

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки: *Материаловедение и технологии материалов*

Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование структурно-фазовых преобразований поверхностного слоя SiC-керамики, подвергнутой электронно-ионно-плазменной обработке

УДК 539.211-047.37:666.3-13:539.16.04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Б	Кузичкин Евгений Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ ТПУ	Иванов Ю.Ф.	д.ф.-м.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИБ ТПУ	Петухов О.Н.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОКид ИШХБТ ТПУ	Раденков Т. А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материалове- дение и технологии ма- териалов	Хасанов О.Л.	д.т.н, профессор		

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 образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: *Материаловедение и технологии материалов*

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ6Б	Кузичкин Евгений Евгеньевич

Тема работы:

Исследование структурно-фазовых преобразований поверхностного слоя SiC-керамики, подвергнутой электронно-ионно-плазменной обработке
--

Утверждена приказом директора ИШ НПТ	Приказ № 3075/с от 28.04.2018 г.
--------------------------------------	----------------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08. 06. 2018 г.
--	-----------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><small>(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.).</small></p>	<p>Объектами исследования в данной работе являлись: структура, фазовый состав и свойства керамики из карбида кремния, подвергнутой облучению интенсивным импульсным электронным пучком, а также система «пленка (Ti) / SiC-керамика подложка», сформированная комбинированным методом, сочетающим напыление тонкой (0,5 мкм) пленки титана и последующее облучение интенсивным импульсным электронным пучком.</p> <p>Цель дипломной работы - выявление закономерностей эволюции структурных и фазовых состояний в поверхностном слое в результате обработки интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком следующих материалов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Керамики из карбида кремния, полученной методом SPS; • Системы «пленка (Ti)/(SiC-керамика) подложка».
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><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>Введение</p> <p>1. Обзор литературы</p> <p>1.1 Классификация керамических материалов</p> <p>1.2 Структура и свойства керамических материалов</p> <p>1.2.1. Структура бескислородной керамики керамики</p> <p>1.2.2 Механические свойства</p> <p>1.2.3 Термомеханические свойства</p> <p>1.2.4 Химические и электрофизические свойства</p> <p>1.2.5. Области применения</p> <p>1.3. Получение бескислородных керамик</p> <p>1.3.1. Методы формования бескислородных керамик</p> <p>1.3.2. Методы спекания</p> <p>1.3.2.1 Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-метод)</p> <p>1.3.2.2 Реакционное спекание</p> <p>1.3.2.3 Спекание в разряде плазмы</p> <p>1.3.2.4 Spark Plasma Sintering (SPS – метод)</p> <p>1.4 Модификация поверхности керамики концентрированными потоками энергии</p> <p>1.4.1. Электронно-пучковая обработка</p> <p>1.4.2. Облучение мощными ионными пучками</p> <p>1.5.3. Облучение лазером</p> <p>1.4.4 Облучение керамики плазмой</p> <p>1.4.5 Ионная имплантация</p> <p>2. Объекты и методы исследования</p> <p>3. Результаты исследования и их обсуждение</p> <p>3.1 Анализ структуры и свойств поверхности SiC-керамики, подвергнутой модификации импульсным электронным пучком.</p> <p>3.2 Анализ структуры и свойств поверхности системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», подвергнутой модификации интенсивным импульсными электронным пучком (15 Дж/см², 200 мкс, 20 и 30 имп.)</p> <p>4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p> <p>5 Социальная ответственность</p> <p>Заключение</p> <p>Список публикаций</p> <p>Приложение</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Слайд-презентация</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	

<i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
<i>Финансовый менеджмент...</i>	<i>О. Н. Петухов, доцент отделения социально-гуманитарных наук, Национального исследовательского Томского политехнического университета</i>
<i>Социальная ответственность</i>	<i>Т. А. Раденков, ассистент отделения контроля и диагностики Национального исследовательского Томского политехнического университета</i>
<i>Раздел на иностранном языке</i>	<i>А. С. Парнюгин, ведущий тестолог отделения иностранных языков Национального исследовательского Томского политехнического университета</i>
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Разделы на русском языке:	Литературный обзор; материал, методы обработки и методы исследования; результаты исследований; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность.
Разделы на английском языке:	Литературный обзор

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ ТПУ	Иванов Ю.Ф.	д.ф.-м.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Б	Кузичкин Евгений Евгеньевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) 22.04.01 Материаловедение и технологии материа-
 лов
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Материаловедение
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2017/2018 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:	08.06.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.12.2017	Анализ литературы и составление литературного обзора	35
16.02.2018	Изготовление методом SPS керамических образцов из порошка карбида кремния	15
22.02.2018	Осаждение титановой пленки на подложку из карбидо-кремниевой керамики вакуумно-дуговым методом при испарении катода из технически чистого титана марки.	20
28.02.2018	Облучение интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛЮ» полученной керамики при различных плотностях энергии пучка.	20
07.03.2018	Облучение интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛЮ» системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» при различном количестве импульсов.	20
16.03.2016	Исследование полученных образцов (структура, фазовый состав поверхностного слоя керамики, морфология, дефектная субструктура, физико-механические характеристики) методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа.	10
16.05.2016	Систематизация и анализ результатов, полученных при исследовании структуры и фазового состава поверхностного слоя керамики из карбида кремния, при различных плотностях энергии пучка.	35
27.05.2018	Систематизация и анализ результатов, полученных при исследовании свойств поверхностного слоя системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» при различ-	35

	НОМ количестве импульсов.	
--	---------------------------	--

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. НИЦ ФМКМ ИШХБМТ ТПУ	Иванов Ю.Ф.	д.ф.-м.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материалове- дение и технологии ма- териалов	Хасанов О.Л.	д.т.н, профессор		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 127 с., 27 рис., 25 табл., 59 источников, 1 прил.

Ключевые слова: Карбидокремниевая керамика, поверхностный слой, титан, осаждение, электронный пучок, твердость.

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

В процессе выполнения работы проводилось облучение интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛЮ» керамики из карбида кремния, полученной методом SPS при различных плотностях энергии пучка электронов и системы «пленка (титан) / (SiC-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 структурным 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 кремния 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

Введение	13
1. Обзор литературы	15
1.1 Классификация керамических материалов	15
1.2 Структура и свойства керамических материалов	16
1.2.1. Структура бескислородной керамики	16
1.2.2 Механические свойства	17
1.2.3 Термомеханические свойства	18
1.2.4 Химические и электрофизические свойства	19
1.2.5. Области применения	20
1.3. Получение бескислородных керамик	21
1.3.1. Методы формования бескислородных керамик	21
1.3.2. Методы спекания	23
1.3.2.1 Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-метод)	23
1.3.2.2 Реакционное спекание	24
1.3.2.3 Спекание в разряде плазмы. Spark Plasma Sintering (SPS – метод)	25
1.4 Модификация поверхности керамики концентрированными потоками энергии	28
1.4.1. Электронно-пучковая обработка	28
1.4.2. Облучение мощными ионными пучками	31
1.4.3. Облучение лазером	32
1.4.4 Облучение керамики плазмой	33
1.4.5 Ионная имплантация	35
2. Объекты и методы исследования	37
3. Результаты исследования и их обсуждение	49
3.1 Анализ структуры и свойств поверхности SiC-керамики, подвергнутой модификации импульсным электронным пучком	49

3.2 Анализ структуры и свойств поверхности системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», подвергнутой модификации интенсивным импульсными электронным пучком	56
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	65
4.1 Оценка коммерческого потенциала исследования	66
4.2 Планирование работ по НИР	67
4.3 Составление сметы научного исследования	72
4.3.1 Амортизация	72
4.3.2 Электроэнергия	73
4.3.3 Полная заработная плата исполнителей	74
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	75
4.3.5 Накладные расходы	76
4.3.6 Формирование бюджета затрат научного исследования	76
4.4. Эффективность работы	77
4.4.1. Оценка научно-технического уровня НТИ	77
5 Социальная ответственность	81
Введение	84
5.1 Техногенная безопасность	85
5.2 Региональная безопасность	88
5.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности	89
5.4 Особенности законодательного регулирования проектных решений.	93
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	94
Заключение	98
Список публикаций	100
Список использованных источников	101
Приложение А	107

Введение

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

Самыми главными недостатками карбидокремниевой керамики являются ее хрупкость и, как следствие, низкая трещиностойкость, а также сложность обработки. К тому же, карбидокремниевая керамика непригодна для работ при циклических нагрузках, а также при механических или термических ударах. В то же время, имеет отличное сопротивление коррозии, низкую теплопроводность и высокую жаропрочность, что обеспечивает его успешное использование в качестве элементов тепловой защиты [3].

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 (пленка) / SiC (подложка)», подвергнутой облучению интенсивным импульсным электронным пучком.

В ИСЭ СО РАН разработаны и функционируют импульсная электронно-пучковая 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 электронно-

ионно-плазменной модификации по совокупности параметров являются уникальными не только в России, но и за рубежом [6].

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 (1) Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (МГУ, 9-13 апреля 2018); (2) пятом Всероссийском конкурсе научных докладов студентов «Функциональные материалы: разработка, исследование, применение» (ТПУ, 22-23 мая 2018) и (3) 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2018» (С-Петербург, 5-7 июня 2018 г.); направлены на 6th International Congress «Energy Fluxes and Radiation Effects» (EFRE 2018); September 16–22, 2018, Tomsk, Russia.

Результаты работы опубликованы в сборниках трудов конференций:

1. Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (МГУ, 9-13 апреля 2018)
2. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2018» (С-Петербург, 5-7 июня 2018 г.).

