исследований, поверхность спечённых образцов шлифовалась и полировалась алмазными пастами до шероховатости ~ 0.025 мкм. Поверхность полученных образцов была свободна от трещин, что указывает на достаточную однородность полученных образцов керамики. На рис.16 представлено изображение поверхности керамики после шлифовки и полировки, полученное на приборе «Интегра-Аура».

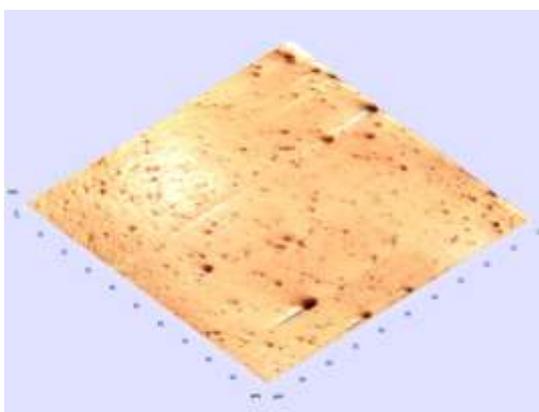


Рисунок 16. Изображение поверхности керамики после шлифовки и полировки, полученное на установке «Интегра-Аура»

Результаты приведённых физико-механических исследований (микротвёрдости и трещиностойкости) приведены в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические свойства образцов из карбида бора

Содержание нанодобавки,10 %	H_v , ГПа	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	$\rho_{отн.}$	E, ГПа
Образец 1	37,11	5,66	2,50	383
Образец 2	38,10	5,70	2,52	375
Образец 3	37,5	5,50	2,48	378

РФА полученных образцов керамики В4С приведён на рис. 17. Исследования показали, что содержание В4С в них не менее 99%. Это указывает на то, что быстрый процесс SPS консолидации в вакууме позволяет исключить посторонние примеси в керамике и происходит очищение карбида бора от примесей за относительно короткий промежуток времени.

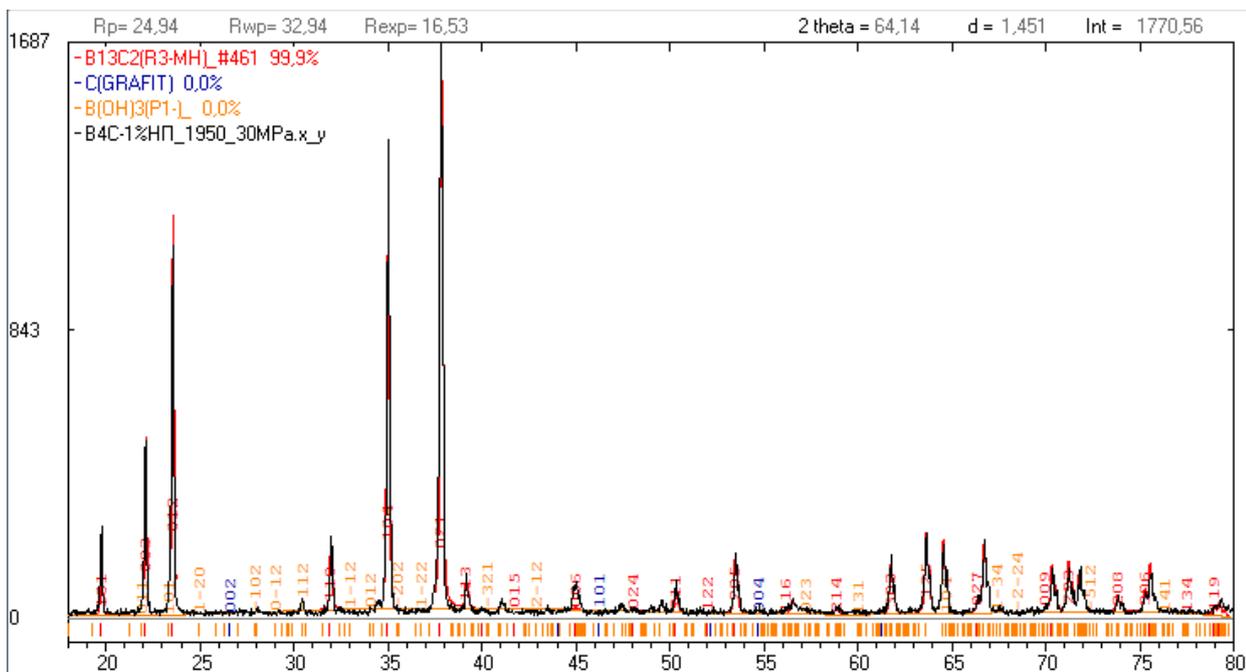


Рисунок 17. Дифрактограмма образцов керамики В4С

3.3. Структура, элементный и фазовый состав поверхностного слоя системы «металлическая пленка / (В₄С керамика) подложка», перед облучением импульсным электронным пучком

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования поверхности образцов керамики В₄С с напыленными на них металлическими пленками. На рис. 18-рис. 20 приведены электронно-микроскопические изображения структуры керамики с напыленными металлическими пленками. Представленные на данных рисунках изображения показывают, что пленки, сформированные на поверхности образцов керамики, характеризуются наличием большого количества микрокапель, размеры которых зависят от напыляемого материала. Для пленки алюминия размеры капель изменяются в пределах от 6 мкм до 0,5 мкм (рис. 18); для пленки титана размеры капель изменяются в пределах от 2,5 мкм до 0,5 мкм (рис. 19).

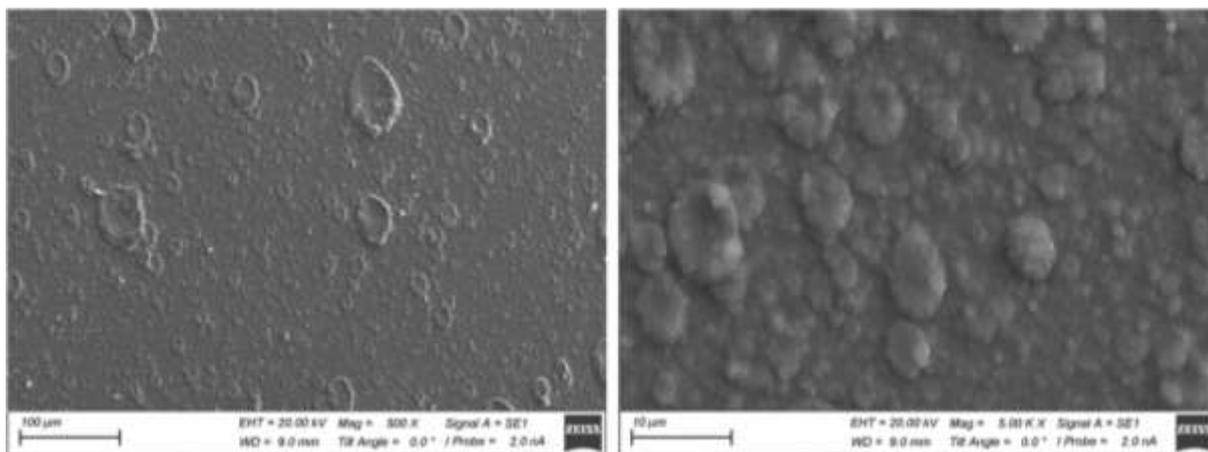


Рисунок 18. Электронно-микроскопическое изображение пленки алюминия, напыленной на поверхность керамики V_4C .

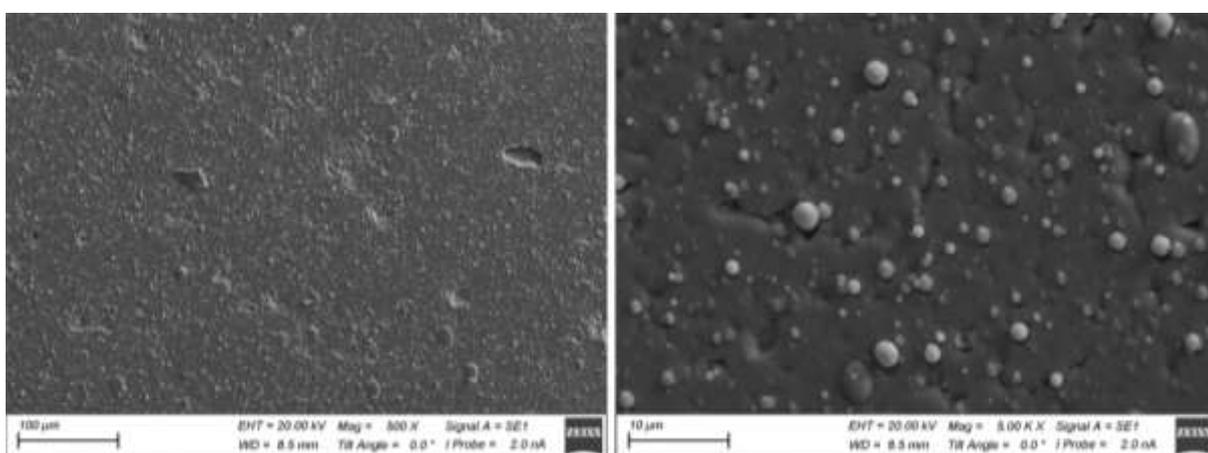


Рисунок 19. Электронно-микроскопическое изображение пленки титана, напыленной на поверхность керамики V_4C .

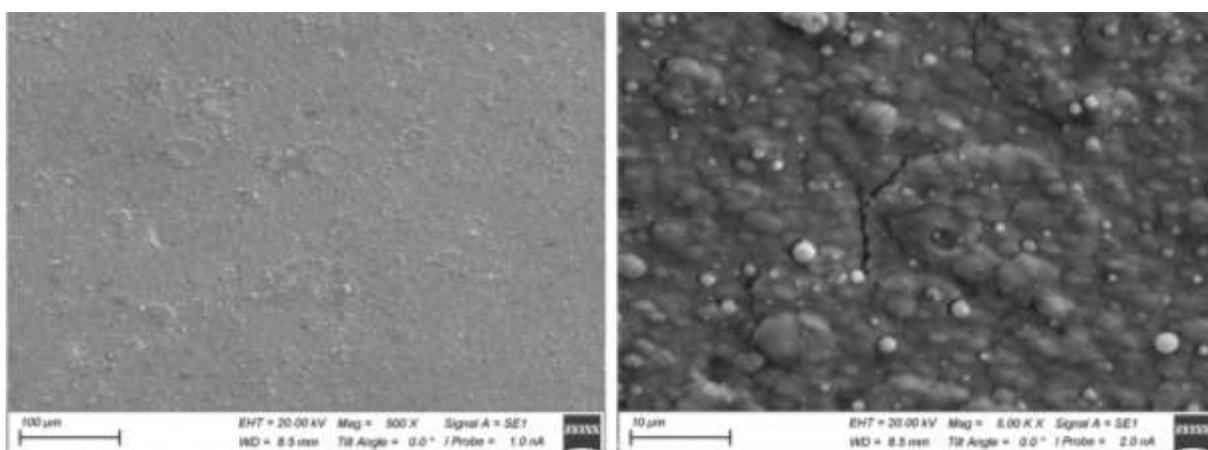


Рисунок 20. Электронно-микроскопическое изображение двухслойной системы (пленка алюминия + пленка титана), напыленной последовательно на поверхность керамики В₄С.

Соответственно, в двухслойной пленке будут присутствовать капли всего размерного диапазона, указанного выше, т.е. от 6 мкм до 0,5 мкм, однако элементный состав их будет различен.

Элементный состав системы «металлическая пленка / (В₄С керамика) подложка» изучали методами микрорентгеноспектрального анализа. Результаты анализа приведены на рис. 18-рис. 23. Количественные результаты исследований элементного состава, полученные при исследовании образцов керамики В₄С с напыленными на них металлическими пленками приведены в табл. 3 – табл. 5 Представленные на данных рисунках и в таблицах результаты подтверждают формирование на поверхности образцов керамики В₄С металлических пленок различного элементного состава, указанного в задачах, поставленных в настоящей работе.

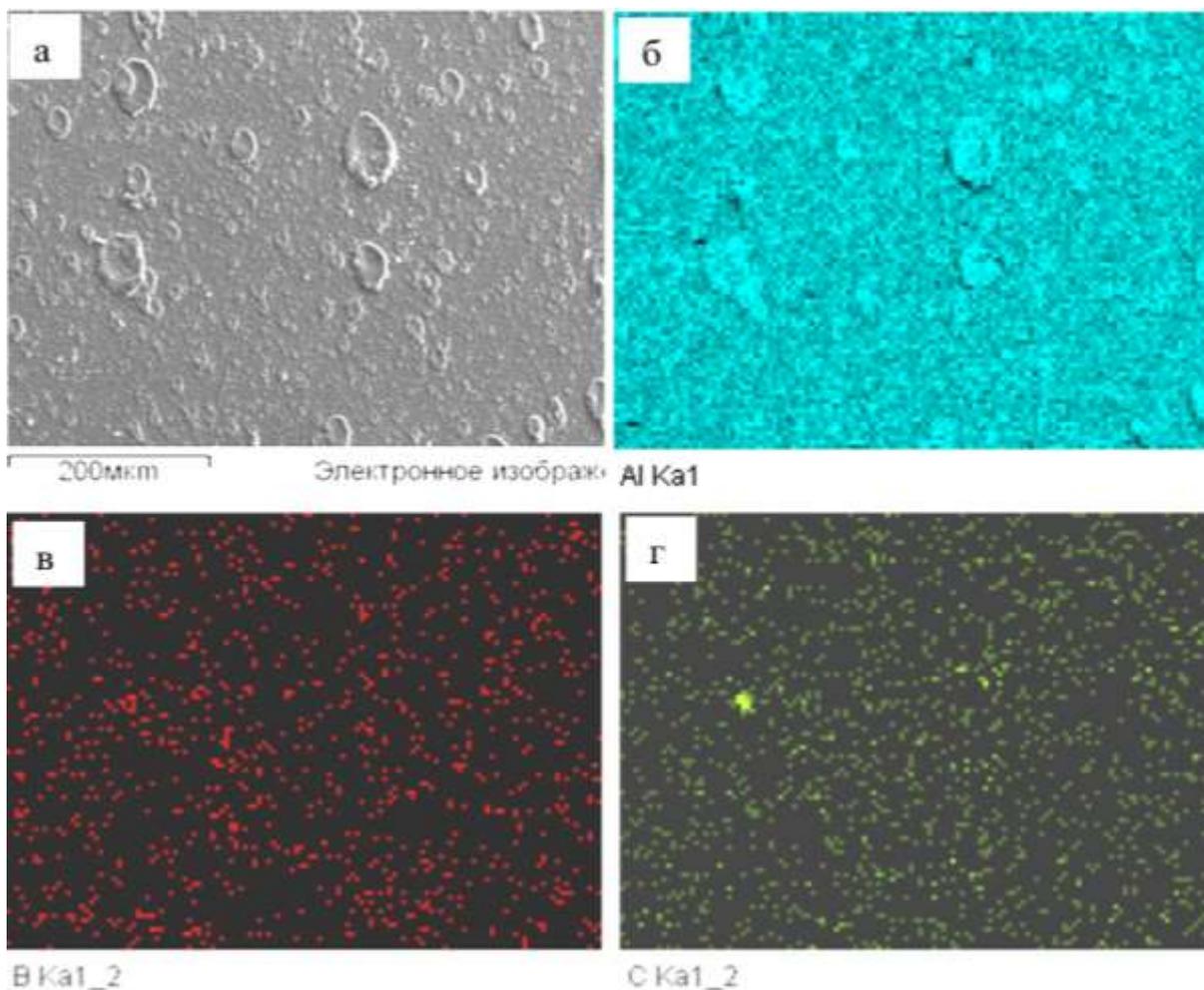


Рисунок 21 Электронно-микроскопическое изображение поверхности однослойной системы, состоящей из пленки алюминия, напыленных на поверхность керамики B_4C (а); на (б-г) приведено изображение данного участка поверхности, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов алюминия (б), бора (в) и углерода (г).