1 Обзор литературы

1.1 Классификация керамических материалов

В наиболее широком смысле керамика – изделия, полученные путем спекания порошков исходных веществ или материалов на их основе (глины, силикаты, кварц и т.д.), (чистые оксиды, карбиды, нитриды и др.) при температурах существенно ниже температуры плавления (размягчения, разложения или сублимации) этих веществ или материалов. Вследствие этого в керамике можно использовать широчайший набор композиционных материалов, составляющие которых могут существенно отличаться по своему составу и свойствам, а полученные из них изделия обладать не просто суммой свойств исходных материалов, а принципиально новыми свойствами. Эта особенность позволяет иметь широкие перспективы использования керамики во многих отраслях промышленности, например, в машиностроении, поскольку для ее создания используются вещества, имеющие наиболее высокие показатели прочности, упругости, химической стабильности, высокотемпературной прочности и температуры плавления [7, 8].

Керамические материалы по химическому составу разделяют на:

1. Оксидная керамика. Это материалы, состоящие из чистых оксидов (например, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , CaO , BeO , ThO_2 , TiO_2), оксидов редкоземельных металлов, их смесей ($\text{ZrO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ и др.), а также твердых растворов ($\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{--MgO}$ и др.).

2. Безоксидная керамика. Нитриды, карбиды, силициды, бориды, фосфиды (переходные металлы и неметаллы III–VI групп системы Менделеева).

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.

Керамику делят на «традиционную» и «новую». Традиционная керамика применяется в строительстве, металлургии и химической промышленности. «Новая» керамика используется в машиностроении, в электронике космической и авиационной промышленности в качестве конструкционного и инструментального материала. Традиционная и электротехническая керамика является в основном оксидной, а «новая» керамика может быть оксидной и безоксидной [9].

1.2 Структура и свойства керамических материалов

1.2.1 Структура бескислородной керамики

К тугоплавким бескислородным соединениям относятся соединения элементов с углеродом (MeC) – карбиды, с бором (MeB) – бориды, с азотом (MeN) – нитриды, с кремнием ($MeSi$) – силициды и с серой (MeS) – сульфиды. Эти соединения отличаются высокими огнеупорностью (2500...3500 °C), твердостью (иногда как у алмаза) и износостойкостью по отношению к агрессивным средам. Материалы обладают высокой хрупкостью. Сопротивление окислению при высоких температурах (окалиностойкость) карбидов и боридов составляет 900...1000 °C, несколько ниже оно у нитридов. Силициды могут выдерживать температуру 1300...1700 °C (на поверхности образуется пленка кремнезема) [10, 11].

Спеченный керамический материал обычно состоит из аморфной (стекловидной) фазы и кристаллической фазы. Кристаллическая фаза представляет собой определенные химические соединения, фазы внедрения, твердые растворы. Спеченная керамика содержит поры. Их разделяют на:

- открытые – поры, которые сообщаются с окружающей средой;
- закрытые – поры, которые не сообщаются с окружающей средой.

В некоторых керамических материалах пористость формируется целенаправленно, например, в керамических фильтрах. В других видах керамики, например, огнеупорной, допускается определенная пористость, не снижающая эксплуатационные свойства готовых изделий. В технологии керамики инструментального и конструкционного назначения пористость является отрицательным моментом, т.к. она определяет величины прочностных характеристик изделий.

Плотность и пористость керамики характеризуют показателями:

1. Истинная или теоретическая плотность, г/см^3 – плотность материала без пор;
2. Кажущаяся плотность – плотность материала с порами;
3. Относительная плотность – отношение кажущейся и истинной плотностей;
4. Истинная пористость $\Pi_{\text{и}}$, – сумма всех пор по объему к общему объему материала, выражающаяся в процентах или долях.
5. Кажущаяся или открытая пористость – объем открытых пор, заполняемых водой при кипячении, выраженный в процентах к общему объему материала [12].

1.2.2 Механические свойства

При комнатной температуре после небольшой упругой деформации керамика хрупко разрушается (в отличие от металлов, которые могут в значительной степени подвергаться пластической деформации) под действием механических напряжений. Прочностные свойства керамики характеризуются в том числе величинами предела прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$ и сжатии $\sigma_{\text{сж}}$.

Микроструктура керамики имеет значительное влияние на такие ее свойства как: размер зерен, пористость, содержание и состав стеклофазы. С

уменьшением размера зерна и увеличением содержания кристаллических фаз увеличивается и прочность материала.

Одной из основных характеристик прочности керамики является трещиностойкость – способность материал противостоять распространению трещин. Эта величина характеризуется критическим коэффициентом интенсивности напряжений K_{Ic} [МПа·м^{1/2}].

Третьей важной характеристикой, определяющей уровень механических свойств керамики, является твердость. При вдавливании алмазного индентора в поверхность керамики возникает пластическая деформация материала. Сопротивление материала этой деформации и есть твердость, которую в основном измеряют методом Виккерса (H_V).

Также механические свойства керамик можно оценить с помощью модуля упругости E (или модулем Юнга).

Модуль упругости определяется по формуле

$$\varepsilon = \sigma/E, \quad (1)$$

где ε – упругая деформация;

σ – нормальное напряжение [13].

1.2.3 Термомеханические свойства

Так как большинство керамических материалов эксплуатируются при высоких температурах, необходимо оценить термомеханические свойства деталей. Оценка свойств осуществляется с помощью следующих характеристик: прочность керамики при температурах ее службы, температура деформации под нагрузкой и ползучесть.

Также, как и прочность при обычной температуре, прочность керамики при эксплуатационных температурах, определяется пределом прочности при изгибе/сжатии. Во время нагружения при повышенных температурах (свыше 1000°С) керамический материал испытывает пластическую деформацию, в отличие от поведения керамики при комнатной температуре (20°С).

Термостойкость керамических материалов определяется такими параметрами как: теплоемкость, термическое расширение, теплопроводность, температуропроводность.

1.2.4 Химические и электрофизические свойства

К электрофизическим свойствам керамики относятся такие величины как: 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. Свободные электроны в керамических материалах практически отсутствуют.

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.

Распространенными химическими взаимодействиями керамики и других веществ являются:

1. Взаимодействие с кислотами и щелочами. Исследование коррозионной 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 углеводов и др. Стойкость керамики зависит от ее химической природы, а также от ее структуры.

Оксидные керамики не подвержены окислению. Бескислородная конструкционная керамика окисляется в случае ее нагрева на воздухе до высоких температур. Из-за высокой коррозионной стойкости керамических материалов очень трудно оценивать степень их коррозионного повреждения по изменению массы образцов, глубине проникновения коррозии, количеству очагов коррозии на единицу площади поверхности и т.п., как это делается для металлов. Окисление может не только ухудшать свойства керамики, но и повышать ее прочность, а, следовательно, увеличивать работоспособность керамического изделия. Поэтому оценить влияние коррозии на работоспособность керамики можно только по изменению ее механических характеристик.

1.2.5 Области применения

Наиболее широко керамические материалы применяют при изготовлении деталей двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей, режущего инструмента и др.

По ряду свойств: инертность в процессе резания (к большинству металлов), износостойкость, твердость (в том числе при нагреве), керамика на порядок превосходит материалы, применяемые традиционно для изготовления режущих инструментов – твердые сплавы и быстрорежущие стали. Эти преимущества режущей керамики обеспечивают высокую скорость механической обработки чугуна и стали.

Режущими керамическими пластинами оснащаются токарные резцы, фрезы, инструменты специального назначения и расточные головки.

Наиболее результативно керамика применяется для изготовления высокотемпературных газотурбинных и дизельных адиабатных поршневых двигателей (имеющих керамическую изоляцию).

При использовании керамики для изготовления двигателей из-за повышения рабочей температуры повышается их КПД, к тому же для керамических

двигателей затраты на систему охлаждения намного ниже (или вовсе отсутствуют), чем для обычных двигателей. К тому же повышение тактико-технических характеристик авиационных двигателей невозможно без применения керамических материалов.

Фирма «Isuzu» (Япония) разработала керамический бензиноводизельный двигатель, имеющий коэффициент полноты сгорания топлива на 50% выше и массу на 30% меньше чем обычные двигатели. Данный двигатель позволяет развить скорость до 150 км/ч.

Для изготовления контейнеров с радиоактивными отходами, бронекерамики для военной техники и тепловой защиты космических кораблей ракет используется керамика специального назначения. Также к этому виду керамики относится сверхпроводящая керамика.

Контейнеры для хранения радиоактивных отходов изготавливают из керамики на основе карбида оксида и бора путем смешивания с оксидом свинца или соединениями типа $2\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$. Такие спеченные керамические характеризуются высокой плотностью, низкой пористостью и сильной поглощающей способностью по отношению к нейтронам и γ -квантам.

Высокие твердость керамических материалов, а также температура плавления и модуль упругости определили их применение в качестве брони, защищающей даже от бронепрожигающих снарядов ввиду сохранения прочности при нагреве. Наиболее высокие защитные свойства имеют материалы на основе карбида бора, используемые при необходимости существенного снижения массы броневой защиты (защита кресел и автоматических систем управления вертолетов, экипажа и десанта). Керамика из диборида титана имеет наибольшую твердость и модуль упругости и применяется для защиты от тяжелых бронебойных и бронепрожигающих танковых снарядов.

Для защиты живой силы, сухопутной и морской военной техники используют керамику на основе оксида алюминия ввиду его низкой себестоимости.

Для увеличения отражательной способности, прочности и абляционных характеристик поверхности теплозащитных материалов их покрывают слоем эмали толщиной около 300 мкм, содержащей SiC или 94 % SiO₂ и 6 % B₂O₃ и спеченной при температуре 1470 К. Такие покрытия, используют в наиболее нагреваемых местах космических кораблей, баллистических ракет и гиперзвуковых самолетов. Они выдерживают до 500 десятиминутных нагревов в электродуговой плазме при температуре 1670 К.

1.3 Получение бескислородных керамик

1.3.1 Методы формования бескислородных керамик

Прессование порошковых материалов в закрытых жёстких пресс-формах – один из основных методов производства керамических изделий. Отличительной особенностью этого метода является полное совмещение процесса уплотнения, упрочнения и придания заготовкам формы окончательной формы путем эффективного применения больших при воздействии на формуемую систему [14-16].

Для ряда керамических производств весьма актуальны задачи дальнейшего расширения возможностей методов прессования порошковых материалов в закрытых жёстких пресс-формах с целью получения прессовок особо высокой плотности и прочности, позволяющих значительно повысить плотность готовых изделий или снизить усадку при спекании, продолжительность и температуру спекания [17].

Для решения этих задач идут исследования, разработки и внедрение в производство ряда перспективных способов прессования, которые подразделяются на следующие: холодное прессование в закрытых пресс-формах, одностороннее прессование, двухстороннее, ударное, взрывное, магнитно-импульсное, квазиизостатическое и ультразвуковое прессование, а также шликерное литье и др [18].

Метод горячего прессования (ГП) получают керамические изделия с малым перепадом плотности по объему. Этот метод активно используется для при

производстве конструкционной керамики на основе тугоплавких соединений, совмещая операции формования и спекания изделий в пресс-формах, что позволяет ощутимо снизить стоимость изделий. Результатом горячего прессования являются изделия, обладающие очень хорошими прочностными свойствами. Однако, этот метод отличается невысокой производительностью и для его реализации необходимо использование жаропрочных быстро изнашиваемых дорогостоящих пресс-форм. Следовательно, использование данного метода целесообразно только для некоторых типов технической керамики, производство которой другими методами технически невозможно [19].

1.3.2 Методы спекания

1.3.2.1 Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-метод)

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – один из наиболее результативных методов получения керамики, а также композитов на ее основе. Он имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными технологиями порошковой металлургии, такие как: секундная продолжительность синтеза, низкая энергозатратность, высокая чистота продукции простота технологического оборудования.

Отличительной чертой режима послыонного горения является самоподдерживающиеся быстрораспространяющаяся стабильная экзотермическая волновая химическая реакция, проходящая через гетерогенную смесь реагентов, что приводит к синтезу желаемых материалов. Температура такой волновой реакции, как правило, достигает 2000–4000 К.

При объемном горении, реакция происходит сразу по всему объему после равномерного нагрева образца. Этот способ иногда называют режимом теплового взрыва. Тем не менее, термин "взрыв", относится к быстрому повышению температуры, и не является процессом разрушения.

Высушенные порошки исходных реагентов перемешивают до достижения максимально высокой однородности, затем, полученную смесь загружают в реактор, который герметизируют и вакуумируют, после этого реактор заполняют инертным или химически активным газом, локальное инициирование реакции обычно проводят вольфрамовой проволокой [20].

1.3.2.2 Реакционное спекание

Реакционное спекание применяется, при обжиге керамики, например, на основе SiC, Si₃N₄ и некоторых других бескислородных соединений.

Специфика процесса реакционного спекания заключается в том, что для реализации этого метода необходим интенсивный массообмен между твердой и газовой фазами спекаемого изделия. Следовательно, чем плотнее и объемнее изделие, чем выше степень спекания и меньше пористость, тем труднее протекает этот процесс.

Уплотнение вещества при реакционном спекании, в отличие от других видов спекания, происходит не за счет пространственного перераспределения вещества, а за счет образования новой фазы в результате химической реакции между твердым веществом и пропитывающей его газовой (паровой) фазой другого вещества. Если в результате такой реакции образуются продукты, которые имеют большую массу и объем по сравнению с вступающим в реакцию твердым веществом, то они заполняют поры спекающегося тела и повышают его плотность [21-23].

Для получения так называемого "самосвязанного" карбида кремния методом реакционного спекания проводят спекание прессовок состава: SiC и C (в присутствии кремния). В результате спекания образуется вторичный SiC и его перекристаллизация через кремниевый расплав. Полученные в итоге беспористые материалы, содержат 5–15% свободного кремния, находящегося в SiC-матрице. Реакционным спеканием также получают карбидокремниевую керамику, сформированную смешиванием шихты на основе кремния и других веществ с расплавленным связующим (парафин). Из полученной шликерной мас-

сы под давлением отливают заготовку. Отлитую заготовку кладут в науглероживающую среду, в которой сначала производят извлечение легкоплавкого связующего, а затем насыщение заготовки углеродом при температуре 1100°C. Затем изделие спекается при температуре 1300°C. Образованные в результате спекания частицы SiC постепенно заполняют исходные поры. Данный вид спекания является экономичным благодаря снижению температуры с обычно применяемой 1600–2000°C до 1100-1300 °C

Метод реакционного спекания используется в производстве нагревательных элементов из карбида кремния, меняющих свое сопротивление под влиянием нагрева или охлаждения (термисторов). Черный карбид кремния имеет высокое сопротивление при комнатной температуре и отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Зеленый карбид кремния имеет низкое начальное сопротивление и слабоотрицательный температурный коэффициент, переходящий в положительный при температурах 500–800°C.

1.3.2.3 Спекание в разряде плазмы. Spark Plasma Sintering (SPS – метод)

Метод SPS-спекания объединяет достоинства прессования в закрытых пресс-формах и метода горячего прессования. При спекании в разряде плазмы смесь порошков компактируется с одновременным синтезом в SPS-установке в вакууме при действии импульсных электрических полей, нагревающих цилиндрическую графитовую пресс-форму импульсным током до 10-20 кА. Основное влияние на процесс спекания и свойства получаемых материалов оказывают скорость ввода электромагнитного поля в порошковый материал, пространственное распределение вводимой энергии в течение процесса спекания, характер и величина механического давления, создаваемого разрядом в процессе электроимпульсного спекания. Однако физические процессы в контактных зонах характеризуются высокой пространственной неоднородностью и нестационарностью во времени [24].

Спекание в разряде плазмы приводит к формированию наноразмерных кристаллов спекаемого порошка (в случае нанометрового размера зерен исходного порошка).

В работе [25] методом SPS получены материалы на основе карбида и нитрида кремния с высокими механическими свойствами: $p_{\text{отн}} \sim 98\%$; $\Pi \sim 2\%$; $K_{1C} \sim 5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $\sigma_{\text{изг}} = 450 \text{ МПа}$ (для материала на основе SiC); $\sigma_{\text{изг}} = 850 \text{ МПа}$ (для материала на основе Si₃N₄), а в работе [26] получена керамика из нитрида кремния этим же методом со следующими характеристиками: микротвёрдость достигала значений 15,72 ГПа, сопротивление изгибу 716,46 МПа и трещиностойкость 7,03 МПа·м^{1/2}.

Новыми направлением в повышении прочности и трещиностойкости неоксидных керамики, в том числе карбида бора, является использование добавок наноструктурных фракций этого порошка, а также применение новых инвестиционных технологий спекания, позволяющих значительно увеличить прочность и трещиностойкость благодаря сохранению тонкой микроструктуры наноразмерного масштаба [27].

СЭМ-анализ изображений поверхности сколов показал, что керамика В₄С_{mix}, изготовленная методом SPS в оптимальных режимах, позволяет получать плотные образцы с совершенной зёрненной структурой и прочными межзёренными границами, что подтверждается транскристаллитным характером разрушения.

В Томском Политехническом Университете на кафедре НМНТ методом SPS спекания на установке SPS 515S (SPS SYNTEX) были получены керамические образцы из карбида кремния и карбида бора [28].

Высокие значения микротвёрдости керамики В₄С_{mix} ($H_v=47,9 \text{ ГПа}$ и $H_v=42,19 \text{ ГПа}$) и высокая плотность (98% от теоретической) получены при режимах SPS –спекания $T_{\text{сп макс.}}$, $P_{\text{пр макс.}}$ и $T_{\text{сп.2}}$, $P_{\text{пр макс.}}$ соответственно. В таблице 1 представлены технологические режимы и механические свойства керамических образцов из карбида бора, полученные SPS-методом [29].

Таблица 1 – Технологические режимы и механические свойства образцов керамики V_4C_{mix}

$T_{сп}$	$P_{пр}$, МПа	H_V , ГПа	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	ρ_a , г/см ³	$\rho_{отн}$, %
$T_{сп.1}$	$P_{пр.1}$	22,5	9,2	2,17	86,0
	$P_{пр.2}$	23,7	7,6	2,24	88,7
	$P_{пр. макс}$	24,8	7,3	2,38	94,8
$T_{сп.2}$	$P_{пр.1}$	32,5	4,4	2,45	97,1
	$P_{пр.2}$	35,6	6,5	2,49	98,5
	$P_{пр. макс}$	42,2	9,5	2,48	98,3
$T_{сп. макс.}$	$P_{пр.1}$	38,1	5,6	2,45	97,2
	$P_{пр.2}$	41,4	9,9	2,46	97,6
	$P_{пр. макс}$	47,9	15,0	2,47	98,0

В этих образцах значение трещиностойкости составляло $K_{Ic} = 8,0$ МПа·м^{1/2}, что превышает значения $K_{Ic} = 3,5...4,0$ МПа·м^{1/2} в керамиках без добавок УДП, полученных методом горячего прессования [30, 31].

Выполненные исследования показывают, что температура и время SPS-спекания для получения высокоплотной керамики V_4C_{mix} в оптимальном режиме снижаются относительно этих величин при традиционном горячем прессовании (температура примерно на 200 °С, время спекания на 5...10 мин.). Полученные образцы характеризуются изотопной зеренной структурой и хорошо сформированными межзеренными границами, а введение нанодобавок в исходное сырье для SPS-синтеза приводит к увеличению плотности, вязкости разрушения и микротвердости керамики [32].

В таблице 2 представлены результаты измерений некоторых характеристик SiC-керамики, спеченной методом SPS с различным процентным содержанием нанопорошка SiC.