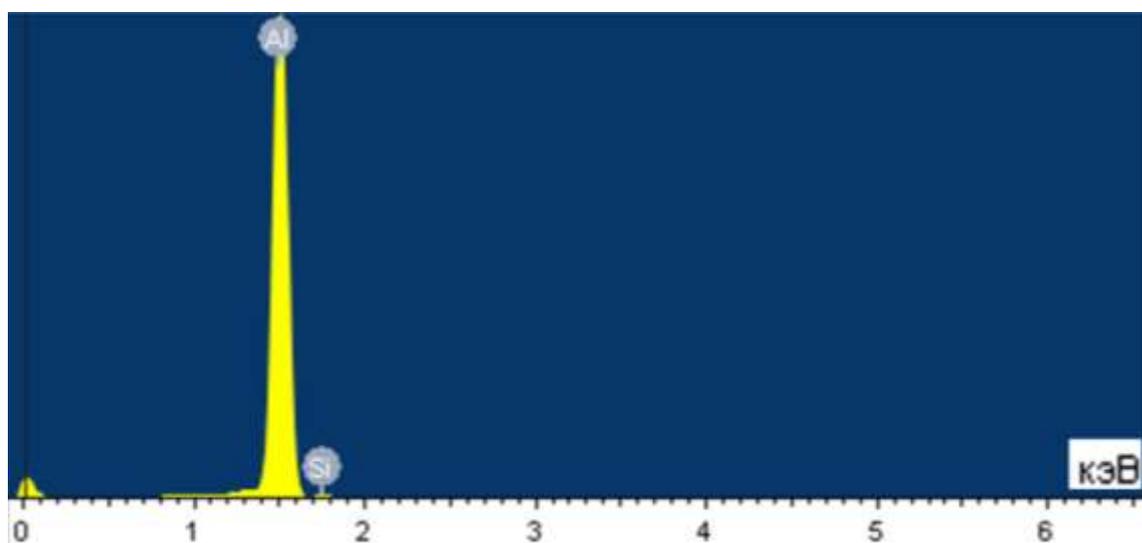


Рисунок 22. Энергетические спектры, полученные с участка поверхности однослойной системы, состоящей из пленки алюминия, напыленных на поверхность керамики V_4C_5 , приведенного на рис. 21, а.

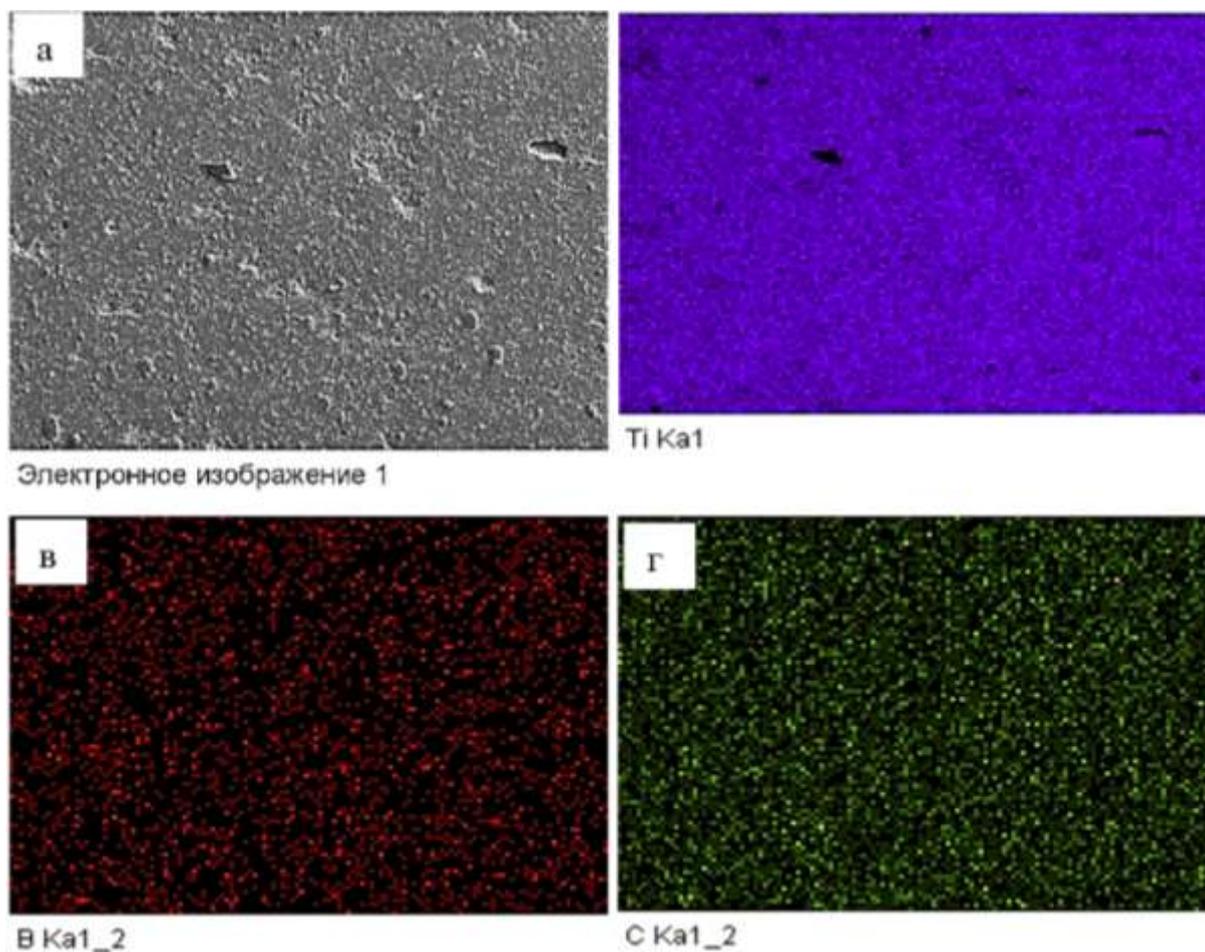


Рисунок 23. Электронно-микроскопическое изображение поверхности однослойной системы, состоящей из пленки титана, напыленной на поверхность керамики V_4C_5 (а); на (б-г) приведено изображение данного участка поверхности, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов титана (б), бора (в) и углерода (г).

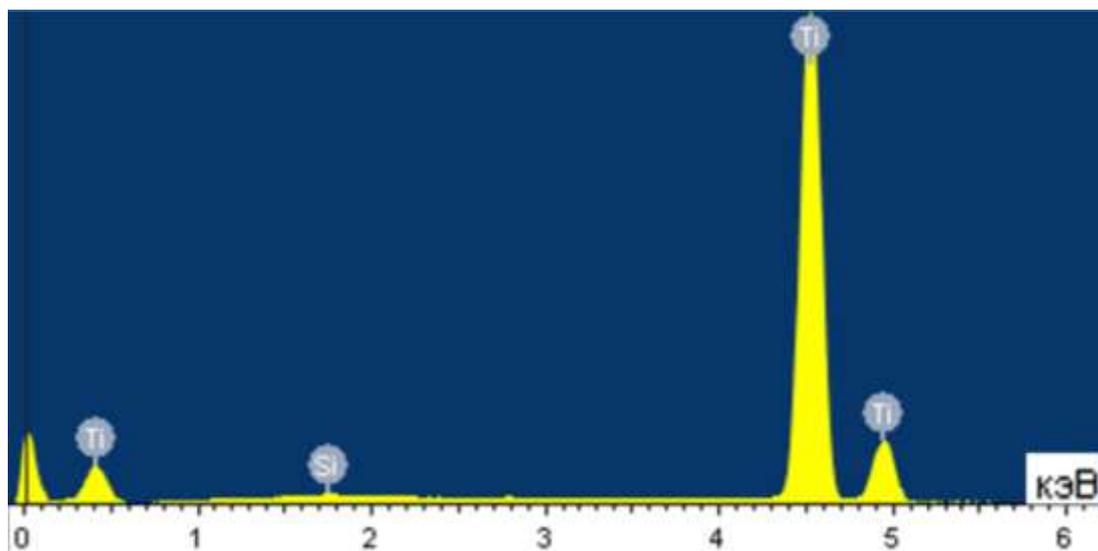


Рисунок 24. Энергетические спектры, полученные с участка поверхности однослойной системы, состоящей из пленки титана, напыленных на поверхность керамики V_4C_3 , приведенного на рис. 23 а.

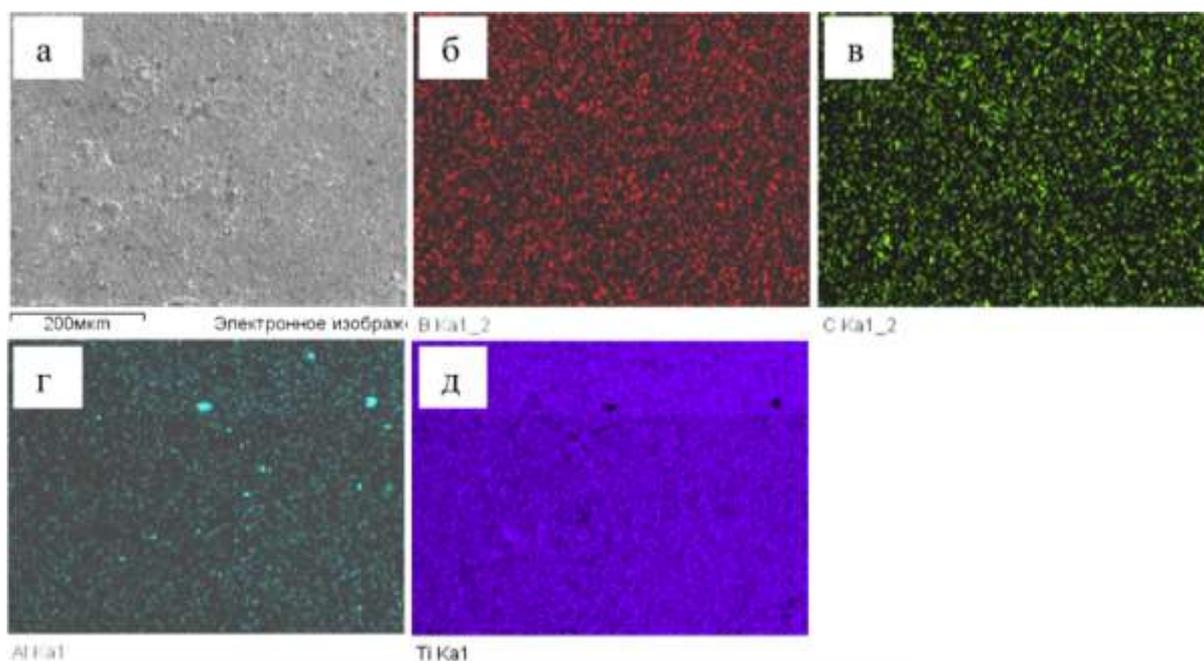


Рисунок 25. Электронно-микроскопическое изображение поверхности двухслойной системы (пленка алюминия + пленка титана), напыленных последовательно на поверхность керамики V_4C_3 (а); на (б-д) приведено изображение данного участка поверхности, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов бора (б), углерода (в), алюминия (г) и титана (д).

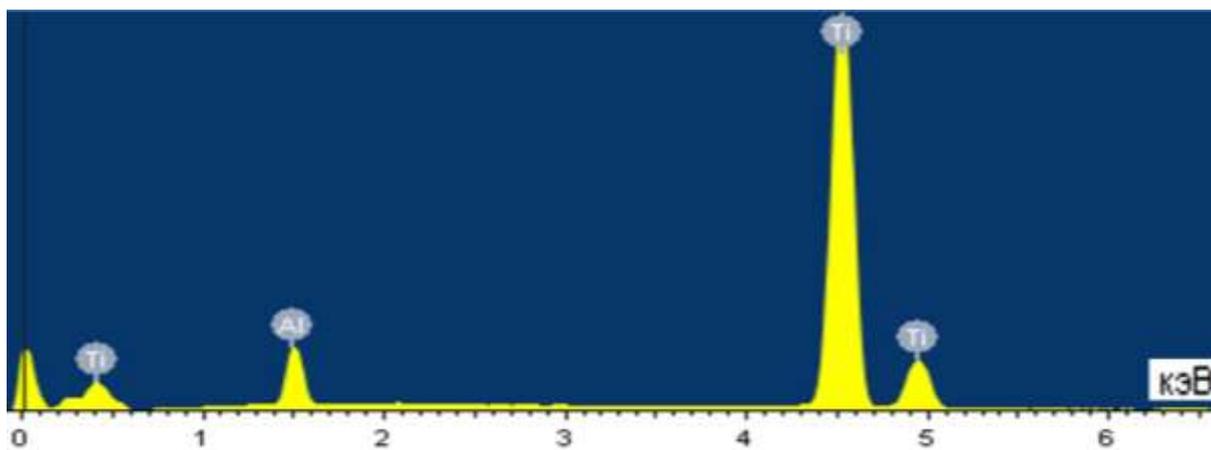


Рисунок 26. Энергетические спектры, полученные с участка поверхности двухслойной системы, (пленка алюминия + пленка титана), напыленных последовательно на поверхность керамики V_4C , приведенного на рис. 24, а.

Таблица 4. – Результаты количественного анализа спектров, приведенных на рис. 22.

Элемент	Усл. конц.	Весовой %	Весовой % Сигма	Атомный %
C K	0.42	4.19	0.51	8.94
Al K	85.15	95.0	0.51	91.00
Ti K	0.06	0.11	0.03	0.06

Таблица 5. – Результаты количественного анализа спектров, приведенных на рис. 24.

Элемент	Усл. конц.	Весовой %	Весовой % Сигма	Атомный %
C K	0.57	0.77	0.17	3.00
Al K	0.05	0.07	0.03	0.13
Ti K	99.32	99.16	0.17	96.87

Таблица 6. – Результаты количественного анализа спектров, приведенных на рис. 26.

Элемент	Усл. конц.	Весовой %	Весовой % Сигма	Атомный %
C K	3.77	5.62	0.22	18.33
Al K	5.53	6.95	0.05	10.09
Ti K	90.45	87.44	0.21	71.57

Фазовый состав системы «металлическая пленка / (B_4C керамика) подложка», сформированный перед облучением импульсным электронным пучком, изучали методами рентгенофазового анализа (РФА). Исследование фазового состава и структурных параметров образца проводили на дифрактометре XRD-6000 на CuK_{α} -излучении. Анализ фазового состава выполнен с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Результаты исследований представлены в виде участков рентгенограмм (рис. 27 и рис. 29) и табл. 7 и табл. 8.

Анализ результатов, полученных методами РФА, позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, напыление на керамику пленки титана приводит к разложению карбида бора с образованием графита с ГПУ кристаллической решеткой. Относительное содержание графита в поверхностном слое керамики составляет 29,63 масс. % (табл. 7). Во-вторых, напыляемая пленка титана является двухфазной, т.е. представлена зернами α -Ti и β -Ti (табл. 7). Области когерентного рассеивания керамики и пленки титана близки и относятся к наноразмерному диапазону. Микроискажения кристаллической решетки пленки титана многократно превышают микроискажения кристаллической решетки керамики. Последнее указывает на высокий уровень напряжений, формирующихся в пленке титана при осаждении на керамику карбида бора.

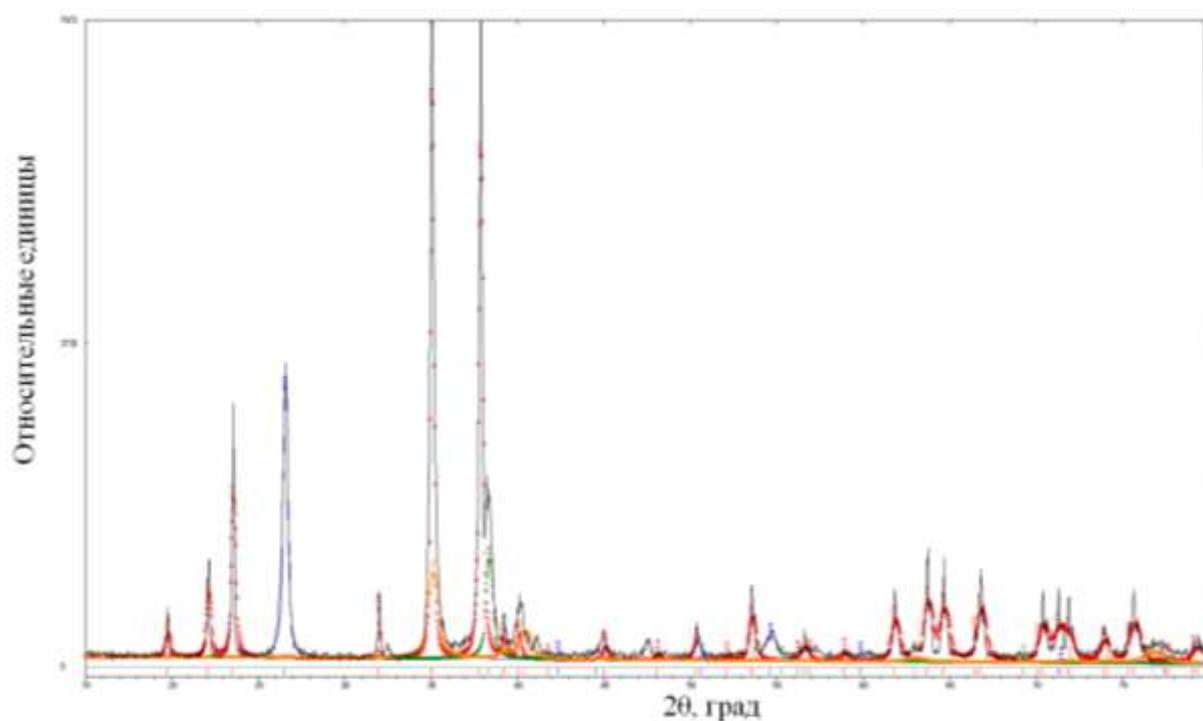


Рисунок 27. Фрагмент рентгенограммы системы «металлическая пленка (Ti) / (V₄C керамика) подложка» перед облучением импульсным электронным пучком.

Таблица 7 – Результаты рентгенофазового анализа системы «металлическая пленка (Ti) / (V₄C керамика) подложка» перед облучением импульсным электронным пучком

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, мас. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-4}$
Ti/V ₄ C	V ₁₃ C ₂	63,03	a = 5,6023 c = 12,0749	34,28	0,678
	β-Ti	2,87	a = 3,3222	22,96	15,4
	α-Ti	4,47	a = 2,9512 c = 4,5858	24,08	66,81
	C	29,63	a = 2,4635 c = 6,7188		

Анализ результатов, полученных методами РФА при исследовании системы «металлическая пленка (Ti/Al) / (V₄C керамика) подложка», позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, напыление на керамику двухслойной

пленки, сначала пленка алюминия, потом пленка титана предотвращает разложение карбида бора с образованием графита (табл. 7).

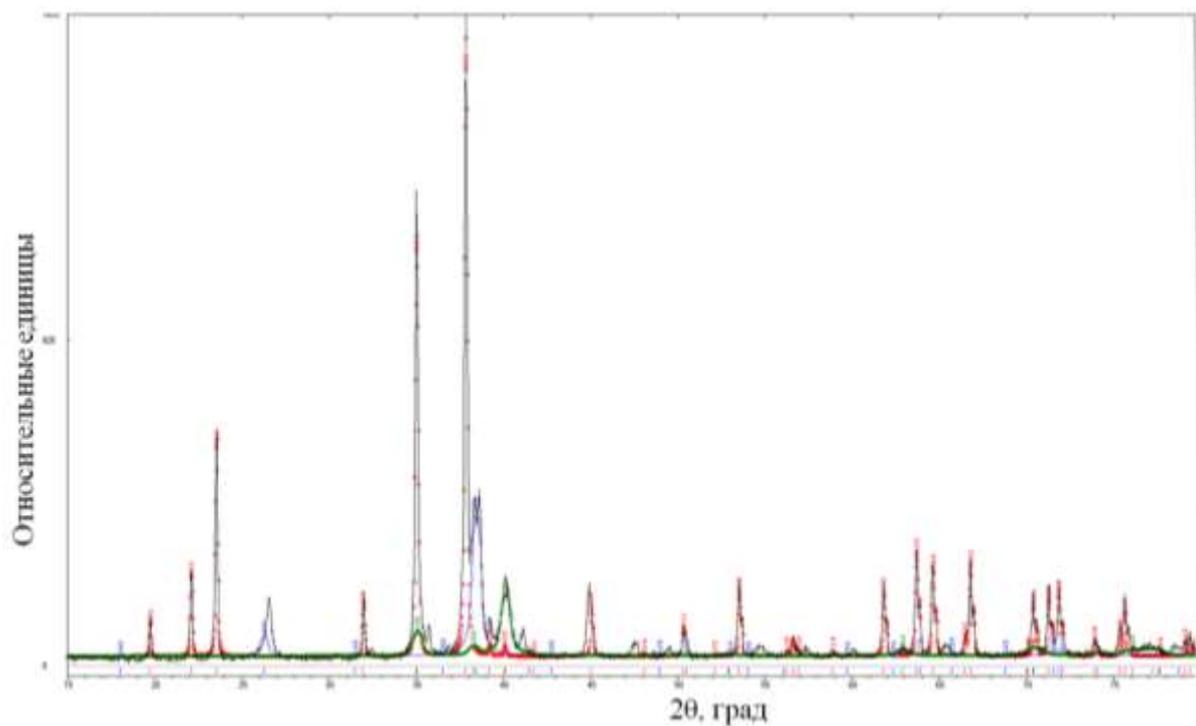


Рисунок 28. Фрагмент рентгенограммы системы «металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка» перед облучением импульсным электронным пучком.

Таблица 8 – Результаты рентгенофазового анализа системы «металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка» перед облучением импульсным электронным пучком

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, мас. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-4}$
Ti/Al/B ₄ C	B ₁₃ C ₂	94,11	a = 5,6003 c = 12,0760	261,2	0,38
	AlTi ₃	3,49	a = 5,6800 c = 4,6825	41,32	48,89
	α -Ti	2,4	a = 2,9535 c = 4,7003	29,46	56,36

Во-вторых, напыление на пленку алюминия пленки титана приводит к формированию интерметаллида AlTi₃. В-третьих, методами РФА металлический алюминий в двухслойной системе не обнаружен. В-четвертых, пленка титана присутствует только в α -модификации (табл. 7). Области когерентного рассеивания поверхностного слоя керамики составляют 261,2 нм, что близко к размерам зерен керамики до напыления пленок. Отметим, что при напылении пленки титана область когерентного рассеивания керамики многократно меньше и составляет 34,28 нм. Микроискажения кристаллической решетки интерметаллида и пленки титана многократно превышают микроискажения кристаллической решетки керамики. Последнее указывает на высокий уровень напряжений, формирующихся в двухслойной пленке при осаждении на керамику карбида бора.

3.4. Структура, элементный и фазовый состав поверхностного слоя системы «металлическая пленка / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком.

Следующим шагом настоящей работы являлось облучение системы «металлическая пленка / (B₄C керамика) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия и

последующее изучение структурно-фазового состояния формирующегося материала. Параметры пучка электронов выбирали по результатам предварительно выполненного моделирования температурного поля, формирующегося в материале при облучении импульсным электронным пучком. Целью облучения являлось жидкофазное легирование поверхностного слоя керамики элементами металлической пленки. В качестве материала исследования использовали две системы, во-первых, «металлическая пленка (Ti) / (V₄C керамика) подложка» и, во-вторых, «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (V₄C керамика) подложка».

Структуру поверхности образцов системы «пленка/подложка», облученной импульсным электронным пучком, изучали методами сканирующей электронной микроскопии. Представленные на рис. 29 микрофотографии свидетельствуют о том, что облучение системы «металлическая пленка (Ti) / (V₄C керамика) подложка» импульсным электронным пучком приводит к формированию неоднородной структуры, содержащей большое количество микропор и участков с разрушенной пленкой титана (рис. 29, б).

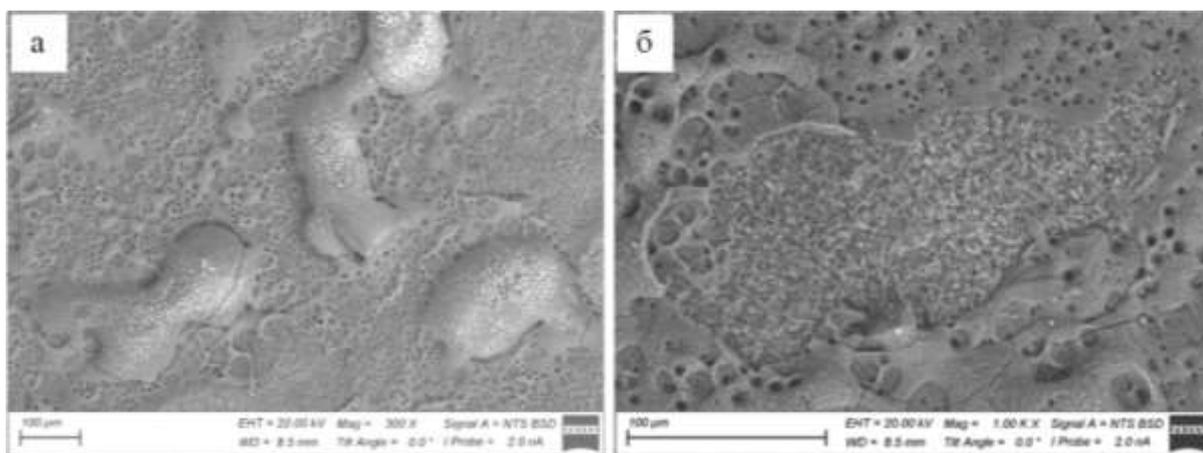


Рисунок 29. Электронно-микроскопические изображения структуры поверхности образцов керамики V₄C с напыленной пленкой титана и облученной импульсным электронным пучком.

Методами микрорентгеноспектрального анализа (метод картирования) выявлено неоднородное распределение титана на поверхности керамики

(рис. 30). Отчетливо видно неоднородное распределение химических элементов в поверхностном слое керамики. Относительное содержание титана в исследуемом объеме образца (рис. 30, а) весьма мало (табл. 9), что может свидетельствовать о разрушении пленки титана и ее отслаивании при облучении импульсным электронным пучком системы «пленка/подложка».

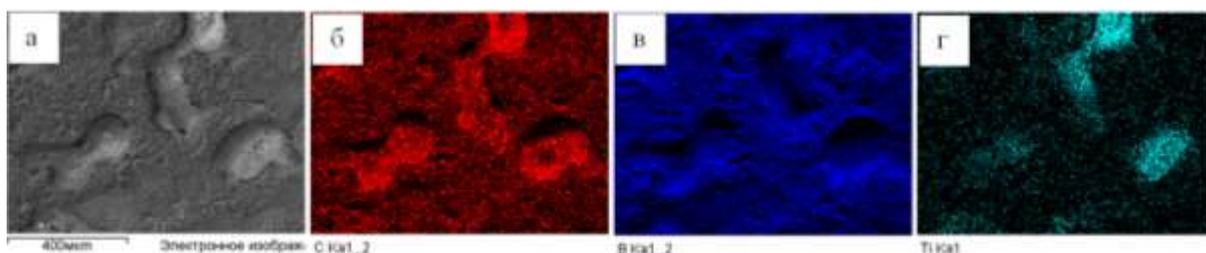


Рисунок 30. Электронно-микроскопическое изображение поверхности системы «пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка» (а); б-г – изображения данного участка материала, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов углерода (б), бора (в) и титана (г).

Микрорентгеноспектральный анализ, выполненный методом «по точкам», выявил области повышенного и пониженного содержания титана на поверхности керамики. Результаты исследований, представленные на рис. 31, показывают, что титан на поверхности керамики при облучении электронным пучком не только разрушается (расслаивается), но и собирается в капли, демонстрируя низкую смачиваемость керамики карбида бора расплавом титана. В объеме капель относительное содержание титана изменяется в пределах от 0,8 ат.% до 1,4 ат.%. В пространствах между каплями концентрация титана ничтожно мала (0,01-0,11 ат.%).

Таблица 9. Результаты количественного микрорентгеноспектрального анализа участка поверхности образца, представленного на рис. 30, а.

Элемент	Усл. конц.	Весовой %	Весовой % Сигма	Атомный %
V K	39.05	50.0	0.46	53.73
C K	9.07	46.5	0.46	44.87
Ti K	0.51	0.48	0.01	0.12

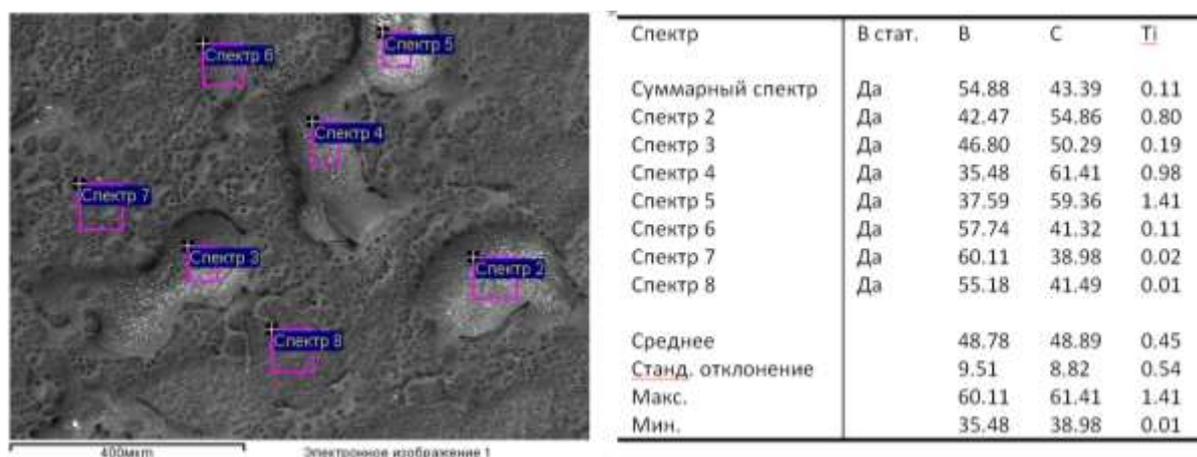


Рисунок 31. Электронно-микроскопическое изображение поверхности системы «пленка (Ti) / (V₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком. В таблице приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа выделенных участков.

Облучение системы «пленка (Ti) / (V₄C керамика) подложка» импульсным электронным пучком сопровождается легированием поверхностного слоя с образованием прослоек по границам кристаллитов керамики (рис. 32).

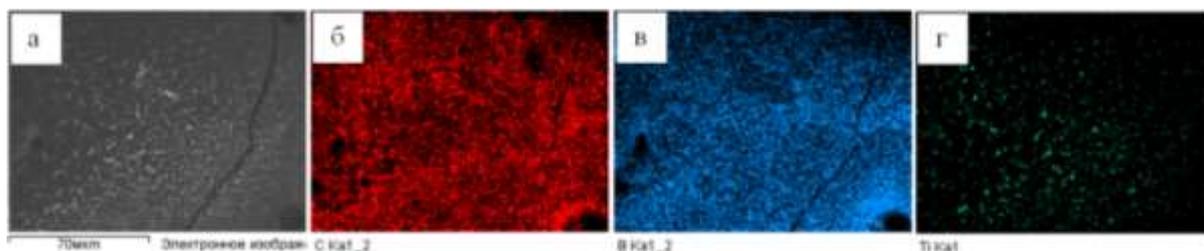


Рисунок 32. Электронно-микроскопическое изображение поверхности системы «пленка (Ti) / (V₄C керамика) подложка» (а); б-г – изображения

данного участка материала, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов углерода (б), бора (в) и титана (г).

Таблица 10. Результаты количественного микрорентгеноспектрального анализа участка поверхности образца, представленного на рис. 32, а.

Элемент	Усл. конц.	Весовой %	Весовой % Сигма	Атомный %
В К	29.41	40.2	0.58	44.75
С К	14.80	53.2	0.56	53.33
Ti К	0.76	0.63	0.02	0.16

Облучение системы «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (В₄С керамика) подложка» импульсным электронным пучком не приводит к формированию на поверхности керамики капель, также весьма малы участки отслаивания пленки (рис. 33). В результате облучения в поверхностном слое формируется субмикро-нанокристаллическая структура (рис. 33, б). Результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о высокой концентрации титана и алюминия в поверхностном слое керамики (рис. 34).

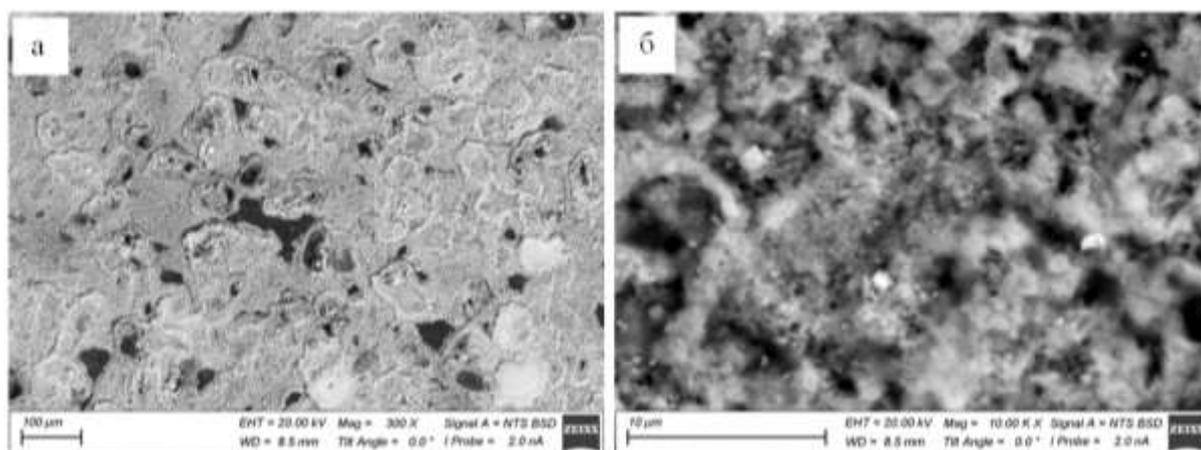


Рисунок 33. Электронно-микроскопические изображения структуры системы «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (В₄С керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком.