Таблица 2 – Механические характеристики SiC-керамики, полученной SPS-методом

Содержание нанопорошка SiC, %	ρ , %	HV, ГПа	K_{Ic} , Мпа*м ^{1/2}
0	97,8	27,8	5,4
1	98,3	30,41	5,2
5	98,7	25,22	7,1
10	98,7	29,88	5,2

Такая комбинация (SPS – синтез/введение нанодобавок) по характеристикам конечного материала на сегодняшний день, практически не имеет альтернатив.

1.4 Модификация поверхности керамики концентрированными потоками энергии

1.4.1. Электронно-пучковая обработка

Основными направлениями в повышении прочности и трещиностойкости бескислородных керамик, является использование добавок наноструктурных фракций порошка, а также применение новых технологий спекания. В работах [33-34] показано, что применение в качестве добавок нано- и субмикронных порошков в пределах (2-10) мас. % к промышленным порошкам микронных размеров способствует уплотнению шихты при компактировании и активирует процесс спекания, что приводит к увеличению плотности, трещиностойкости, микротвердости и изгибной прочности спеченной керамики.

Перспективным инструментом, позволяющим наноструктурировать поверхностные слои различных материалов, являются низкоэнергетические интенсивные электронные пучки субмиллисекундной длительности воздействия. Сверхвысокие скорости (до 10^9 К/с) нагрева до температуры плавления и последующего охлаждения тонкого поверхностного слоя материала (10^{-7} - 10^{-8} м) создают условия для образования в поверхностном слое аморфной, нано- и субмикроструктурной структуры [34].

В работе [35] выявляли зависимость изменения стойкости металлокерамического сплава (TiC-NiCr) от структурного состояния поверхностного слоя режущей пластины, изменяемого облучением импульсным электронным пучком облучения, в условиях резания конструкционной стали. В качестве образцов выступали металлокерамические режущие пластины (12x12x4 мм) из твердого сплава на основе карбида титана с никельхромовой связкой (50 об.% TiC - 50 об.% никельхромовой связки). Обработка передней поверхности экспериментальных образцов электронным пучком производилась на установке «СО-ЛО» при следующих режимах облучения образцов: плотность энергии в пучке 40 Дж/см², частота импульсов 15 с⁻¹, длительность импульсов облучения 100, 150, 200 мкс. Стойкостные испытания проводились при следующих условиях: постоянство скорости резания и необходимое количество повторений для исключения влияния качества исходного металлокерамического сплава. В качестве критерия износа выступала величина фаски износа по задней поверхности, равная 1 мм. По полученным результатам сделан вывод о возможности кратного увеличения стойкости экспериментальных образцов металлокерамических пластин. Стойкость пластин увеличивается при облучении при длительности импульса импульса 100 и 150 мкс и снижается при облучении с длительностью импульса 200 мкс. Доверительный интервал, полученных средних значений стойкости, составляет: t=100 мкс - 19%; t=150 мкс - 18%; t=200 мкс - 23%. Для исходных (необлученных) пластин среднее значение стойкости составило 2,58 мин. с доверительным интервалом 28%, увеличение стойкости в 4,36, 4,59 4,51 раз выявлено при длительности импульса облучения 100, 150, 200 мкс соответственно.

Объектом исследования в статье [36] являлась коррундо-циркониевая керамика состава 20Al₂O₃-80ZrO₂(Y) (в масс %) в виде частично стабилизированного сплава в форме таблеток диаметром 10 мм и толщиной 2,5 мм. Используемые технологические режимы позволили получить образцы с различной плотностью $\rho_{\text{экс1}}=5.2$ г/см³, $\rho_{\text{экс2}}=4.3$ г/см³). Облучение образцов проводилось в вакууме ($P=10^{-2}$ Па) на ускорителе SOLO (ИСЭ СО РАН) Обработка велась при

следующих параметрах импульсного пучка низкоэнергетических электронов: $E=20$ кэВ, плотность тока в импульсе – 7 А/см^2 , длительность импульса – 80 мкс, частота следования импульсов $f=0.3$ Гц. Плотность энергии в импульсе W_H составляла $11,2 \text{ Дж/см}^2$. Число импульсов $N=8$. Для уменьшения механических напряжений, которые являются причиной образования сетки трещин в керамике при ее обработке, образцы были предварительно прогреты электронным пучком с пониженной импульсной мощностью $W_H = 1.0 \text{ Дж/см}^2$, 400 импульсами, при частоте их следования $f=10$ Гц. Экспериментальные данные указывают на существенное уменьшение содержания корундовой фазы в приповерхностных слоях керамики, модифицированных электронным пучком приповерхностных слоев керамики. В связи с тем, что твердость корунда превышает твердость диоксида циркония, то уменьшение содержания корундовой фазы приводит к снижению твердости и модуля упругости.

Облучение слоя керамики из карбида бора (изготовленных методом SPS при давлении прессования 30 МПа и температуре $\sim 1950 \text{ }^\circ\text{C}$) низкоэнергетическим интенсивным электронным пучком (давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере $10\text{-}2 \text{ Па}$; параметры пучка электронов: энергия электронов $U = 15 \text{ кэВ}$, плотность энергии пучка электронов $(5\text{-}30) \text{ Дж/см}^2$ длительность импульса 100 мас. , частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$. Для предотвращения хрупкого разрушения керамики в процессе облучения, непосредственно перед облучением, проводили нагрев образца электронным пучком до -900К) приводит к увеличению трещиностойкости модифицированного слоя: (если твердость исходной керамики за 10 циклов нагружения снижалась от 43 ГПа до 17 ГПа , то после облучения импульсным электронным пучком после 10 циклов нагружения твердость керамики составила 27 ГПа), обусловленному формированием максимально плотного (беспористого) поверхностного слоя; образованием микродвойников в материале имеющих форму тонких пластинок и располагающихся в зерне пачками; формированием вдоль границ зерен и в их стыках протяженных прослоек, имеющих субмиро- нанокристаллическую. предположительно, являющихся карбидом бора состава B_4C . Ис-

следования изломов облученной керамики показали, что при данной плотности энергии пучка электронов толщина оплавленного слоя достигает толщины около 15 мкм с размерами зерен в которой, изменяются в пределах от 4 мкм до 11 мкм.

1.4.2. Облучение мощными ионными пучками

Облучение циркониевой керамики мощным импульсным ионным пучком приводит к плавлению приповерхностного слоя. Последующая его кристаллизация сопровождается формированием в нем микроструктуры, которая в отличие от исходного состояния образца состоит из вытянутых по направлению к обрабатываемой поверхности зерен.

Так в работе [37] облучению ускоренными ионами C^+ подвергали циркониевую керамику состава $97ZrO_2-3Y_2O_3$ (моль.%), при остаточном давлении в камере 10^{-2} Па. По ориентировочным оценкам при плотностях тока 40 и 150 А/см² во время действия одного импульса в образец внедрялось $\sim 2.5 \cdot 10^{13}$ см⁻² и $9.4 \cdot 10^{13}$ см⁻² ионов углерода соответственно.

Воздействие на керамику ионного пучка с импульсной плотностью энергии 3 Дж/см² вызывает существенное изменение фазового состава диоксида циркония вследствие образования в приповерхностных слоях образца высокотемпературной кубической модификации. Данный эффект обусловлен созданием в керамике в условиях ионного облучения высокой концентрации нестехиометрических вакансий кислорода.

Формирование в керамике ионно-модифицированных слоев, характеризующихся высоким уровнем кислородной нестехиометрии, сопровождается значительным (на 3–4 порядка) увеличением их электрической проводимости.

При обработке керамики МИП ускоренных ионов происходит понижение численных значений таких механических характеристик приповерхностных слоев материала, как микротвердость, нанотвердость и модуль Юнга.

Эксперименты показали, что обработка керамики МИП ускоренных ионов C^+ приводит к оплавлению поверхностного слоя. зона проплавления составляет около 3 мкм.

Анализ рентгенограмм керамики, которая облучалась ионным пучком с $E = 3 \text{ Дж/см}^2$ ($N = 100, 300$), указывает на интенсивное образование высокотемпературной кубической (*c*) модификации диоксида циркония. Причем повышение числа импульсов приводило к уменьшению интенсивности рефлексов кубической фазы.

При увеличении плотности энергии в импульсе до $W_i = 3.0 \text{ Дж/см}^2$ и флюенса до $f = 9.4 \cdot 10^{15} - 2.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдается гигантское повышение электропроводности образцов и уменьшение ее энергии активации. Причем максимальный эффект роста проводимости достигался при $f = 9.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, при котором в образце происходило образование максимального количества кубической фазы ZrO_2 .

Было проанализировано влияние обработки МИП на механические характеристики приповерхностных слоев керамики. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении, вследствие ионной обработки керамики, микротвердости, нанотвердости, а также модуля Юнга по сравнению с ее исходным состоянием [38, 39].

1.4.3. Облучение лазером

Для улучшения трибологических свойств материалов также применяют лазерное облучение поверхности путем нанесения на нее специальных углублений для формирования слоя газовой или жидкой смазки, а также для сбора частиц износа. Этот метод предполагает создания на поверхности материала микроструктур с выбранными физико-механическими свойствами, такими как: микротвёрдость, коэффициент трения и др. Облучение поверхности короткими и ультракороткими лазерными импульсами являются многообещающим для обработки поверхностей деталей из карбида кремния. Так, в работе на торцовых кольцевых уплотнениях сформирован микрорельеф, обеспечивающий

снижение потерь в паре трения «SiC-графит». Эффективность таких уплотнений, характеризующихся минимальной изнашиваемостью пары трения, возрастает при увеличении скорости вращения ротора.

Макротекстурирование при воздействии лазерного излучения с плотностью мощности 10^3 - 10^4 Вт/см² связано с глобальным улучшением поверхности, заправлением межзеренных пор и созданием полос сканирования. На границах зон воздействия лазерного луча наблюдается повышенная дефектность. Форма растущих кристаллитов при электронной обработке определяется временем воздействия излучения и профилями распределения температур как внутри, так и на границах расплавленной области, при этом максимальная дефектность наблюдается на границах зерен.