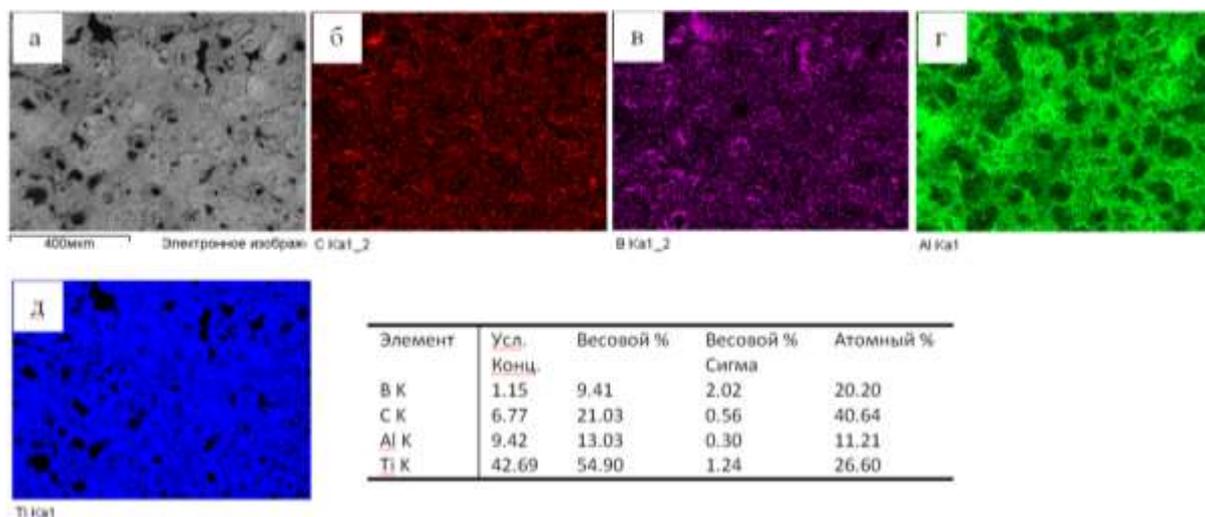
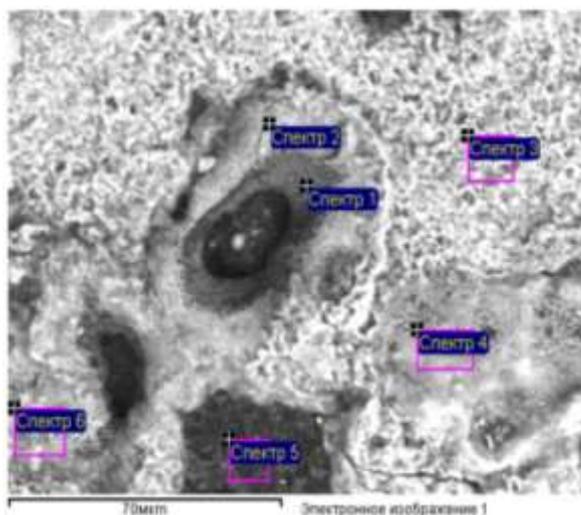


Рисунок 34. Электронно-микроскопическое изображение поверхности системы «пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка» (а); б-д – изображения данного участка материала, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов углерода (б), бора (в), алюминия (г) и титана (д).

Микрорентгеноспектральный анализ, выполненный методом «по точкам», выявил области повышенного и пониженного содержания титана и алюминия на поверхности керамики. Результаты исследований, представленные на рис. 35, показывают, что титан и алюминий формируют на поверхности керамики при облучении электронным пучком практически сплошной слой с небольшими участками (спектр 5) отслаивания. В формирующемся поверхностном слое относительное содержание титана изменяется в пределах от 4,1 ат.% до 41,4 ат.%, алюминия – от 0,74 ат. % до 12,5 ат. %.



Спектр	B	C	Al	Ti
Спектр 1	62.41	31.22	0.74	4.10
Спектр 2	61.08	13.52	2.99	19.54
Спектр 3	3.77	33.69	12.47	24.64
Спектр 4	17.73	30.92	2.56	41.35
Спектр 5	74.88	20.72	1.80	0.30
Спектр 6	23.19	35.06	3.63	26.37
Среднее	40.51	27.52	4.03	19.38
Станд. отклонение	29.16	8.51	4.25	15.21
Макс.	74.88	35.06	12.47	41.35
Мин.	3.77	13.52	0.74	0.30

Рисунок 35. Электронно-микроскопическое изображение поверхности системы «пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком. В таблице приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа выделенных участков.

Фазовый состав и состояние кристаллической решетки фаз изучали методами рентгенофазового анализа. Результаты исследований приведены на рис. 36 и рис. 37 и в табл. 11 и табл. 12. Рассмотрим полученные результаты.

Облучение системы «металлическая пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка» импульсным электронным пучком сопровождается формированием в поверхностном слое диборида титана (рис. 36 и табл. 11). Металлический титан в поверхностном слое облученного образца не выявляется. Размеры областей когерентного рассеивания керамики карбида бора увеличиваются с 34 нм до 233 нм, что может быть обусловлено тепловым эффектом, имеющим место при облучении системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком. Области когерентного рассеивания частиц диборида титана и графита близки и составляют 40,8 нм и 42,7 нм, соответственно. Облучение системы «пленка/подложка» приводит к существенному (более чем в 4 раза) увеличению микроискажений кристаллической решетки керамики карбида бора. Это может свидетельствовать о внедрении атомов титана в кристаллическую решетку керамики.

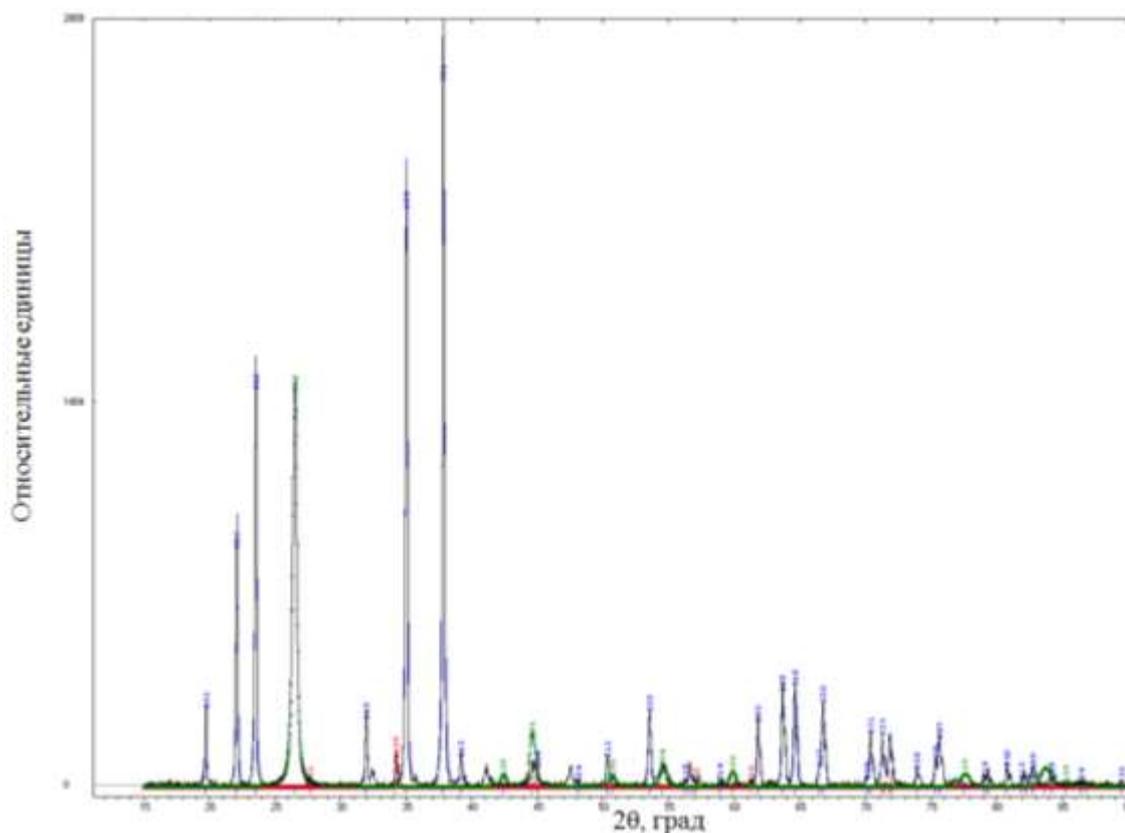


Рисунок 36. Фрагмент рентгенограммы системы «металлическая пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком.

Таблица 11 – Результаты рентгенофазового анализа системы «металлическая пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, мас. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-4}$
Ti/B ₄ C	B ₁₃ C ₂	65,31	a = 5,5994 c = 12,0716	233	2,95
	TiB ₂	21,55	a = 3,0241 c = 3,2233	40,81	18,55
	C	13,14	a = 2,4599 c = 6,7251	42,71	27,15

Облучение системы «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка» приводит к формированию многофазного поверхностного слоя. Методами РФА выявлены, наряду с подложкой (карбид бора), диборид титана, карбид титана, алюминид титана и графит (рис. 37 и табл. 12). Металлические алюминий и титан методами РФА не обнаружены. Облучение системы «пленка/подложка» привело к кратному (в 3,8 раза) уменьшению величины областей когерентного рассеивания подложки.

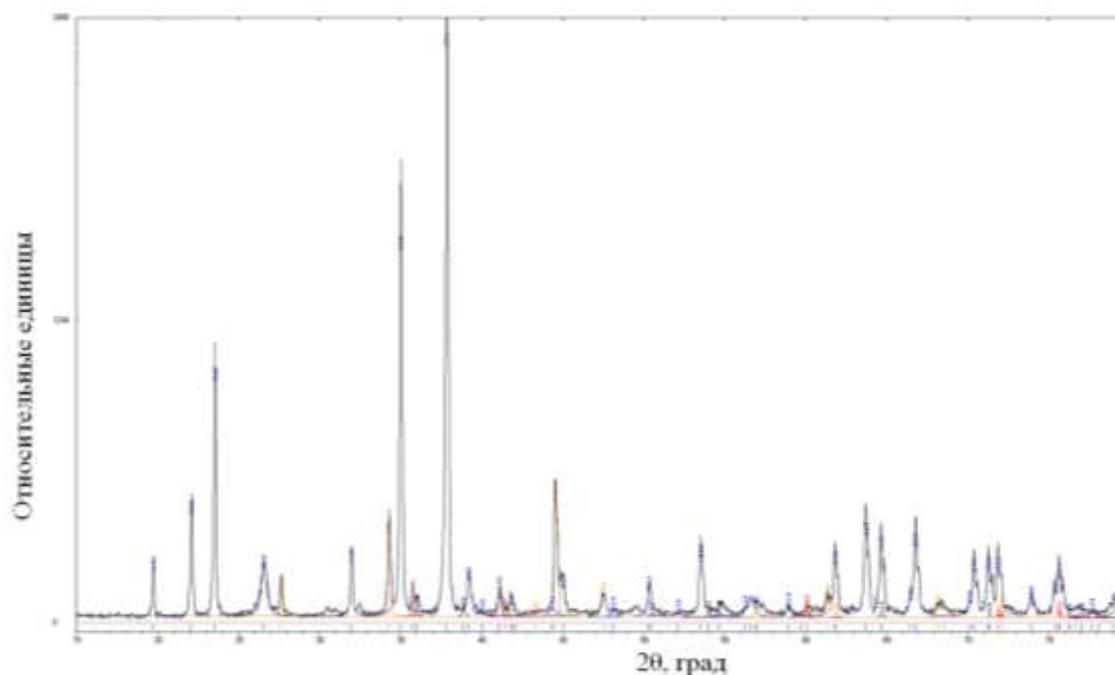


Рисунок 37. Фрагмент рентгенограммы системы «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным

электронным пучком.

Таблица 12 – Результаты рентгенофазового анализа системы «металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком.

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз vol. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-4}$
Al-Ti/B ₄ C	B ₁₃ C ₂	60,09	a = 5,5985 c = 12,0688	68,93	6,95
	TiB ₂	7,49	a = 3,0203 c = 3,2311	49,97	13,14
	AlTi	1,3	a = 2,8808 c = 4,6302	49,28	35,70
	TiC	0,67	a = 4,3528	8,09	62,9
	C	23,27	a = 2,4747 c = 6,7100	25,01	13,42
	C	7,18	a = 2,4862 c = 4,1754	12,7	15,13

Следуя результатам, приведенным в табл. 11, можно отметить, что формирующийся в результате облучения поверхностный слой является нанокристаллическим; размеры областей когерентного рассеивания всех фаз поверхностного слоя изменяются в пределах от 8,09 нм (TiC) до 68,93 нм (B₁₃C₂). Уменьшение размеров областей когерентного рассеивания карбида бора сопровождается увеличением микроискажений его кристаллической решетки более чем в 18 раз.

Таким образом, облучение импульсным электронным пучком системы «металлическая пленка / (B₄C керамика) подложка» приводит к существенному преобразованию элементного и фазового состава, состояния кристаллической решетки поверхностного слоя керамики.

Морфологию и состояние дефектной субструктуры фаз, поверхностного слоя системы «металлическая пленка / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком, исследовали методами просвечивающей

электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Фольги изготавливали из пластинок, вырезанных из образцов облученной керамики в плоскости, расположенной перпендикулярно поверхности облучения. В этом случае появляется возможность провести анализ формирующейся структуры в зависимости от расстояния от поверхности обработки материала.

Результаты исследования фольги системы «пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком, методами STEM анализа приведены на рис. 38.

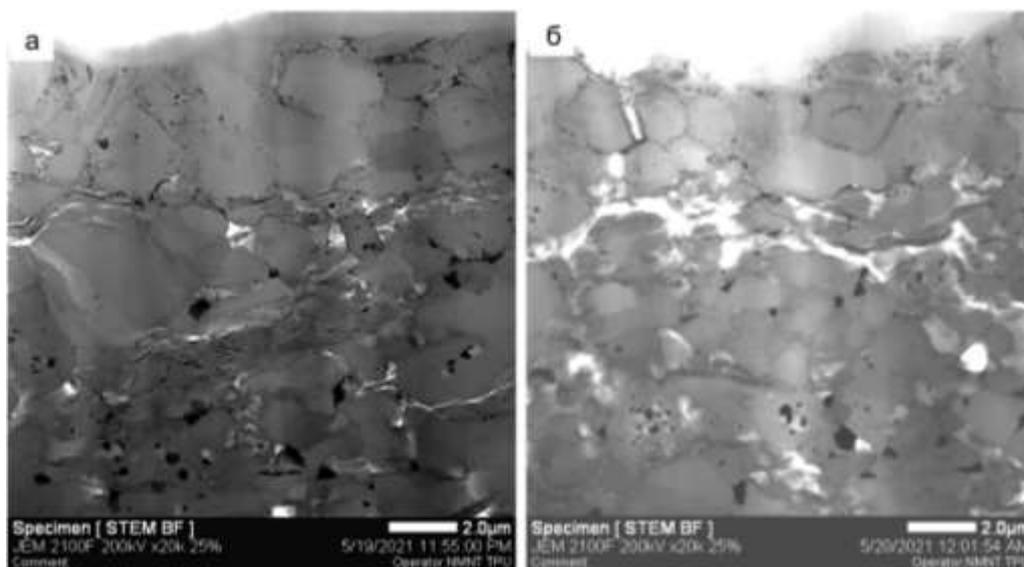


Рисунок 38. STEM изображение структуры системы «пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком.

Выполненные исследования показали, что облучение данной системы импульсным электронным пучком сопровождается формированием микротрещин, расположенных в поверхностном слое керамики вдоль границы раздела в напыленной пленкой (рис. 38). Последнее может указывать на низкие механические свойства данной системы и ее не перспективность.

На рис. 39 приведены результаты STEM анализа системы «пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка», облученная импульсным электронным пучком. Отчетливо видно, что в результате облучения в поверхностном слое формируется многослойная система. Слои имеют различный контраст и различаются морфологией структуры. Опираясь на эти признаки, можно

положить, что слои 2 и 4 являются керамикой на основе карбида бора, а слои 1 и 3 сформировались в результате облучения импульсным электронным пучком системы «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка».



Рисунок 39. STEM изображение структуры системы «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком.

Сопоставляя результаты исследований, приведенные на рис. 38 и 39, можно заключить, что облучение импульсным электронным пучком системы «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка» сопровождается, на стадии скоростного нагревания, формированием в поверхностном слое керамики микротрещин и последующим, на стадии охлаждения, их залечиванием расплавленным металлом пленки.