Нанотекстурирование при лазерной обработке связано с кристаллизацией второй фазы (γ - Al_2O_3) на поверхности кристаллитов α - Al_2O_3 . Благодаря этому появляется возможность направленного изменения текстуры поверхности.

Таким образом, при плавлении и испарении материала приповерхностного слоя происходит частичное образование γ -фазы и ее последующая перекристаллизация [40]. Содержание γ -фазы в приповерхностном слое зависит от плотности мощности излучения и времени воздействия и может увеличиваться при лазерном воздействии до 50%. В работе [41] установлено, что при обработке поверхности на глубине от 50 мкм (при лазерном воздействии) создается текстура различного масштабного уровня, в связи с чем появляется возможность направленного изменения текстуры поверхности путем изменения плотности мощности лазерного излучения и скорости сканирования луча. Нанотекстурирование может быть использовано при создании высокочувствительных газовых сенсоров и дифракционных оптических приборов.

1.4.4 Облучение керамики плазмой

Плазменная технология предоставляет множество возможностей для ее промышленного применения: обезжиривание металлических частей, поли-

меризация тонких пленок с заданными свойствами, снижение или повышение поверхностного натяжения. Самым оптимальным способом обработки изделий сложных форм является использование плазмы низкого давления. Осаждение тонких слоев с применением плазмы по экономическим причинам производится в вакуумной среде низкого давления. Подлежащие обработке части, размещаются в вакуумной камере и после снижения давления до базового уровня в камеру вводится постоянный поток газов при непрерывном процессе откачивания. Плазма формируется электромагнитным возбуждением при частотах кГц, мГц, или ГГц. Путем выбора нужных параметров (газ, длительность процесса, давление, мощность, частота) процессы настраиваются на соответствующее применение.

В работах [42,43] разработана технология, позволяющая получать наноструктурированную керамику на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с плотностью от 3 до 6 г/см³ путем воздействия высокоэнтальпийным потоком плазмы аргона исходного порошка прекурсора. В результате обработки керамики по данной технологии ход температурной зависимости электросопротивления изменяется с металлического на полупроводниковый, а интервал ΔT_c перехода с 6 до 25 К, плотность образца и средний размер кристаллитов изменяется с 3,5 г/см³ и 72 нм до 3,8 г/см³ и 74 нм. В результате исследований показана возможность упрочнения межзеренных связей в приповерхностном слое этой керамики и изменения индекса кислородной стехиометрии в результате обработки плазменной струей. Повышение межзеренных связей в изделиях из этой керамики может быть осуществлено плазменной обработкой. Исходный индекс кислородной стехиометрии образца и его электрические свойства в упрочненном приповерхностном слое можно сохранить воздействием потоком аргон-кислородной плазмы определенной концентрации. Анализируя плазменные покрытия из никелькерамической и кобальтокерамической механических смесей в работе [44] было выявлено, что покрытие образуется в результате наслоения расплавленных частиц порошков, деформирующихся при соударении с основой или деформированными ранее частицами. Также

наблюдается взаимное обволакивание частиц порошков и низкая пористость, причем никелькерамической смеси присуще равномерное распределение порошков, а в кобальтокерамической композиции эта закономерность не просматривается. Использование многокомпонентных порошковых материалов для получения покрытий с более высоким уровнем качества слоя является перспективным направлением, поскольку они наследуют достоинства каждого из исходных порошков. В то же время их промышленное использование требует проведения целого комплекса технологических, металлографических и иных исследований, в том числе с поиском наиболее рационального процентного соотношения механической смеси.

1.4.5 Ионная имплантация

Ионная имплантация – метод легирования поверхностных слоев, заключающийся в обработке поверхности потоком высокоэнергетичных ионов и внедрении их в объем материала. При ионной имплантации формируются неравновесные метастабильные структуры, которые могут иметь уникальные физико-механические свойства. Данная особенность обусловлена тем, что процессы структурообразования протекают в условиях очень быстрого охлаждения (скорость охлаждения может достигать значений $\sim 10^6$ К/с). Используя ионную имплантацию возможно получение систем сложного состава с любым сочетанием компонентов, а также слои с необходимым профилем концентраций легирующих элементов и структурным состоянием. Кроме того метод ионной имплантации обладает рядом преимуществ: отсутствие термодинамических ограничений по составу образующихся в поверхностных слоях сплавов и химических соединений; универсальность и гибкость процесса; высокая чистота процесса (процесс осуществляется в высоком вакууме); высокая автоматизация; широкие возможности управления ионным пучком, возможность локальной обработки; возможность осуществления процесса при различных условиях и режимах, в том числе и при относительно низкой температуре поверхности; возможность создания поверхностных слоев с высокими физико-

механическими свойствами, которые трудно или даже невозможно получить другими методами обработки.

После ионной имплантации в поверхностном слое образуются напряжения сжатия, которые снижают тенденцию к возникновению и развитию трещин в поверхностных слоях, что также способствует повышению эксплуатационных свойств обработанных изделий.

При имплантации ионов азота и углерода в поверхностных слоях образуются карбиды и нитриды металлов, значительно повышающие твердость и износостойкость деталей. Одним из эффективных применений ионной имплантации является использование ее для получения антифрикционной керамики. Если необработанная керамика имеет коэффициент трения $f_{тр}=0,3...0,6$, то после ионной имплантации – с $f_{тр}=0,05...0,1$. Для повышения сопротивления усталости рекомендуются следующие режимы ионной имплантации: доза облучения $D=10^{17}$ ион/см², энергия ионов $E=100...200$ кэВ, температура поверхности 200 °С.

Наибольшее распространение ионная имплантация получила при обработке режущего инструмента. Ее проведение позволяет повысить износостойкость в десятки раз. В Западной Европе 20...25 % выпускаемых пресс-форм подвергаются ионной имплантации. Обработка ионами азота и углерода ножей для резки резины, ленточных пил, винтов вертолетов, ответственных узлов реактивных двигателей позволяет повысить их долговечность в 10...80 раз [45, 46].

2. Объекты и методы исследования

Одной из причин, ограничивающих применение карбида кремния является его низкая трещиностойкость. Как показывает литературный обзор, для улучшения механических и трибологических свойств материала достаточно повысить характеристики не всего материала, а лишь его поверхностного слоя. Так, формирование в поверхностном слое металлов и сплавов, в том числе и керамических материалов, субмикро- и нанокристаллического состояния позволяет локализовать пластическую деформацию на субмикро- наномасштабном уровне, обеспечивая равномерное распределение упругих напряжений и повышая энергию зарождения и инициирования критических концентраторов напряжения.

В связи с вышеизложенным, *цель дипломной работы* - выявление закономерностей эволюции фазового и элементного состава, состояния дефектной структуры поверхностного слоя образцов SiC-керамики и системы «пленка (Ti) / (SiC-керамика) подложка», обработанных интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком.

Для достижения поставленной в работе цели были сформулированы и успешно решены следующие задачи:

- 1) Изготовление методом SPS керамических образцов из порошка карбида кремния;
- 2) Шлифовка и полировка полученных образцов до зеркального состояния на шлифовально-полировальном станке «Полилаб»;
- 3) Осаждение титановой пленки толщиной 0,5 мкм на подложку из карбидокремниевой керамики на установке «КВИНТА» вакуумно-дуговым методом при испарении катода из технически чистого титана марки ВТ1-0;
- 4) Облучение интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛО»:
 - а) керамики из карбида кремния, полученной методом SPS, при различных плотностях энергии пучка: 10, 15, 20 Дж/см², одинаковом количестве и длительности импульсов – 3 имп., 200 мкс соответственно;

б) системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» при различном количестве импульсов: 20 имп. и 30 имп., одинаковой плотности энергии пучка электронов 15 Дж/см^2 и при длительности импульса 200 мкс;

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

Объектом исследования являлись образцы, изготовленные из порошка карбида кремния с размерами частиц 0,9-4,0 мкм и нанопорошка того же состава (размер частиц 0,06 мкм), в порошок-основу вводилась добавка 3 мас. % нанопорошка SiC (NEOMAT, с удельной поверхностью $32 \text{ м}^2/\text{г}$). Основной фазой использованного порошка SiC являлся политип с гексагональной элементарной ячейкой SiC-6H; в небольшом количестве присутствовал политип с ромбоэдрической элементарной ячейкой SiC-15R. Образцы, изготавливались в форме таблеток диаметром 14 мм и толщиной 3 мм методом SPS-спекания [47] (установка SPS 155 (SPSSYNNEX)) Рисунок 1. Режим спекания: $T_{\text{сп}} = 2100 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{пресс}} = 70 \text{ МПа}$, $\tau_{\text{спек}} = 10 \text{ мин}$.



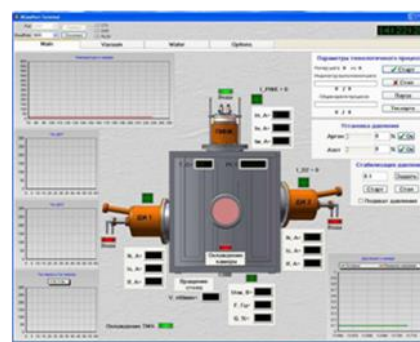
Рисунок 1 – Установка для спекания в плазме искрового разряда SPS-

S515

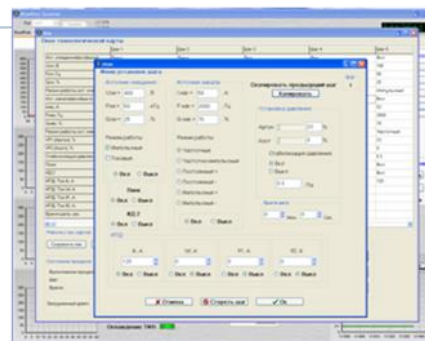
Основные технические параметры:

- 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 0,5 мкм на подложку SiC-керамики осуществляли на установке «КВИНТА» вакуумно-дуговым методом при испарении катода из технически чистого титана марки ВТ1-0 (Рисунок 2).