Исследование структурно-фазового состава, приведенного на рис. 39 участка фольги, осуществляли в областях, выделенных окружностями. На

рис. 40 и рис. 41 приведены электронно-микроскопические изображения структуры участков 2 и 4.

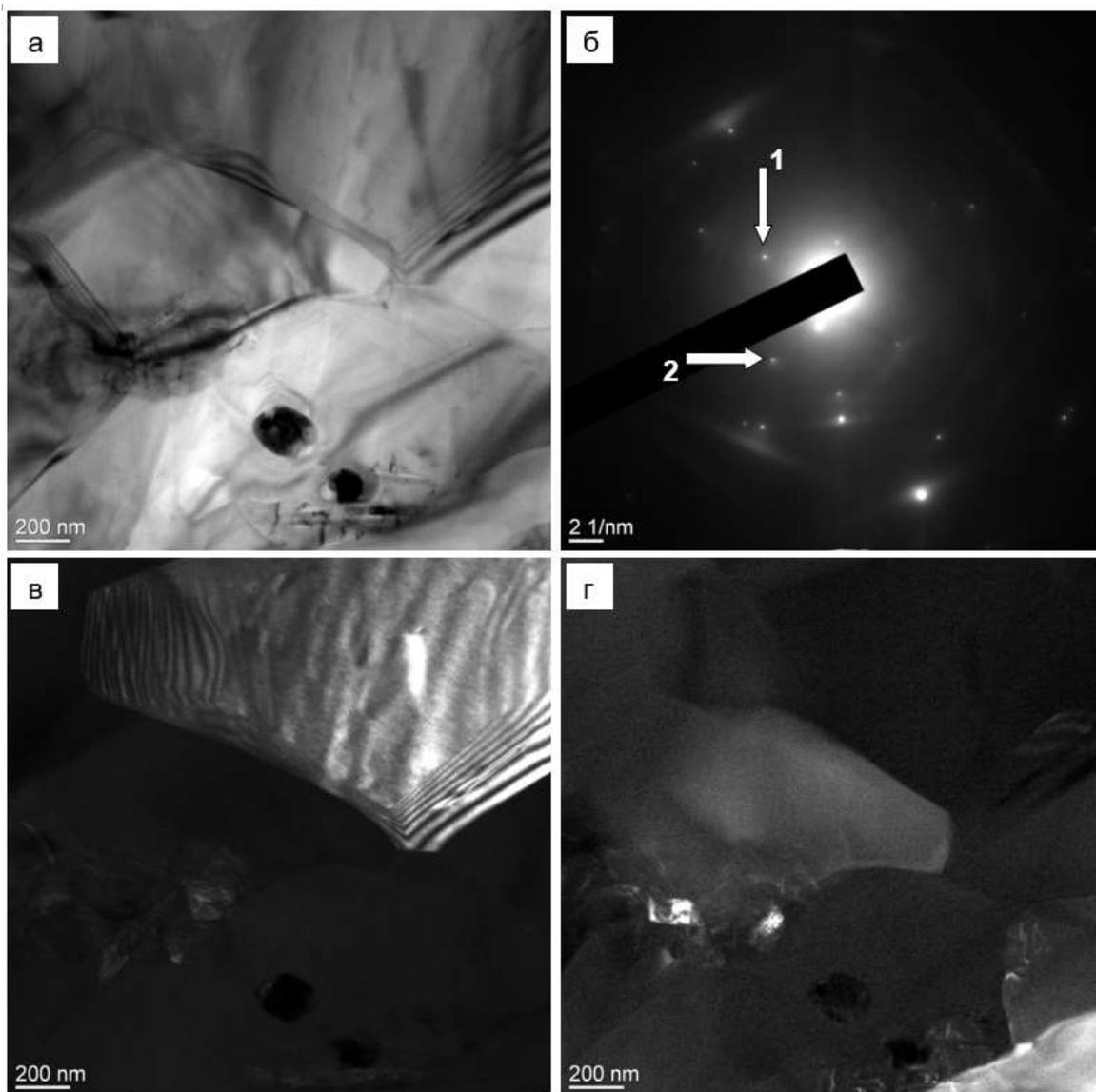


Рисунок 40. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя 2 (рис. 32); а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[021]V_4C$ (в); $[205]V_4C + [202]AlTi_3$ (г). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в), 2 – для (г).

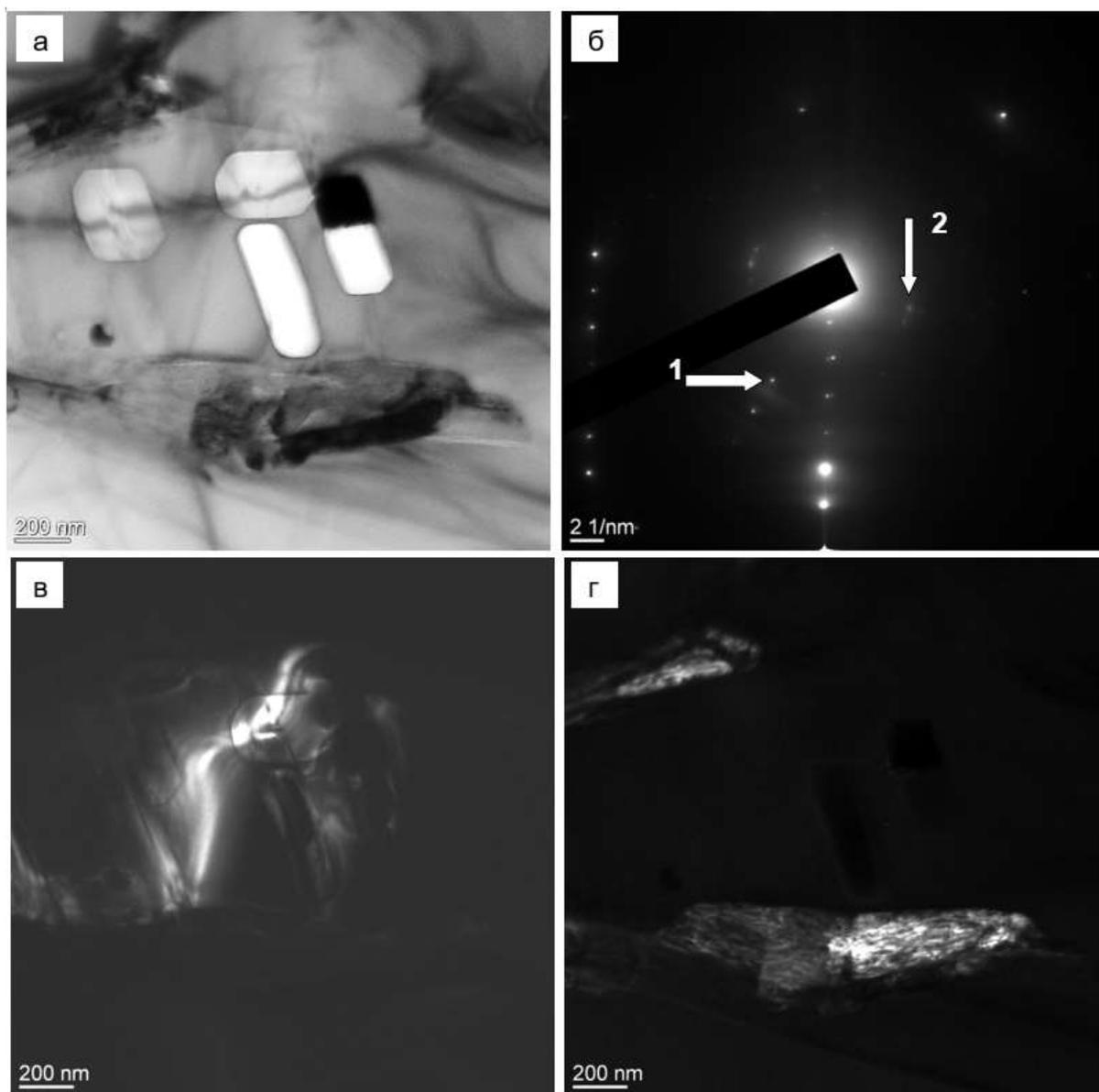


Рисунок 41. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя 4 (рис. 32); а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[125]B_4C$ (в); $[220]C$ (г). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в), 2 – для (г).

Анализируя результаты микродифракционного анализа, представленные на данных рисунках, можно сказать, что основной фазой слоев №2 и №4 являются зерна керамики карбида бора. Дополнительной фазой, присутствующей в слое 2 преимущественно на границах зерен карбида бора, является алюминид титана состава $AlTi_3$ (рис. 40). В слое 4 на границах зерен карбида бора располагаются включения графита (рис. 41).

На рис. 42 и рис. 43 приведены электронно-микроскопические изображения структуры слоев №1 и №3.

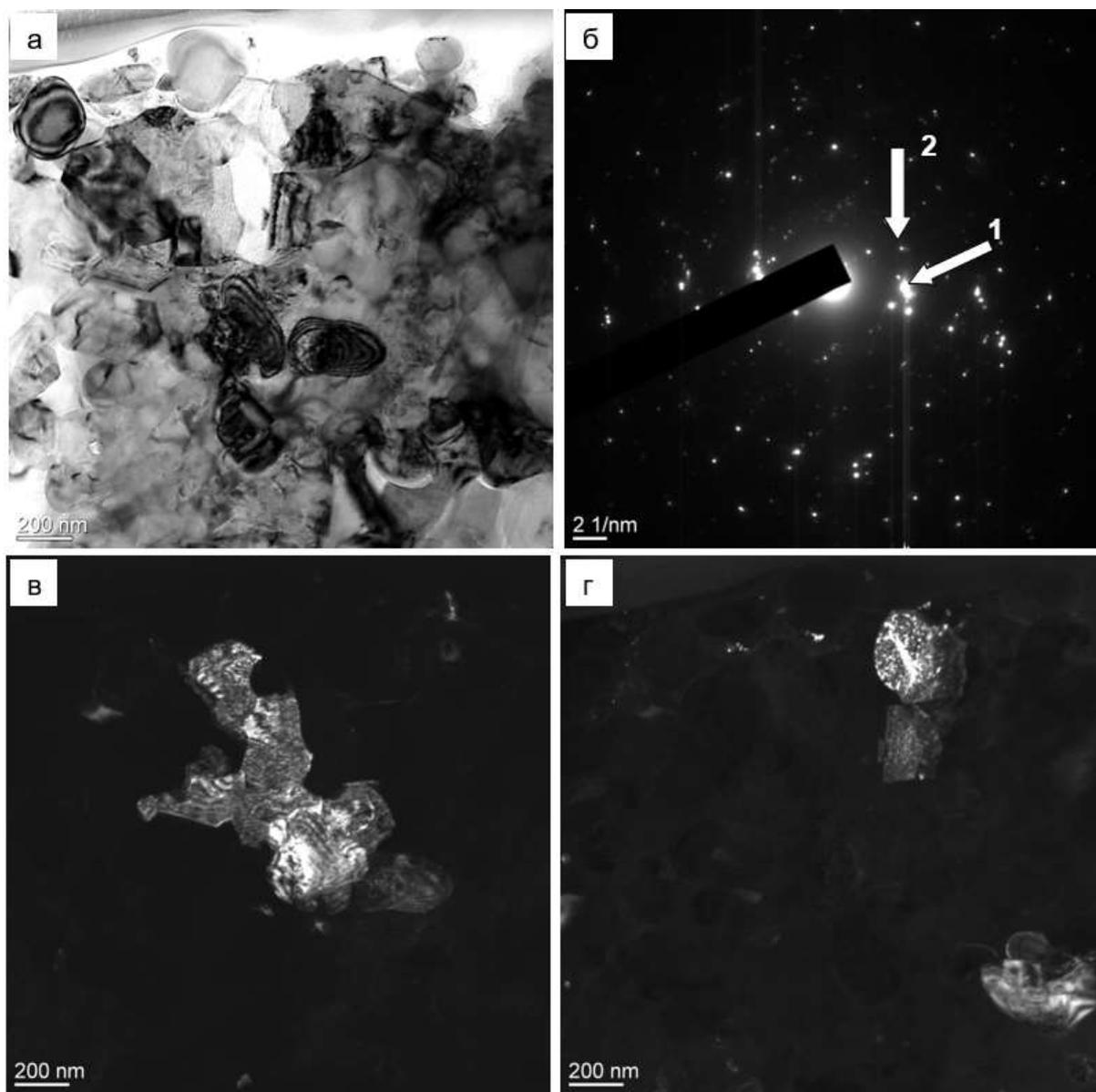


Рисунок 42. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя 1 (рис. 32); а – светлое поле; б – микроэлектродифракция; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[101]\alpha\text{-Ti}$ (в); $[423]\text{AlB}_{12}$ (г). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в), 2 – для (г).

Микродифракционный анализ слоя №1 показывает, что основной фазой являются зерна $\alpha\text{-Ti}$ (рис. 42, в). Размеры зерен титана изменяются в пределах от 100 до 160 нм. В объеме зерен титана выявляются включения боридов

алюминия (рис. 42, г). Размеры включений (10-20) нм. В слое №3 основными фазами являются зерна карбида бора и титана, дополнительными фазами являются бориды титана и алюминия, а также алюминиды титана (рис. 43).

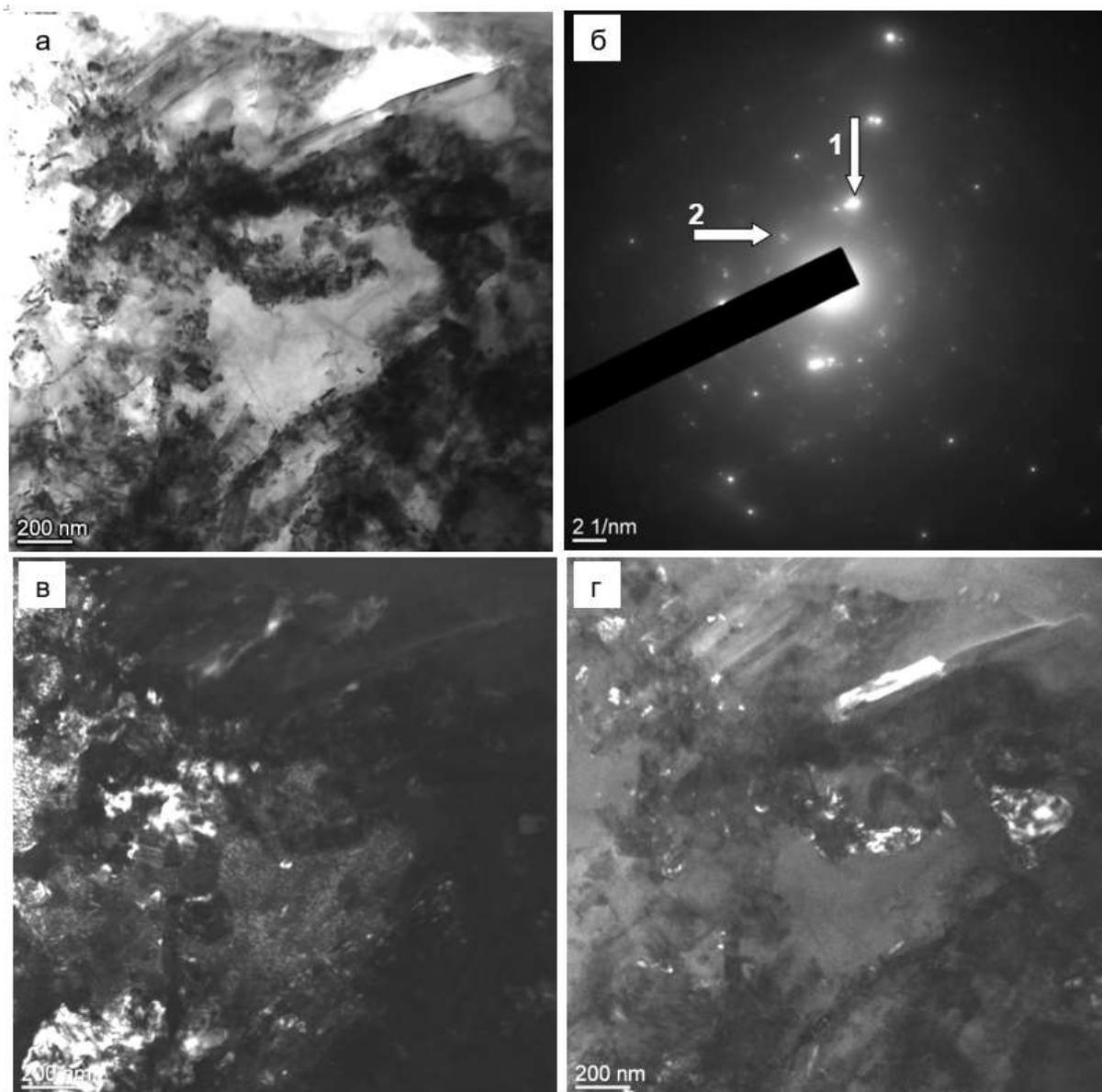


Рисунок 43. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя 3 (рис. 32); а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[301]\text{TiB} + [513]\text{AlB}_{12}$ (в); $[111]\text{TiB} + [112]\text{Al}_3\text{Ti} + [111]\text{AlTi}$ (г). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в), 2 – для (г).

Таким образом, исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры систем «металлическая пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка» и «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка», выполненные методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, показали, что в результате термического воздействия, инициированного облучением образцов низкоэнергетическим импульсным электронным пучком, в поверхностном слое керамики толщиной порядка 10 мкм формируется многоэлементная многофазная структура. В системе «металлическая пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка» методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выявлены включения TiB₂, относительное содержание которых достигает 21,6 масс. %. В системе «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B₄C керамика) подложка» методами рентгеноструктурного анализа выявлены включения TiB₂, TiC, AlTi; суммарное содержание данных фаз 9,5 масс. %. Дополнительно в данной системе методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выявлены рефлексы фаз AlTi₃, AlTi, Al₃Ti, TiB, AlB₁₂. Включения новых фаз располагаются преимущественно вдоль границ кристаллитов B₄C. Размеры частиц не превышают 100 нм.

3.5. Механические испытания

Определение твердости образцов керамики карбида бора осуществляли на приборе DУН-211S (Shimadzu, Япония) при нагрузке на индентор 1 Н. Определение средней величины твердости осуществляли путем усреднения по 10 результатам измерений. Выполненные испытания показали, что средняя величина твердости керамики в исходном состоянии составляет 16,4 ГПа и изменяется в пределах от 5,4 ГПа до 44,1 ГПа. Средняя величина твердости системы «металлическая пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком, составляет 20 ГПа и изменяется в пределах

от 10,6 ГПа до 26,5 ГПа. Средняя величина твердости системы «двойная металлическая пленка (Ti+Al) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком, составляет 6,1 ГПа и изменяется в пределах от 5,6 ГПа до 6,8 ГПа. Отчетливо видно, что исследуемые образцы характеризуются определенным уровнем неоднородности материала по твердости. Оценим данную характеристику материала, используя коэффициент вариации δ , рассчитываемый исходя из следующего соотношения

$$\delta = (HV_1 - HV_2) / HV_3,$$

где HV_1 – максимальное значение микротвердости; HV_2 – минимальное значение микротвердости; HV_3 – среднее значение микротвердости. Выполненные оценки показывают, что максимальный разброс материала по величине твердости выявляется при тестировании керамики карбида бора в исходном состоянии ($\delta = 2,36$). Облучение импульсным электронным пучком системы «металлическая пленка (Ti) / (B₄C керамика) подложка» сопровождается формированием поверхностного слоя, коэффициент вариации которого $\delta = 0,8$. Облучение импульсным электронным пучком системы «двойная металлическая пленка (Ti+Al) / (B₄C керамика) подложка» сопровождается формированием поверхностного слоя, коэффициент вариации которого $\delta = 0,2$.

Таким образом, модифицируя поверхностный слой керамики карбида бора путем облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком, можно многократно повысить уровень однородности материала с позиции величины микротвердости.

Не менее важной (по сравнению с микротвердостью) характеристикой механических свойств керамики является ее трещиностойкость. В настоящей работе испытания на трещиностойкость осуществляли путем многократного (10 раз) вдавливания пирамидки микротвердомера (нагрузка на индентор 1 Н) в одну и ту же точку на поверхности образца, т.е. осуществляли циклическое механическое нагружение. Испытания проводили в трех участках на поверхности образца, выбранных произвольным образом. Усредненные

результаты испытаний на трещиностойкость материала приведены на рис. 44. Результаты, представленные на рис. 44, свидетельствуют о том, что модифицирование поверхностного слоя керамики путем облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком приводит к существенному увеличению трещиностойкости материала. Отчетливо видно, что твердость не модифицированной керамики резко снижается уже после второго укола пирамидки, что, очевидно, свидетельствует о хрупком разрушении данного участка материала. Модифицирование керамики путем облучения системы «двойная металлическая пленка (Ti+Al) / (B₄C керамика) подложка» импульсным электронным пучком приводит к формированию поверхностного слоя, микротвердость которого практически не изменяется после 10 циклов нагружения. Очевидно, что это свидетельствует о высоком уровне трещиностойкости сформированного поверхностного слоя керамики.

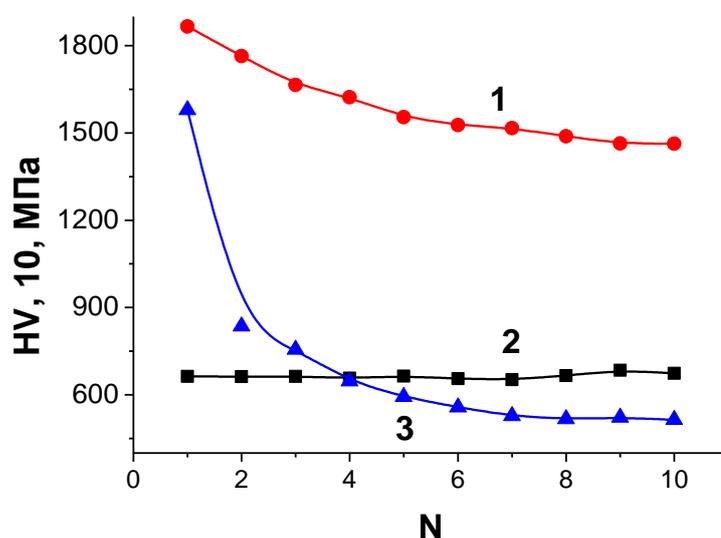


Рисунок 44. Циклические испытания на трещиностойкость; 1 - «Ti / B₄C керамика»; 2 - «Al+Ti / B₄C керамика»; 3 – керамика в исходном состоянии.

Таким образом, результаты, представленные на рис. 44, свидетельствуют о том, что, модифицируя поверхностный слой керамики карбида бора путем облучения системы «металлическая пленка / (карбид бора) подложка»

импульсным электронным пучком, можно многократно повысить уровень трещиностойкости материала.

Заключение

В результате работы над магистерской диссертацией были решены следующие задачи и получены следующие основные результаты:

1. Принято участие в структурно-фазовой аттестации частиц исходного порошка керамики карбида бора.

2. Принято участие в изготовлении образцов керамики на основе порошка карбида бора B_4C .

3. Принято участие в напылении на поверхность керамики пленок титана и пленок Al/Ti .

4. Принято участие в структурно-фазовой аттестации систем «пленка/подложка».

5. Принято участие в облучении интенсивным импульсным электронным пучком образцов керамики с напыленными металлическими пленками.

6. Принято участие в структурно-фазовой аттестации систем «пленка/подложка», облученных интенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что в результате облучения в поверхностном слое керамики толщиной порядка 10 мкм формируется многоэлементная многофазная структура. В системе «металлическая пленка (Ti) / (B_4C керамика) подложка» выявлены включения TiB_2 , относительное содержание которых достигает 21,6 масс. %. В системе «двойная металлическая пленка (Ti/Al) / (B_4C керамика) подложка» выявлены включения TiB_2 , TiC , $AlTi$; суммарное содержание данных фаз 9,5 масс. %. Включения новых фаз располагаются преимущественно вдоль границ кристаллитов B_4C . Размеры частиц не превышают 100 нм.

7. Определена микротвердость систем «пленка/подложка», облученных интенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что средняя величина твердости керамики в исходном состоянии составляет 16,4 ГПа; системы «металлическая пленка (Ti) / (B_4C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком, составляет 20 ГПа; средняя

величина твердости системы «двойная металлическая пленка (Ti+Al) / (B₄C керамика) подложка», облученной импульсным электронным пучком, составляет 6,1 ГПа.

8. Осуществлены испытания на трещиностойкость керамики B₄C и системы «пленка/подложка», облученной импульсным электронным пучком. Установлено, что модифицирование поверхностного слоя керамики карбида бора путем облучения системы «металлическая пленка / (карбид бора) подложка» импульсным электронным пучком позволяет существенно повысить уровень трещиностойкости материала.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Устюжанину Семёну Вадимовичу

Школа	ИШНПТ	Отделение Школа	ОМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Материаловедение и технология материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИР	
2. Матрица SWOT	
3. Диаграмма Ганта	
4. Бюджет НИ	
5. Основные показатели эффективности НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н доцент		08.02.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Устюжанин Семён Вадимович		08.02.21

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Устюжанин Семён Вадимович

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Тема ВКР:

Влияние воздействия сильноточного импульсного пучка электронов на прочностные свойства и структуру керамических материалов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</i>	<i>Объект исследования – поверхностный слой карбида бора после обработки ионно-плазменным пучком. Область применения – авиакосмическая отрасль, детали металлургической и химической аппаратуры.</i>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</i>	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.0.003-2015 – ПНД Ф 12.13.1-03 – МР 1.2.0018-11 – ГОСТ 12.1.004-91 – ГОСТ 12.1.007-76 – Федеральный закон 96-ФЗ – ГОСТ 12.1.005-88 – ГОСТ 12.4.034-2017 – ГОСТ Р 56748.1-2015 – СанПиН 1.2.3685-21 – МР 1.2.0024— 11 – МР 1.2.0037—11 – ГОСТ 17.1.3.06–82 – ГОСТ 17.1.3.13–86 – ГН 2.1.5.2280-07 – ГН 2.1.7.2041-06 – ПОТ Р М 005-97 – ГОСТ Р 50014.7 – Трудовой кодекс РФ
<i>2. Производственная безопасность: – анализ выявленных вредных и опасных факторов – обоснование мероприятий по снижению воздействия</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Вредные факторы на рабочем месте: недостаточная освещенность, высокий уровень шума и вибрации, неблагоприятное состояние микроклимата, воздействие вредных химических веществ, широкополосные магнитные поля, создаваемые ПЭВМ; влияние психофизиологических факторов: монотонность труда, физические и эмоциональные перегрузки, умственное перенапряжение. В качестве опасных факторов на рабочем месте рассмотрены: электробезопасность и пожаровзрывобезопасность, химические и термические ожоги, отравление.

	<p>– На работу в химико-аналитические лаборатории принимаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование для решения вопроса о возможности работы в лаборатории.</p> <p>– Прохождение инструктажа обязательно для всех принимаемых на работу.</p> <p>– При работе в химической лаборатории необходимо надевать халат из хлопчатобумажной ткани, для защиты рук резиновые перчатки, для защиты органов дыхания следует применять респираторы или противогазы.</p> <p>– Работа с химическими веществами должна максимально проводиться под вытяжным шкафом с включенной приточно-вытяжной вентиляцией, (согласно методическим рекомендациям ПНД Ф 12.13.1-03)</p>
3. Экологическая безопасность:	<p><i>Рассмотреть:</i></p> <p>– необходимость применения санитарно-защитной зоны вследствие выбросов вредных веществ, отходов, облучения;</p> <p>– выбросы вредных веществ в атмосферу: наночастицы оксида цинка;</p> <p>– отходы химических веществ утилизировать следующим образом: кислоты нейтрализуют сливают в канализацию, органические вещества собирают и сдают на утилизацию, наноматериалы собирают фильтрацией;</p> <p>– утилизация ТБО, люминесцентных ламп.</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p>– При работе в лаборатории наиболее вероятными ЧС являются пожары. Для минимизации риска возникновения пожара следует соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием. Для предотвращения возгорания предусмотрены следующие средства (согласно требованиям противопожарной безопасности, СНиП 21-01-97*): огнетушитель ручной углекислотный ОУ-5, контейнер с песком (в коридоре). Помимо этого помещение оборудовано системой противопожарной сигнализации.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Устюжанин Семён Вадимович		

ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В настоящем разделе магистерской диссертации проведен анализ рабочей среды, оценка рисков и факторов безопасности при выполнении научно-исследовательских работ по заданной теме.

В связи со спецификой работы магистрант не участвовал в получении исследуемых образцов, а также в проводимых тестах. Работа студента заключалась в обработке и анализе полученных данных, и последующей оценке полученных результатов.

В результате работа студента заключается в обработке данных на персональном компьютере.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [23].

Правила по охране труда и техники безопасности [23] вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов (таблица 28), которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Таблица 28 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Превышение уровня шума		+	+	ГОСТ Р 54578-2011 ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ СанПиН 1.2.3685-21
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		+		
Повышенная пульсация светового потока		+		
Повышенная запыленность воздуха рабочей зоны.	+	+	+	

Последствиями нарушений санитарных норм работы за ПК могут стать нарушения сна, повышенная утомляемость, депрессия и стресс, понижение уровня производительности труда. В рамках исследования работа расчетные работы и обработка экспериментальных результатов проводилась с использованием ПЭВМ.

Регулирование трудовой деятельности за компьютером осуществляется посредством следующих документов:

- ТК РФ;
- СанПин 2.2.2. / 2.4. 1340-03.

Вредные факторы при работе с ПК:

- электромагнитное воздействие;
- воздействие статического электричества;
- низкая степень ионизации воздуха;
- длительное сидячее положение тела;
- высокие нагрузки на органы зрения.

На человека, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервнопсихические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.3 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

5.3.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается

соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

5.3.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 1.

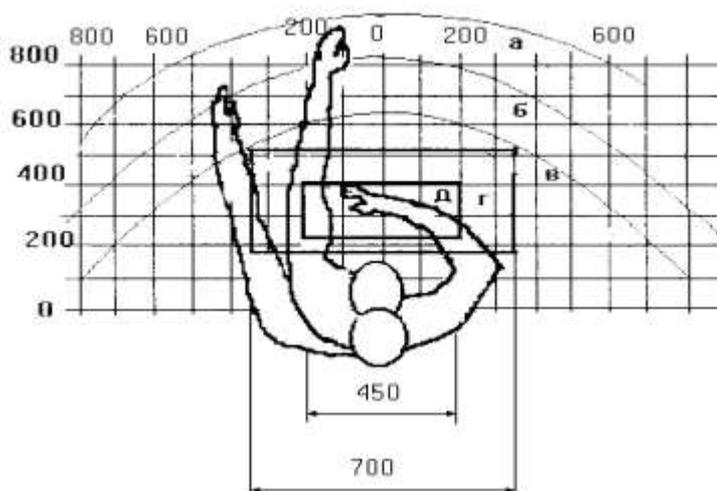


Рисунок 45– Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони в (слева) литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

1. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм.

2. Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

3. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали; в левом и правом направлениях.

4. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

Метеорологические условия (микроклимат), определяющие следующие параметры: температура воздуха в помещении; относительная влажность воздуха согласно СанПиН. Так как эти параметры напрямую зависят от габаритных размеров помещения, то сначала проведем анализ рабочего места, где проводилась разработка.

Рабочее место находится в помещении. Размеры которого характеризуется следующими габаритами: длина помещения – 8 м; ширина помещения – 5 м; высота – 3 м.

Следовательно, площадь лаборатории составляет 40 м², а объем – 120 м³. В лаборатории находится 2 установки, следовательно, работающих в помещении в основном 2 человека. Исходя из этого, на каждого работающего приходится площадь в 20 м² и объем 60 м³.

Освещенность. Освещение лаборатории происходит как естественным, так и искусственным светом. Естественный свет попадает в помещение через оконные проемы, которых в лаборатории 2. Площадь проемов 2,5 м². Оконные проемы в лаборатории оборудованы регулируемыми устройствами жалюзи.

Искусственное освещение происходит с помощью светильников типа ОДР, каждый светильник имеет по 4 лампы типа ЛБ-20. Светильники расположены равномерно по всей лаборатории в три ряда по четыре светильника в каждом ряду, создавая равномерное освещение рабочих мест.

$$(N = EN * S * K * Z) / (n * Fл * \eta) \quad (1)$$

где E_n нормированное значение освещенности, лк;

S освещаемая площадь помещения, м²;

K коэффициент запаса;

Z коэффициент неравномерности распределения светового потока по освещаемой поверхности;

n коэффициент использования светового потока в долях единицы и число ламп в светильнике.

$F_{л}$ световой поток лампы в светильнике

Для данного помещения, характеризующегося высокой степенью зрительной работы, средней характеристикой фона и малым контрастом различения объектов с фоном нормированное значение освещенности $E_n = 300$ лк.

$$S = 8 \cdot 5 = 24 \text{ м}^2 \quad (2)$$

Коэффициент запаса K учитывает снижение освещенности в процессе эксплуатации осветительных установок за счет загрязнения светильников, старения ламп и т.п. и для данного помещения $K = 1,5$.

Коэффициент Z рекомендуется принимать при освещении люминесцентными лампами 1,1. Число ламп в светильнике $n = 4$. Для данного типа светильников световой поток лампы $F_{л} = 1200$ лм.