Окно программного обеспечения



Технологическая карта

<u>Рабочие параметры установки:</u>	
Размеры вакуумной камеры	750x600x600 мм ³ ;
Манипулятор	12 позиций;
Рабочий вакуум	0,1-1 Па;
Ток плазмодгенератора	до 120А;
Ток дуги испарителя	до 200А;
Ускоряющее напряжение	до 1000 В;
Скорость напыления	до 1-20 мкм/ч;
Потребляемая мощность	до 50 кВт;
Расход охлаждающей воды	2 м ³ /ч.

Рисунок 2 – Внешний вид автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установки «КВИНТА»

Осаждение пленки титана на SiC-керамику осуществляли при оптимальных для распыляемого металла параметров работы установки в следующей последовательности:

1) очистка поверхности образцов в плазме дугового разряда низкого давления. Время обработки 10 минут;

2) осаждение пленки титана производили при токе разряда испарителя 80 А и давлении аргона $7,6 \cdot 10^{-2}$ Па. Время осаждения составляло 2 минуты 30 секунд.

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.

Образцы SiC-керамики и систему «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» облучали интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛО» (Рисунок 3) при режимах: (10, 15, 20) Дж/см², 200 мкс, 3 имп.; 15 Дж/см², 200 мкс, 20 имп. и 30 имп.



Рисунок 3 – 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 – $1350 \times 2150 \times 2000$ мм;
2. Размеры рабочей вакуумной камеры – $600 \times 500 \times 400$ 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.

Общий вид установки «СОЛО» приведен на рисунке 3

Импульсная электронно-пучковая установка СОЛО с электронным источником на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточ-

ной 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 [48]. 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.

Перед исследованием поверхность образцов шлифовали и полировали на шлифовально - полировальном станке «Полилаб» (рисунок 4).



Рисунок 4 – Шлифовально - полировальный станок «Полилаб»

Ручной однодисковый шлифовально - полировальный станок Полилаб П12М — это практичный и экономичный прибор, предназначенный для проведения металлографической пробоподготовки. Скорость вращения приводного круга настраивается в пределах 50 — 1000 об/мин, благодаря чему возможно решение в т.ч. специфических задач. Станок отличается современным дизайном, имеет корпус из армированного пластика и детали из нержавеющей стали. В комплект поставки входит алюминиевый приводной круг диаметром 250 мм, кольцо для крепления бумаг и сукон, шланги для подключения к системе водоснабжения и слива, кожух защиты от брызг и защитная крышка. По желанию заказчика станок может быть снабжен автоматическим держателем образцов. Станок идеально подходит для использования в заводских лабораториях, научно-исследовательских и образовательных институтах.

Анализ структуры и элементного состава поверхностного слоя керамики проводили на сканирующем электронном микроскопе SEM-7500FA JEOL (рис. 5); фазовый состав материала изучали методами рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (рисунок 6).



Рисунок 5 – Сканирующий электронный микроскоп с микроанализатором JSM 7500F (JEOL, Япония EDS)

Таблица 3 – Основные технические характеристики СЭМ с микроанализатором JSM 7500F

Характеристика	Значение
Пространственное разрешение	1,0 нм при 15 кВ; 1,4 нм при 1 кВ; 0,6 нм при 30 кВ (достижимо)
Электронная пушка	с холодным катодом на полевой эмиссии
Ускоряющее напряжение	от 0,1 кВ до 30 кВ
Диапазон токов пучка	от 10^{-12} до $2 \cdot 10^{-9}$ А
Диапазон увеличений	от $\times 25$ до $\times 1\,000\,000$ (в пересчете на фотопластину 9 см*12 см)
Столик образцов	большой, эвцентрического типа Диапазон перемещений: Тип 1: X:70мм, Y:50мм, Z: 37,5мм. Наклон от -5° до $+70^\circ$. Вращение 360° . Тип 2: X:110мм, Y:80мм, Z: 23,5мм. Наклон от -5° до $+70^\circ$. Вращение 360° . Тип 3: X:140мм, Y:80мм, Z: 23,5мм. Наклон от -5° до $+70^\circ$. Вращение 360° .
Максимальный размер образца	диаметром до 200 мм, высотой до 10 мм

Для определения фазового состава модифицированного материала использовали дифрактометр XRD-7000s (Shimadzu, Япония) (рисунок 6).



Рисунок 6 – Дифрактометр XRD-7000s

Морфологию и дефектную субструктуру керамики исследовали методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (прибор JEM 2100F, JEOL) (рисунок 7). Технические характеристики прибора приведены в таблице 4.



Рисунок 7 – Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100F.

Таблица 4 – 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

Использование просвечивающей дифракционной электронной микроскопии и сканирующей электронной микроскопии для исследования морфологии частиц порошка позволяет визуально оценить размер, форму, степень агломерированности наночастиц и изучить элементный и фазовый состав, строение нанокристаллов керамики.

Фольги (объект исследования материала методами просвечивающей электронной микроскопии) изготавливали методами ионного утонения тонких (100 мкм) пластинок на приборе Ion Slicer EM 09100IS (Рисунок 8).



Рисунок 8 – 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 за-

щитной 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.

Физико-механические характеристики выявляли методом динамической микротвердометрии алмазной пирамидкой Берковича в режиме «нагрузка-разгрузка» при нагрузке $P = 10$ г (нанотвердомер DUN-211S, Shimadzu, рисунок 9) и на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор $P = 200$ г (рисунок 10).



Рисунок 9 – Ультрамикротвердомер Shimadzu DUH-211S

Возможности DUH-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.



Рисунок 10 – Микротвердомер ПМТ-3

3. Результаты исследования и их обсуждение

3.1 Анализ структуры и свойств поверхности SiC-керамики, подвергнутой модификации импульсным электронным пучком

Рентгенофазовые исследования керамики SiC в исходном (до облучения электронным пучком) состоянии показали, что основу материала представляет политип α -SiC-6H, содержание которого в относительных процентах составляет 88,75, в кратно меньшем количестве (10,16 отн. %) содержится политип α -SiC-15R, остальную часть составляет кремний.

Облучение керамики SiC интенсивным импульсным электронным пучком (при режимах: 10 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.; 15 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.; 20 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.) приводит к значительным изменениям политипного состава поверхностного слоя материала (Рисунок 11, таблица 5).

Таблица 5 – Политипный состав поверхностного слоя керамики карбида кремния до и после электронного воздействия

Политипный состав SiC-керамики, %				
Наименование политипа	До облучения	После облучения при режимах:		
		10 Дж/см ² 200 мкс. 3 имп.	15 Дж/см ² 200 мкс. 3 имп.	20 Дж/см ² 200 мкс. 3 имп.
SiC-6H	88.75	92.2	87.66	73.86
SiC-15R	10.16	6.1	10.21	21.56

При плотности энергии пучка электронов $E_S = 10$ Дж/см² фиксируется менее чем двукратное снижение относительного содержания политипа α -SiC-15R, в то время как при $E_S = 20$ Дж/см² выявляется увеличение относительного содержания политипа α -SiC-15R более чем в 2 раза по сравнению с исходным состоянием поверхностного слоя керамики (Рисунок 12). Результаты рентгенофазового анализа показывают, что с помощью облучения SiC-керамики интенсивным импульсным электронным пучком возможно в достаточно большом диапазоне изменять политипный состав поверхностного слоя материала.

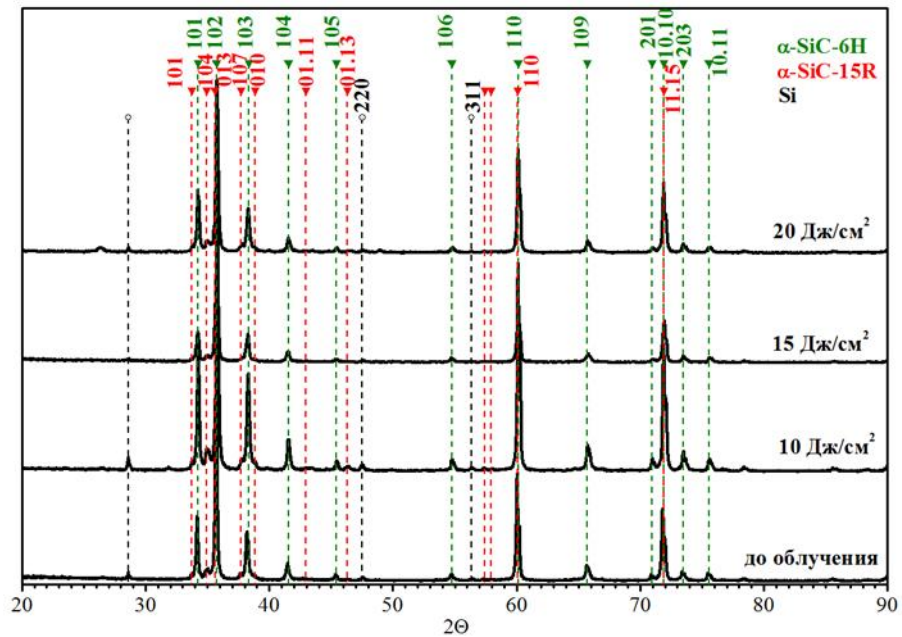


Рисунок 11 – Участки рентгенограмм образцов керамики SiC, облученных интенсивным импульсным электронным пучком

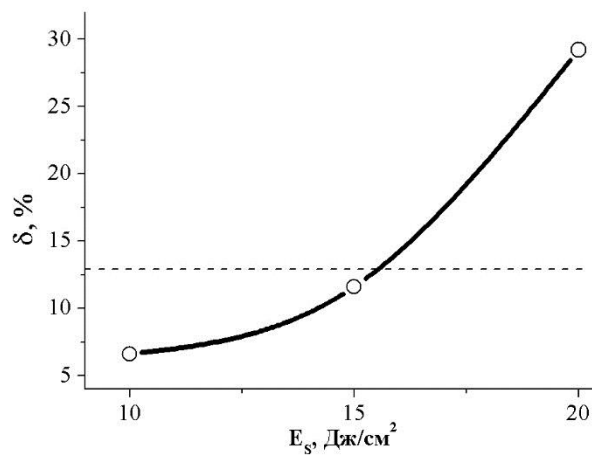


Рисунок 12 –Зависимость от плотности энергии пучка электронов относительного содержания в поверхностном слое SiC-керамики политипа α-SiC-15R. Пунктирной прямой обозначено содержание политипа α-SiC-15R в исходном (необлученном) материале.