Коэффициент использования светового потока η зависит от КПД светильника, формы кривой силы света, геометрических размеров помещения, отражающих способностей поверхностей.

В зависимости от коэффициентов отражения потолка r_p , стен r_c и индекс-сапомещения i находят η .

Для данного помещения:

$$r_p = 50\%$$

$$r_c = 30\%$$

Индекс помещения определяется исходя из его размеров:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (3)$$

где А и В ширина и длина помещения, м; h расчетная высота подвеса светильника, м

$$\frac{i = 6 \cdot 4}{3 \cdot (6 + 4)} = 0,8 \quad (4)$$

Следовательно, на основании этого находим $\eta = 0,35$. Подставив в формулу, получим:

$$\frac{N = 300 \cdot 40 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 1200 \cdot 0,35} = 12 \quad (5)$$

Определим число светильников в одном ряду:

$$N_p = \frac{N}{C}, \quad (6)$$

где С число рядов светильников в помещении.

$$N_p = \frac{300 \cdot 40 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 1200 \cdot 0,35} = 12 \quad (7)$$

Длина светильников в одном ряду

$$L = N \cdot l, \quad (8)$$

где l длина выбранного типа светильника, м.

$$L = 3 \cdot 0,0604 = 0,18 \text{ м} \quad (9)$$

К установке принимается три ряда светильников, с лампами ЛБ мощностью 20Вт, по четыре светильника в каждом ряду.

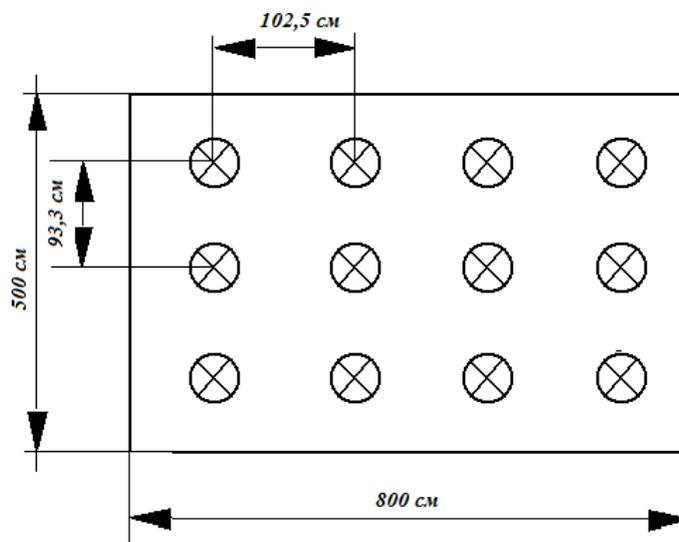


Рисунок 46 – Схема размещения светильников ЛБ-20

Благодаря правильной организации рабочего места можно значительно уменьшить напряженность в работе, неблагоприятные нагрузки на организм и, следовательно, повысить производительность труда.

Согласно требованиям, к производственным помещениям [СанПиН 2.2.4.548-96] объем производственного помещения на одного работающего

должен составлять не менее 20 м³, а площадь не менее 6 м². Отсюда можно сделать вывод, что размеры помещения соответствуют требованиям.

Проведя анализ габаритных размеров лаборатории, рассмотрим микроклимат в этом помещении. В помещении осуществляется только естественная вентиляция посредством наличия легко открываемых оконных проемов (форточек), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является общеобменной. Основной ее недостаток заключается в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания. Согласно [СанПиН 2.2.2.542-96] объем воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40 м³. В нашем случае объем воздуха на одного человека составляет 40 м³, из этого следует, что дополнительной вентиляции не требуется.

Установка, стоящая в лаборатории, требуют поддержания температуры и влажности воздуха в определенных пределах: от 22 до 25°С при влажности 60%, такой микроклимат благоприятен и для человека.

5.4 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда — это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с и приведены в таблице 29.

Таблица 29 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, ° С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция (ГОСТ 12.4.113-82).

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ (ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ).

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение экранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. По ГОСТ 12.0.003-86 недостаточная освещённость рабочей зоны является вредным производственным фактором, который может вызвать ослеплённость или привести к быстрому утомлению и снижению работоспособности.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 норма освещённости для научно-технических лабораторий для естественного бокового освещения $KEO = 1,2 \%$, для совмещенного освещения $KEO = 2,1 \%$. Для искусственного освещения при общем освещении норма 400 лк, при коэффициенте пульсации не более 10 %.

5.5 Экологическая безопасность

Защита окружающей среды — это комплексная проблема, требующая усилий всего человечества. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это потребует решения целого комплекса сложных технологических, конструкторских и организационных задач, основанных на

использовании новейших научно-технических достижений.

Предприятия цветной металлургии являются источниками выбросов различных загрязняющих веществ в окружающую среду. Неблагоприятная экологическая ситуация усугубляется применением устаревших технологий и неэффективного очистного оборудования на многих заводах отрасли. Существующая технология производства цветных металлов связана с образованием значительных объемов отходящих газов, содержащих, главным образом, диоксид серы (более 80% суммарных выбросов). На выбросы оксида углерода и твердых веществ приходится 8-10%. С целью снижения воздействия выбросов диоксида серы на атмосферный воздух на предприятиях созданы мощности по выпуску серы и серной кислоты.

Кроме того, сам титан способен оказывать токсическое воздействие на растения.

Растения. Высокие уровни содержания титана вредны для растений. Так, подавление интенсивности фотосинтеза подсолнечника на 50 % происходило при накоплении титана в листьях растений до 63 мг/кг сухой массы.

С увеличением количества установок, внедряемых в производственную сферу, увеличится и объем потребляемой ими электроэнергии, что влечет за собой увеличение мощностей электростанций и их количества. И то, и другое не обходится без нарушения экологической обстановки.

Рост энергопотребления приводит к таким экологическим нарушениям, как: загрязнение воздушного бассейна вредными и ядовитыми веществами; загрязнение водного бассейна Земли; опасность аварий в ядерных реакторах, проблема обезвреживания и утилизации ядерных отходов; изменение ландшафта Земли.

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением. В современных установках используются рабочие камеры все больших размеров, что позволит обрабатывать за один раз большее количество образцов, а, следовательно, и рабочее время установки. Стоит также

отметить, что для снижения вреда, наносимого окружающей среде при производстве электроэнергии, необходимо искать принципиально новые виды производства электроэнергии.

Отходы от формирования заготовок представляют собой незагрязненную титановую стружку и окалины, имеющие 5 класс опасности. Стружки и окалины могут быть использованы в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, влияя на основные характеристики и свойства конечного СВС продукта на основе титана.

5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При эксплуатации установке «СОЛЮ» ввиду ее работы от источника электрического тока и больших температур внутри рабочей зоны может возникнуть такая чрезвычайная ситуация как пожар, вследствие короткого замыкания или нарушения целостности рабочей камеры установки. Пожарная профилактика основывается на исключении условий, необходимых для горения, и использовании принципов обеспечения безопасности. При обеспечении пожарной безопасности решаются три задачи: предотвращение пожаров и загорания, защита людей и материальных ценностей, тушение пожаров. Пожарная безопасность обеспечивается предотвращением пожаров и пожарной защитой. Предотвращение пожара достигается исключением образования горючей среды и источников зажигания, а также поддержанием параметров среды в пределах, исключающих горение.

Предотвращение образования источников зажигания достигается следующими мероприятиями: соответствующим исполнением, применением и режимом эксплуатации машин и механизмов, устройством молниезащиты зданий и сооружений, ликвидацией условий для самовозгорания; регламентацией допустимой температуры и др.

Для устранения возможности пожара в помещении необходимо

соблюдать противопожарные меры:

- 1) Ограничение количества горючих веществ.
- 2) Максимально возможное применение негорючих веществ.
- 3) Устранение возможных источников возгорания (электрических искр, нагреваоболочек оборудования).
- 4) Применение средств пожаротушения.
- 5) Использование пожарной сигнализации.
- 6) Содержание электрооборудования в исправном состоянии.
- 7) Использование плавких предохранителей и автоматических выключателей в аппаратуре. По окончании работ все установки обесточиваются.
- 8) Для электропаяльников использовать подставки из негорючего материала.
- 9) В помещении предусматриваются средства пожаротушения (огнетушитель типа ОУ-2, пожарный инструмент, песок).
- 10) Курение в только отведенных для этого местах.
- 11) Содержать пути и проходы эвакуации людей в свободном состоянии.
- 12) Содержать средства пожаротушения в исправном состоянии.
- 13) Проводить раз в год инструктаж по пожарной безопасности.
- 14) Назначать ответственного за пожарную безопасность помещения.

Пожарная безопасность лабораторного помещения Института Сильноточной Электроники СО РАН, и лаборатории, в частности, обеспечивается с помощью мер предотвращения пожара и системы пожарной защиты, таких как:

- 1) регулярно проводится инструктаж сотрудников и студентов,
- 2) разработан план безопасной эвакуации людей, приведенный,
- 3) существует автоматическая пожарная сигнализация и телефонная связь с пожарной охраной,
- 4) на каждом этаже предусмотрены огнетушители типа ОУ-2 и ящики

с песком. Пожар может возникнуть по причинам:

Причинами возникновения пожара могут быть:

1. Нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
2. Курение в неустановленных местах;
3. Перегрузка электрических сетей;
4. Нарушение правил пожарной безопасности;
5. Неправильное хранение возгорающихся веществ.

Используемое помещение относится к категории Б по пожарной и взрывопожарной опасности, так в данном помещении расположены горючие легковоспламеняемые материалы, также баллоны с газами. Помещение, в котором находится установка, оснащено аварийными выходами, обеспечено средствами пожаротушения, сигнализацией оповещения пожара. План эвакуации представлен на рисунке 47.

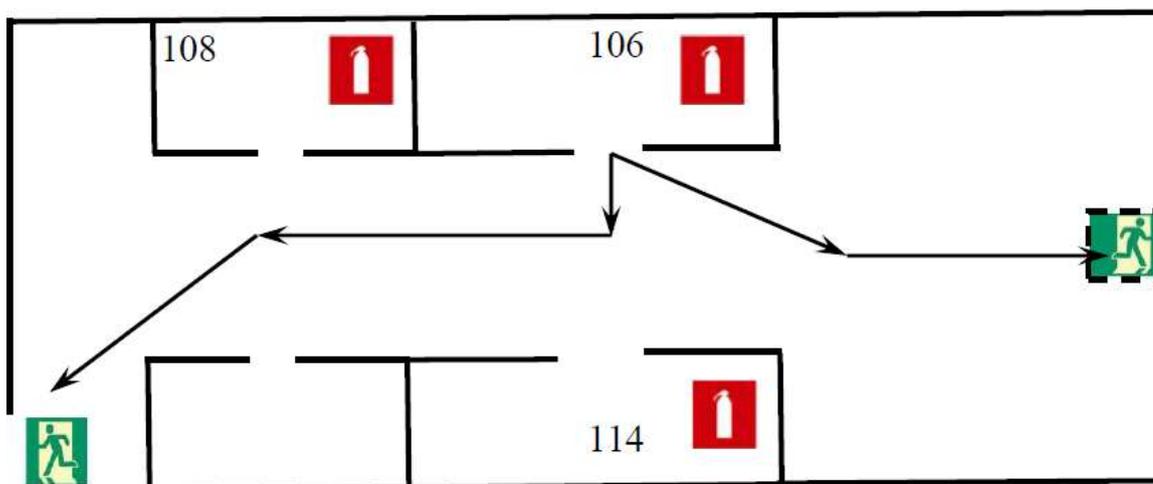


Рисунок 47 – План эвакуации рабочих помещений

Работники допускаются к работе только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, во всех помещениях вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации.

В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)-АВСЕ02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт).

При работе на установке используются баллоны с аргоном и азотом.

Эксплуатация баллонов связана с рядом опасных факторов.

Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов: баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких-либо предметов.

1. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении, находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0.1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей.

2. Выпуск газов из баллона производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет.

Вывод

В главе рассмотрены основные требования к безопасности работы персонала и по итогам анализа требований к безопасности работы персонала, который допускается к работе только после прохождения инструктажа о мерах безопасности, можно сделать вывод, что рабочее место по безопасности соответствует нормативно-технической документации. И все работы произведённые для данного исследования не несут большого вреда окружающей среде.

Список используемых источников

1. Кислый П.С., Кузнецова М.А. Карбид бора. – Киев: Наукова думка, 1988. – 216 с.
2. Иванов В.В., Кайгородов А.С., Хрустов В.Р. // Российские нанотехнологии. - 2006. - № 1–2.
3. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Известия ВУЗов. Физика. - 2008. - №5. - С. 60-70.
4. Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. – Новосибирск: СО РАН: Наука, 2019. – 348 с.
5. Шевченко В.Я. Введение в техническую керамику. – М.: Наука, 1993.– 112 с.
6. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. – М.: Наука, 1993. – 187 с. 1.
7. Watari K. // J. Ceram. Soc. Jpn. 2001. V 109. P. S7, Jang B.K., Sakka Y. // J. Alloys Compounds. 2008. V. 463. P. 493, Schwetz K.A. Handbook of Ceramic Hard Materials Riedel R. / Ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2000. P. 683.
8. Актуальные проблемы порошковой металлургии. / Под ред. Романа О.В., Аруначалама В.С. – М.: Металлургия, 1990 – 231с.
9. Андриевский Р.А. / Порошковое материаловедение // М.: Металлургия, 1991 – 207с.
10. Андриец С.П. / Исследование и применение керамических материалов из ультрадисперсных порошков, полученных плазмохимическим синтезом. Диссертационная работа // Томск, 2003.
11. Плетнев П.М., Федоров В.Е., Шахов С.А. / Современные функциональные керамические материалы // Современные керамические материалы и их применение: Труды научно-практической конференции / под редакцией д-ра тех. наук Солоненко О.П. – Новосибирск: Изд-во «Сибпринт», 2010 – 132с.

12. Анциферов В. Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. / Порошковая металлургия и напылённые покрытия // М.: Металлургия, 1987 – 792с.

13. Блинков И.В., Аникин В.Н., Елютин А.В., Мягков К.А. / Использование нанопорошков карбида бора для изготовления высокопрочной керамики.

Электронный ресурс:
http://rusnanotech09.rusnanoforum.ru/Public/LargeDocs/theses/rus/poster/08/Blinkov_I.pdf

14. Хасанов А.О. / Определение оптимальных режимов изготовления высокоплотных керамических изделий из порошка карбида бора методом спекания в искровом разряде // Выпускная квалификационная работа на соискание квалификации инженер-физик. – Томск 2010

15. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.А. Солоненко, А.П. Алхимов, В.В. Марусин [и др.]. – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 452 с.

16. Шевченко В.Я., Баринов С.М. / Техническая керамика - М.: Наука.– 93

17. A. Lipp, “Boron Carbide: Production, Properties, Application,” Tech. Rundsch., 58 1–47 (1966)

18. П. С. Кислый , М.А. Кузенков , Н.И. Боднарук и БЛ Грабчук , Карбид Бора (карбид бора) , стр. 216 . Наукова думка, Киев, 1988 .

19. N. Vast, J. Sjakste, and E. Betranhandy, “Boron Carbides from First Principles,” J. Phys. Conf. Ser., 176, 012002 (2009).

20. A. K. Suri, C. Subramanian, J. K. Sonber, and T. Murthy, “Synthesis and Consolidation of Boron Carbide: A Review,” Int. Mater. Rev., 55 [1] 4–40 (2010).

21. H. Lee and R. F. Speyer, “Hardness and Fracture Toughness of Pressureless-Sintered Boron Carbide (B₄C),” J. Am. Ceram. Soc., 85 [5] 1291–3 (2002)

22. Abraham T. Powder Market Update: Nanoceramic Applications Emerge // Amer. Ceram. Soc. Bull. 2004. V. 83. N. 8. P. 23.-7

23. Ceramic Matrix Composites: Microstructure, Properties and Applications / ed. by I. M. Low. Woodhead, 2006. 614 p-9
24. Житнюк С.В., Макаров Н.А, Гусева Т.В. Новые броневые керамические материалы на основе карбида кремния. // Стекло и керамика.2014.№1.С.7-10-11
25. Получение высокоплотных материалов из карбида кремния методом жидкофазного спекания в системе компонентов SiC-Al₂O₃-Y₂O₃-MgO // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. №4-5. С. 26-32- 18
26. Современное состояние и перспективы исследований в области электроимпульсного спекания порошков В.И. Мали, А.Г. Анисимов, А.А. Васильев, Д.В. Дудина и др. // IV Международная научно-практическая конференция «Современные керамические материалы. Свойства Технологии. Применение «КерамСиб-2012». Москва, 1-2 ноября 2012 г. С. 64-66.
27. Перевислов С.Л., Несмелое Д.Д., М.В. Томкович М.В // Получение материалов на основе SiC И Si₃N₄ методом высокоимпульсного плазменного спекания. Физика твёрдого тело Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013, № 2 (2), с. 107-114-54 .
28. Коваль, Н.Н. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов/ Н.Н. Коваль, Ю.Ф. Иванов– Томск: НТЛ. – 2016. – 312 с.
29. Клопотов А.А., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Поткаев А.И., Волокитин О.Г., Клопотов В.Д. Иницированное высокоэнергетическими методами формирование силицидов и карбидов в поверхностном слое титана//Известия высших учебных заведений. Физика. . – 2014. – Т.57. № 10/3. – С.
30. Гвоздев А.Е., Стариков, Н.Е., Технология конструкционных и эксплуатационных материалов: учебник / под ред. проф.А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 351 с.