Исследования структуры поверхности до и после электронно-пучкового воздействия на образцы керамики методами сканирующей электронной микроскопии показывают, что преобразования фазового состава поверхностного слоя SiC-керамики сопровождаются изменениями дефектной подсистемы материала.

На рисунке 13 представлена исходная поверхность керамики до облучения после шлифовки и полировки.

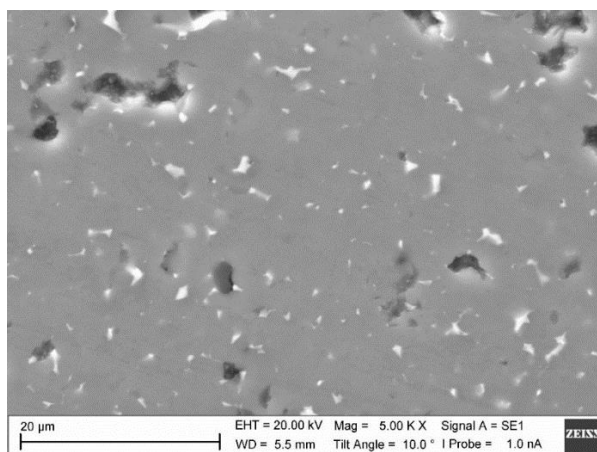


Рисунок 13 – Структура поверхности SiC-керамики до облучения. Сканирующая электронная микроскопия

В ходе исследований выяснено, что при каждом из использованных в работе режимов облучения материала пучком электронов поверхность полированной керамики разбивается сеткой микротрещин на области (Рисунок 14). С увеличением плотности энергии пучка электронов средние размеры фрагментов уменьшаются в интервале от 180 мкм (при $E_S = 10$ Дж/см²) до 40 мкм (при $E_S = 20$ Дж/см²).

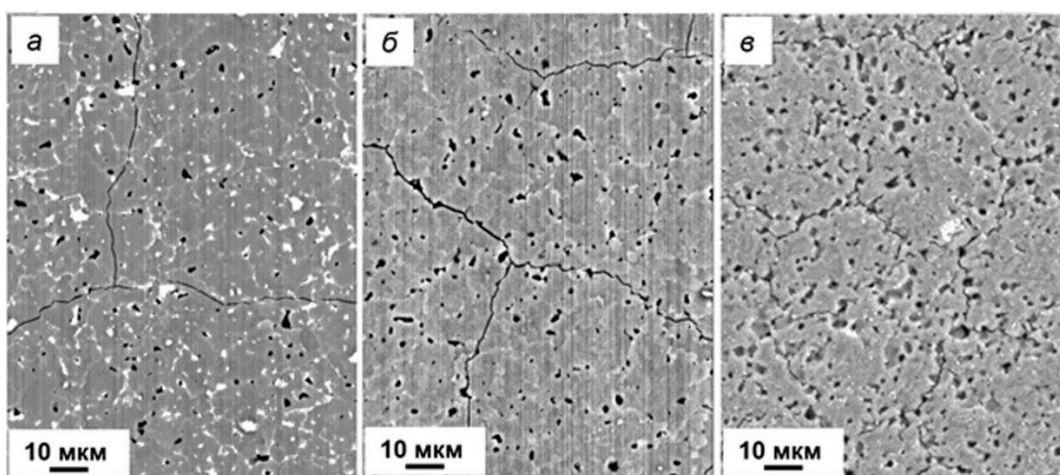


Рисунок 14 – Структура поверхности SiC-керамики, сформировавшаяся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов (Дж/см²): а – 10; б – 15; в – 20. Сканирующая электронная микроскопия.

Электронно-пучковая обработка приводит к наноструктурированию поверхностного слоя материала. При плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 области с нанокристаллической структурой имеют округлую форму и выстраиваются прерывистыми цепочками вдоль границ зерен (Рисунок 15, а, б). Размеры наноструктурированных участков изменяются в пределах $300\div 500 \text{ нм}$, а размеры кристаллитов, формирующих данные участки, изменяются в пределах до 100 нм (Рисунок 15, в).

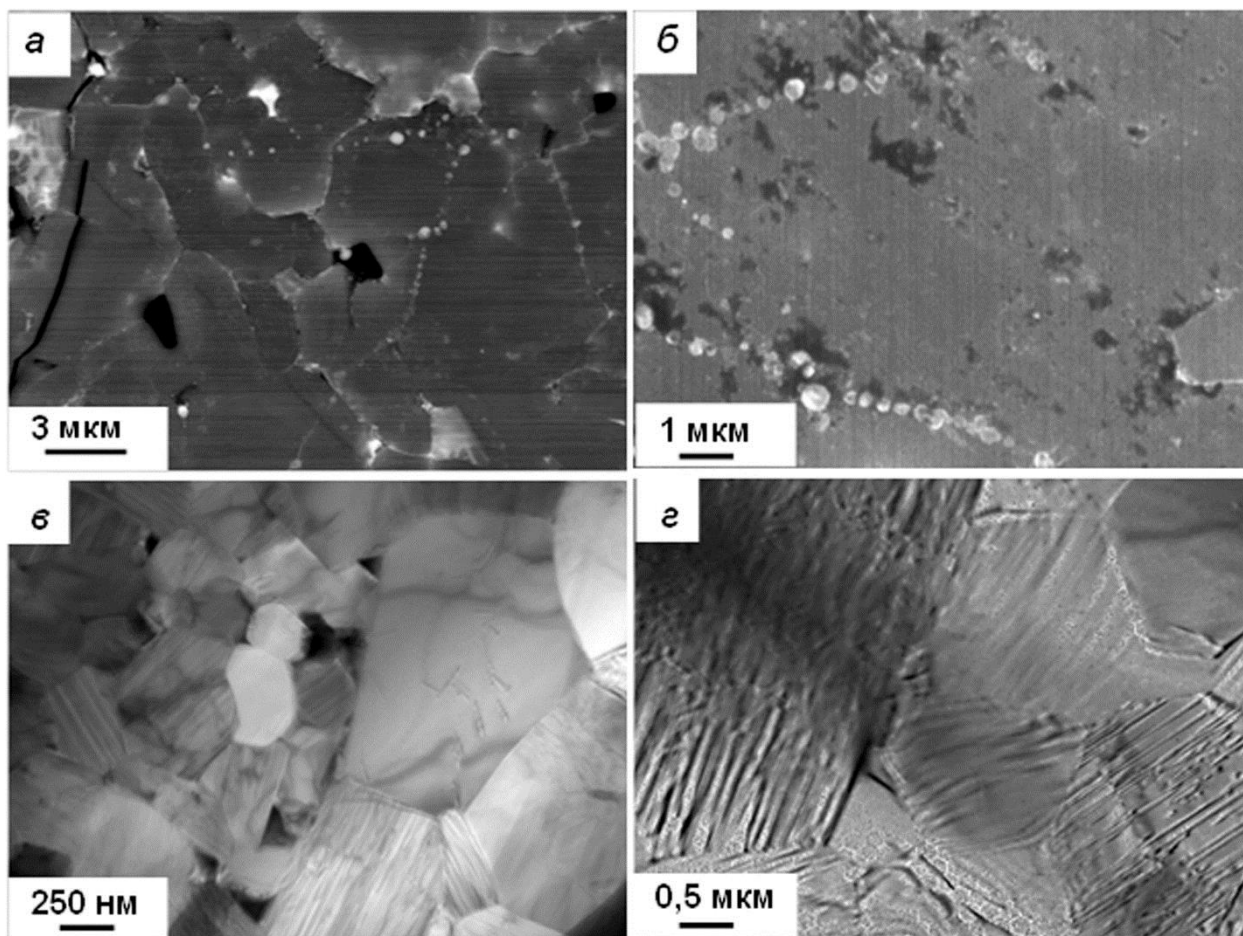


Рисунок 15 – Структура поверхности SiC-керамики, сформировавшаяся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 ; а, б – сканирующая электронная микроскопия; в, г – просвечивающая электронная микроскопия.

Предположительно, причиной образования таких областей являются термомеханические напряжения, приводящие к развитию процесса первичной рекристаллизации. Методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг обнаруживается множественное микродвойникование поверхностно-

го слоя SiC-керамики (Рисунок 16, *з*). Можно предположить, что формирование двойников в зернах при импульсной электронно-пучковой обработке вызвано сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения поверхностного слоя керамики [49].

Рост плотности энергии пучка электронов до 15 Дж/см^2 сопровождается увеличением относительного содержания областей с нанокристаллической структурой, располагающихся в виде протяженных прослоек вдоль границ зерен и фрагментов (Рисунок 16 *а*, области с нанокристаллической структурой имеют более светлый контраст). Размеры кристаллитов данных областей изменяются в пределах $10 \div 30 \text{ нм}$ (Рисунок 16 *б*).