31. Верещагин, В.И., Плетнёв, П.М. и др. Функциональная керамика. – Новосибирск: «Наука», 2004.
32. Плетнёв П.М., Симонова Г.В., Связь микроструктуры функциональной керамики с её физикотехническими свойствами / СГГА, СГУПС, Новосибирск 2009
33. Смирнов А.И., Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование // Наноиндустрия. 2012. № 6 (36). С. 28-35.
34. Филяков А.Д., Романов Д.А., выбор направлений исследований методов создания биоинертных сплавов с низким модулем упругости первого рода // 60 Международная научная конференция "Актуальные проблемы прочности". 2018. С. 14-16.
35. Кременчугский М.В.Сверхлегкие керамические бронезащитные материалы, получаемые с применением наноструктурных механоактивированных порошков карбида бора // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3 – № 3–4. – С. 141–146.
36. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. В426 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Креницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
37. Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М.: Высшая школа, 1999. – 318с.
38. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 №181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – С. 4
39. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды

обитания". – Собрание законодательства Российской Федерации, 2000, N 31, ст.3295; 2005, N 39, ст.3953

40. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.

41. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. –Собрание законодательства Российской Федерации, 2000, N 31, ст.3295; 2005, N 39, ст.3953).

42. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. ред. от 30.04.2021) // Собрание законодательства РФ. - 07.01.2002.

Приложение раздел на английском языке

Influence of the action of a high-current pulsed electron beam on the strength properties and structure of ceramic materials

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Устюжанин Семён Вадимович		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения иностранных языков	Демьяненко Н.В..			

1.1 Ceramics. Basic Concepts.

Ceramics are products made of polycrystalline materials, which are composed of compounds of non-metals with metals or with each other. They are obtained by molding and firing raw materials, which can be substances of natural origin (clays, silicates, quartz, etc.), as well as substances obtained artificially (pure oxides, carbides, nitrides, etc).

Currently, technical ceramics are used in various fields of technology, therefore, the following groups can be distinguished:

1. Structural ceramics,
2. Tool ceramics,
3. Electro-radio engineering ceramics.

Ceramics are divided into "traditional" and "new". Traditional ceramics are used in construction, metallurgy and chemical industries. "New" ceramics are used in mechanical engineering, in the electronics of the space and aviation industries as a structural and instrumental material.

Traditional and electrical ceramics are mainly oxide, while "new" ceramics can be oxide or oxide-free.

1.2. The structure of the ceramics.

The structure of most ceramic products ranges from relatively simple to very complex. The microstructure can be completely amorphous (glassy); completely crystalline; or a combination of crystalline and vitreous. In the latter case, the glassy phase usually surrounds small crystals, binding them together. The crystalline phase represents certain chemical compounds, interstitial phases, solid solutions. In traditional and technical ceramics, an amorphous phase is present, since these materials include SiO₂, a glass-forming oxide, the amount of which can reach 60%. In ceramics for instrumental and structural purposes, the presence of a glass phase is unacceptable, since this leads to a deterioration in the strength characteristics of products.

1.3. Methods for obtaining powders.

As a rule, in nature there are no powders that are immediately suitable for further use. The methods for producing powders are varied. All methods for producing nanopowders are divided into two groups: technologies based on chemical processes and technologies based on physical processes.

Physical methods can control the composition, size and shape of particles, but chemical methods are more versatile and more productive.

The method of obtaining nanomaterials plays a very important role in the formation of the structure and properties.

The processes formed by nano- or ultradispersed structures are crystallization, recrystallization, phase transformations, high mechanical loads, severe plastic deformation. The field of application of nanomaterials and the set of properties of the final product are determined by their method of preparation. The characteristics of the finished product (particle shape, particle size distribution, specific surface area, impurity content) can fluctuate over a very wide range, depending on the method of production.

For example, depending on the methods and conditions for obtaining a sample, nanopowders can be spherical, flaky, hexagonal, acicular, with an amorphous or fine-crystalline structure.

1.4. Technological preparation of powders

Preparation of powders for molding is an important process in the general production technology of materials. In the practice of powder metallurgy, metal powders are most often produced at specialized factories, so it is impossible to take into account all the characteristics that consumers require for ordered powders. Almost always there is a need for special operations for the preparation of powders to control certain chemical, physical and technological characteristics, ensuring the release of products with the desired final properties. Even in the production of powders directly by consumers themselves, some additional steps are required before

forming the powders. The main operations in preparing powders for shaping are annealing, sieving and mixing.

Annealing -it is a type of powder processing that is used to increase their plasticity, and, consequently, improve the properties of compaction, compressibility and formability. During annealing, distortions of the crystal lattice of the metal in the layers near the surface of the particles are eliminated, and the reduction of oxides that remained during production occurs. Heating is carried out in a protective environment (reducing, inert, or vacuum) at a temperature of the order of 0.4-0.6 of the melting temperature of the powder.

Most often, powders that are obtained by mechanical grinding of solid materials, electrolysis of aqueous solutions, or decomposition of carbonyls are subjected to annealing. They contain a large amount of oxides and dissolved gases.

Powders are classified according to the size of particles in fractions, which are then used either directly for molding, or to formulate a mixture that contains the required percentage of particles of the required size.

Powders are divided into fractions by particle size, usually in devices that are used in the chemical industry. Sieve classification of powders is most often used in the practice of powder metallurgy. During its implementation, various types of sieves are used, the main of which are placed in a casing with exhaust ventilation, mechanical sieves with electromagnetic or lever vibrators.

The classification of powders is also carried out by multi-deck mechanical vibrating sieves, in which the movement of mesh decks is from an electric motor through a V-belt transmission.

The classification of powders with a particle size of less than 40-50 microns is carried out using air separators, which ensure the settling of solid particles from the carrier gas stream under the action of gravity.

The mixing process of metal powders refers to the preparation of a homogeneous mechanical mixture of powders of various chemical and (or) particle size distribution, as well as their mixture with non-metallic powders. This is one of

the important components in the manufacture of materials and products from powders.

The task of mixing is the transformation into a macro-homogeneous mixture of all particles of solid components. The speed and results of mixing largely depend on the shape and size of the particles, particle size distribution (total and each component separately), the number of mixed components and their ratio, the density of the components and their differences, the coefficient of friction between particles, the ability of particles to adhere and aggregate, the degree of change in particle size distribution during mixing.

The most common mechanical mixing of components in ball mills. The quality of the mixture depends on the speed of rotation of the drum, the ratio of the mass of the grinding bodies and charge, the size of the grinding bodies and the degree of filling the drum with them.

The powders are mixed with the highest intensity at the initial moment, the inhomogeneity of the mixture practically does not change at the end of the process. The total process time (i.e. the time it takes to obtain a homogeneous mixture) and the length of the initial mixing period depend on the physical properties of the powders. The closer the density values of the components, the finer their particles and the smaller the dielectric constant of the mixing medium (air, water, alcohol, gasoline, etc.), the less the duration depends on the properties.

The most common media when mixing powders:

- air or any other gas (inert),
- liquid (water, alcohol, gasoline, etc.).

In a liquid medium, wet mixing occurs much more intensively than in a gas medium. This can be explained by the fact that the liquid in the mixture helps to reduce the force of electrical attraction between the particles, and, consequently, to their better volumetric distribution. In addition, under the action of capillary forces in the fine slits of the particles, an increased pressure is created, which promotes the propagation of cracks or the separation of particles connected into aggregates and leads to regrinding of the components. When mixed in a liquid medium, the mobility

of the particles increases, which in turn contributes to more intensive mixing. On the other hand, when mixing in ball mills, the liquid prevents the dispersion of small particles of the charge throughout the entire volume of the mill, which also has a beneficial effect on the results of the process.

The mixing results are controlled either by the physical and technological properties of the charge (particle size distribution, bulk density, fluidity, compressibility, as well as physical and mechanical properties of sintered bodies), or by chemical analysis of samples. The first method quite fully characterizes the quality of the mixture, but is too cumbersome and lengthy, and the second method gives only an approximate estimate. In practice, a part of the technological characteristics of the mixture is usually monitored and chemical analysis of samples from it is carried out.

It is necessary to remember about the possibility of a kind of segregation, that is, stratification of components with different densities. Preparation of a powder mixture usually completes the cycle of preparing powders for molding. [fourteen].

1.5. Forming methods

Compacting is a technological process as a result of which a finished part is obtained from the powder. The process is usually carried out in two stages: forming and sintering. In a number of methods, these stages are combined into one. To obtain bulk nanomaterials from powders, molding at room temperature with subsequent sintering is mainly used [2].

In powder metallurgy, a variety of forming technologies are currently used. For pressing nanopowders, the most widespread technology is uniaxial pressing. It uses such methods as: static (pressing in molds or stamping), dynamic (magnetic pulse and explosive) and vibration (ultrasonic) pressing [2].

To obtain moldings with high density, pressing is used, with material compression conditions close to all-round. This technology was called isostatic pressing. There are several options for it: hydrostatic, gasostatic, quasi-hydrostatic.

1.6. Powder sintering methods

The sintering process of oxygen-free ceramics can be controlled by adjusting the fineness, morphology, and defectiveness of powders of non-metallic refractory compounds.

As is known, boron carbide is characterized by a low concentration and mobility of lattice defects, as well as inhibition of diffusion processes. These features are associated with great difficulties in obtaining polycrystalline sintered materials, since in the lattices of covalent crystals they are suppressed by diffusion-viscous flow processes responsible for mass transfer and compaction during solid-phase sintering. Therefore, in order to obtain oxygen-free ceramics, in contrast to traditional methods of obtaining heterogeneous ceramic materials on easily sintered oxide bonds, it was necessary to develop new sintering methods that would allow to control structure formation and obtain materials without pores or with a given pore structure with the required level of properties and performance characteristics. Such methods are based on both physical processes,

1.7. Applications for functional ceramics

Boron carbide has a unique combination of properties that make it the preferred material for a wide variety of engineering applications. Boron carbide is used in refractory materials because of its high melting point and thermal stability, it is used as abrasive powders and coatings because of its extreme abrasion resistance, it has good ballistic characteristics due to its high hardness and low density, it is used as an absorber of neutron radiation ... In addition, boron carbide is a high-temperature semiconductor that can potentially be used in new electronic devices.

The chemical application of boron carbide is determined by its use as a component of mixtures for diffusion boriding of steels, which results in an increase in the hardness and wear resistance of the steel surface with a significant increase in the service life of finished products.

Boron carbide is a thermodynamically stable compound and possesses wear resistance, which makes it possible to use it in chemical engineering as parts of various units that interact with aggressive and at the same time abrasive media.

1.8. Electron beam processing of materials.

The surface treatment of various metals and alloys with concentrated energy flows is increasingly used in surface engineering. The purpose of this treatment is to modify the structure and improve the operational properties of the working surface layer of machine parts and structures. Currently, electron beams are increasingly used in the field of surface modification of metal and cermet materials and products. As a result of the interaction of a pulsed electron beam with the surface of a metal material, melting and subsequent smoothing of the surface can occur, as well as structural modification of the surface layer to a depth of several micrometers to several tens of micrometers, which can lead to an increase in microhardness (due to refinement of the grain structure), corrosion resistance ,

The activation of solid-phase processes in inorganic materials is an urgent problem of modern physics. This issue is of particular importance in the development of technologies for the production of complex oxide ceramics, when there is practically no alternative to thermal methods of exposure. New possibilities for improving the quality of ceramic technologies can be provided by the use of electron accelerators. To date, Russia has developed and manufactured accelerators with electron energies from 0.01 to 1–2 meV, which simultaneously allow efficient heating of solids to the melting temperature and above and effectively affect their defective structure [2].

Along with a decrease in the surface roughness and a change in the chemical composition of the near-surface layer, surface texturing is observed in the form of directed recrystallization of the molten layer. Thus, it becomes possible to control the optical, mechanical and electrical properties of the surface due to structural

formations oriented in a certain way, and also to significantly change the catalytic and adsorption capacity of the surface.

The paper presents the results of studies aimed at solving an urgent scientific problem - improving the physical and mechanical properties of ceramics based on boron carbide by improving the methods of their surface treatment based on the concept of creating additional structural levels on the surface of the material, as a result of exposure to low-energy high-current pulsed electron beams ...

1.9. Classification of electron beams.

Analysis of domestic and foreign publications showed that when processing solid bodies with electron beams for the purpose of their modification, the following are used:

- low-energy (up to tens of keV) high-current electron beams with a current density of up to several kA / cm²;
- high-energy (several MeV) pulsed high-current electron beams with a pulse duration of 10⁻⁸-10⁻⁶ s and an energy flux density of up to hundreds of J / cm² per pulse;

Low-energy high-current pulsed electron beams, which make it possible to control in a wide range the energy of electrons, the depth of their penetration into the material, characteristics and dynamics of the temperature and stress fields, are promising. The volumetric nature of the energy release and the possibility of changing the pulse duration make the pulsed electron beam a universal source. Distinguish between high-energy and low-energy high-current electron beams (HSEB and LHEB, respectively). LSEBs have significant advantages over HSEBs, since they allow providing a high energy density of an electron beam (up to 35 J / cm²) at a low accelerating voltage and an electron energy not exceeding 20-30 keV, which greatly simplifies radiation protection. Therefore, studies of the modification and properties of materials treated with LSEB,

The electron beam has a high specific power (the ratio of the beam power to its cross-sectional area at the focus), due to which heating occurs very quickly and in a strictly defined place. The impact of high-energy electron beams leads to local high-speed heating of the sample and its melting. This type of beams (sharply focused electron beam) is used in electron beam cutting of metals and alloys, and has advantages over traditional cutting methods (mechanical, abrasive, oxygen-acetylene, electrical discharge, arc, etc.) in terms of cutting speed, cutting width, roughness of the cut surface, the depth of the heat-affected area.

Such influences lead, in particular, to the redistribution of alloy elements at a considerable depth and to anomalous mass transfer in the crystallization zone.

With the help of defocused low-energy high-current electron beams (LHEP), a modifying surface treatment is carried out.

During surface treatment with electron and ion beams, morphological changes and changes in its elemental composition take place [5].

1.10. Directions of material modification

The ultimate goal of the modification is to change the physical, physicomechanical and physicochemical properties of materials (products), improve the operational properties of products, including wear resistance, heat resistance, corrosion-fatigue strength, crack resistance, radiation resistance, reduction of friction losses, etc.

The following directions of modification are well known [3]:

- coating and film application;
- changing the topography (relief) of the surface;
- changing the structure of the near-surface layer at different depths;
- changes in the elemental composition and phase state of the layer;
- changes in structural defects near the surface.

Changes in structure and structural defects near-surface layer to different depths. It is carried out with the aim of significantly changing the properties of

products. The most effective way to change the structure of complex alloyed materials is heat treatment of the near-surface layer, including quenching and subsequent (if necessary) tempering. For hardening, it is necessary to quickly heat and cool the surface layer of the material. The most common technologies for changing the structure of the near-surface layer of materials:

- surface plastic deformation;
- surface technical treatment, including induction heating, ultra-fast heating with concentrated energy flows and rapid cooling, for example, due to the thermal conductivity of metals or additional heat removal;
- shock wave impact (for example, an explosion).

Changes in the elemental and phase composition of the near-surface layer. This is one of the most effective methods for modifying the phase state and, therefore, material properties.

For this, a wide range of traditional and promising technologies are used:

- thermochemical treatment;
- electrolytic saturation of the surface layer, including chromium plating, aluminizing, titanizing, oxidizing;
- mechanical alloying;
- liquid-phase mixing of atoms, pre-coated, when exposed to a concentrated flow of energy.

The most noticeable structural and phase changes include:

- an increase in the crystal lattice parameter;
- reversal of planes;
- dispersing the microstructure;
- the formation of amorphous and ultradispersed phases;
- accumulation of radiation defects;
- contamination of the material with impurities;
- dissolution and formation of radiation-stimulated and radiation-induced phases;
- stratification of solid solutions, ordering;

- mass transfer in the near-surface layer and in the volume;
- creation of supersaturated solid solutions;
- change in the magnetic state of alloys;
- the formation of layered structures;
- the formation of substructures.