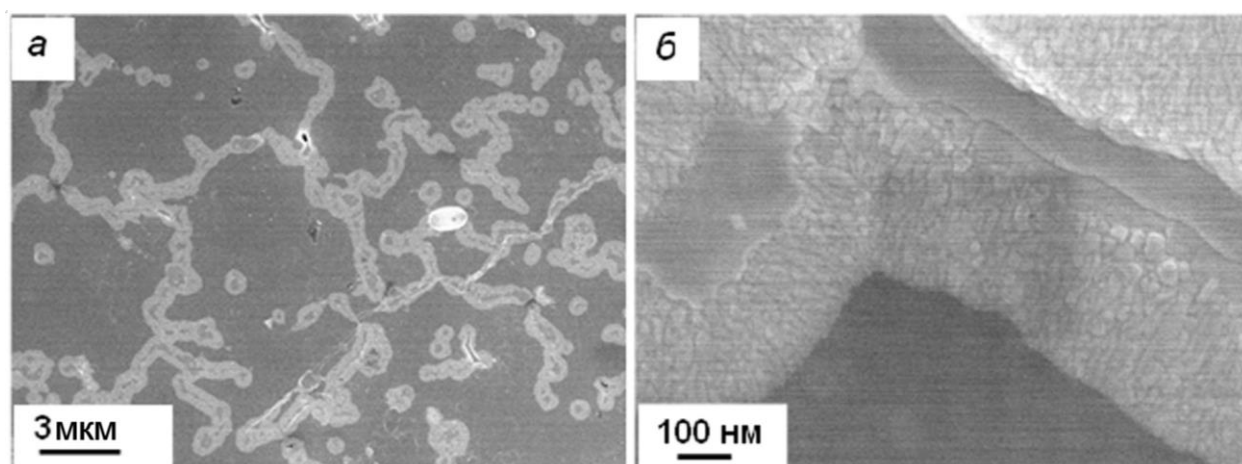


Рисунок 16 – Структура поверхности SiC-керамики, сформировавшаяся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 15 Дж/см^2 . Сканирующая электронная микроскопия.

Как отмечалось выше, облучение SiC-керамики электронным пучком с плотностью энергии 20 Дж/см^2 , приводит к фрагментации поверхностного слоя (Рисунок 14 *в*). Фрагменты имеют явно выраженную неоднородную структуру (Рисунок 17). На периферии фрагментов располагаются кристаллиты с четко выраженными границами; в центре формируется нанокристаллическая структура (Рисунок 18, *в*). Размеры кристаллитов этой структуры изменяются в пределах $100 \div 150 \text{ нм}$. На электронно-микроскопических изображениях под данным слоем просматривается поликристаллическая структура, подобная струк-

туре периферийной области фрагментов (Рисунок 17, б). Следовательно, образованный слой нанокристаллической структуры тонок.

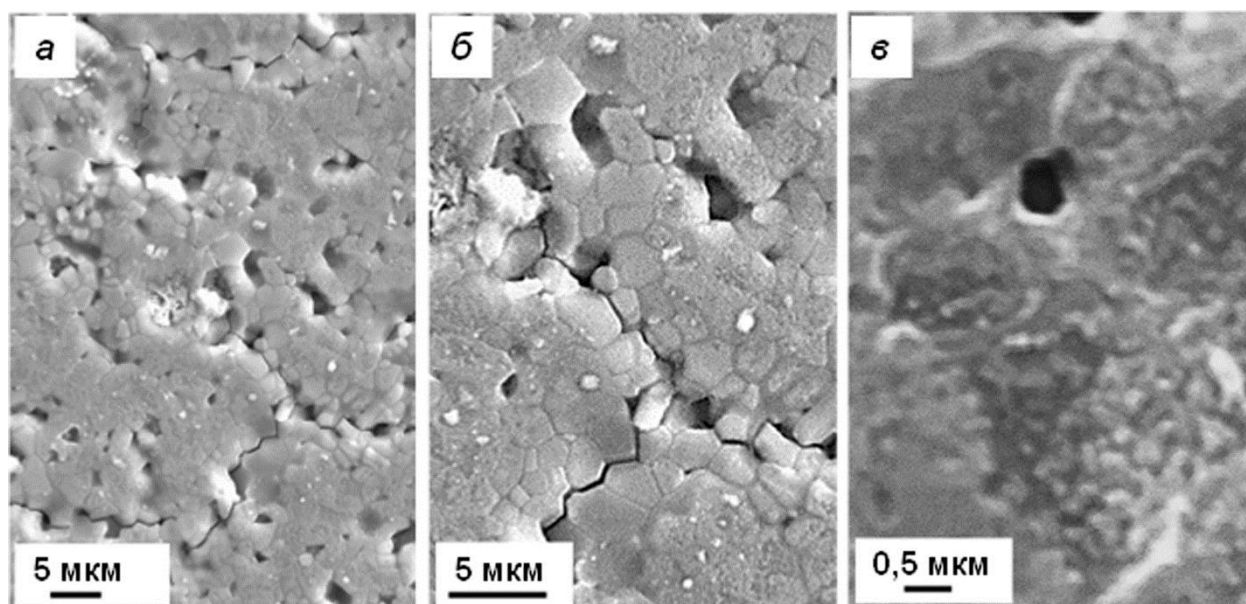


Рисунок 17 – Структура поверхности SiC-керамики, сформировавшаяся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 20 Дж/см^2 . Сканирующая электронная микроскопия.

Предположительной причиной появления бимодальной зеренной структуры в результате облучения SiC-керамики импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка 20 Дж/см^2 являются термомеханические напряжения, причиной которых является скоротечность и неравновесность процессов изменения структуры поверхностного слоя материала. Релаксация полей напряжений вызывает фрагментацию поверхностного слоя керамики и формирование микропор вдоль границ фрагментов, а в центральной части рекристаллизацию материала с образованием нанокристаллической структуры.

Облучение SiC-керамики интенсивным импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см^2 вызывает изменение механических свойств поверхностного слоя материала. Наноиндентирование (прибор DUN-211S Shimadzu при нагрузке на индентер $P = 100 \text{ мН}$) выявило увеличение твердости поверхностного слоя на 12 % и модуля Юнга на 17 % (до облучения: модуль Юнга – 367 ГПа, микротвердость - 31,5 ГПа; после облучения: модуль Юнга – 403 ГПа, микротвердость - 37,0 ГПа).

Таблица 6 – Изменение механических свойств поверхностного слоя SiC-керамики в результате облучения интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком (20 Дж/см², 200 мкс, 3 имп)

Состояние SiC-керамики	Механические свойства	
	Микротвердость	Модуль Юнга
До облучения	31,5 ГПа	367 ГПа
После облучения	37 ГПа	403 ГПа

Рост твердости поверхностного слоя керамики, предположительно, вызван наноструктурированием материала, а также кратным увеличением содержания в поверхностном слое политипа 15R- α -SiC, обладающего самыми высокими значениями твердости (из всех политипов SiC-керамики).

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что облучение SiC-керамики интенсивным импульсным электронным пучком (18 кэВ, 200 мкс, 0,3 с⁻¹, 3 имп., (10, 15, 20) Дж/см²) сопровождается:

- закономерным изменением полиморфного состава (увеличение более чем в два раза, по сравнению с исходным материалом, относительного содержания политипа α -SiC-15R);
- фрагментацией и наноструктурированием поверхностного слоя;
- увеличением твердости и модуля Юнга.

Предположительно, одной из причин зафиксированных преобразований материала при облучении керамики интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия являются релаксационные процессы, вызванные термомеханическим напряжениями, возникающих в поверхностном слое материала в результате высокоскоростных нагрева и охлаждения, имеющих место при облучении.

3.2 Анализ структуры и свойств поверхности системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», подвергнутой модификации интенсивным импульсными электронным пучком (15 Дж/см², 200 мкс, 20 и 30 имп.)

Методами сканирующей электронной микроскопии выявлено, что осажденная на поверхность образцов SiC-керамики пленка титана характеризуется (до облучения) наличием большого количества каплевидных частиц овальной формы (рисунок 18). Размеры каплевидных частиц изменяются от десятков нанометров до единиц микрометров. Микрорентгеноспектральный анализ показывает, что данные частицы преимущественно состоят из атомов титана (рисунок 19, таблица).

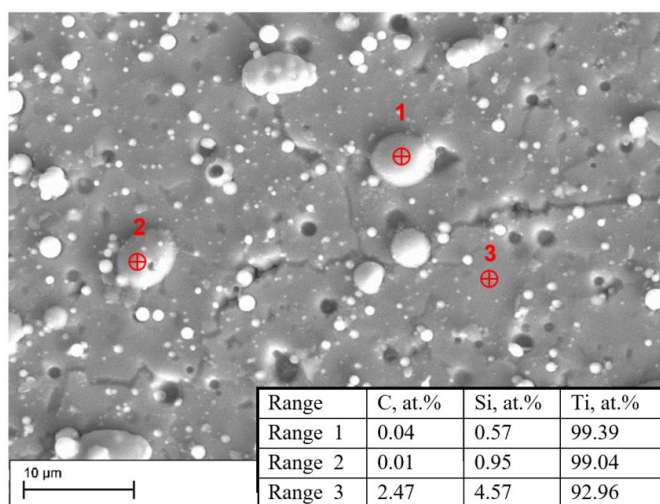


Рисунок 18 – Структура поверхности системы «пленка (Ti) / (SiC-керамика) подложка» перед облучением интенсивным импульсным электронным пучком. Выделены и пронумерованы области, для которых определен элементный состав (таблица).

Облучение системы «пленка (Ti) / (SiC-керамика) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком, независимо от количества импульсов воздействия электронного пучка, сопровождается формированием поверхностного слоя, имеющего «сглаженный» рельеф, на котором выделяются области светлого контраста, образовавшиеся в результате плавления пленки титана, содержащей капельную фракцию (рисунок 19, а). Указанные области имеют суб-

микро- нанокристаллическую структуру, выявляемую методами сканирующей электронной микроскопии (рисунок 19, б).

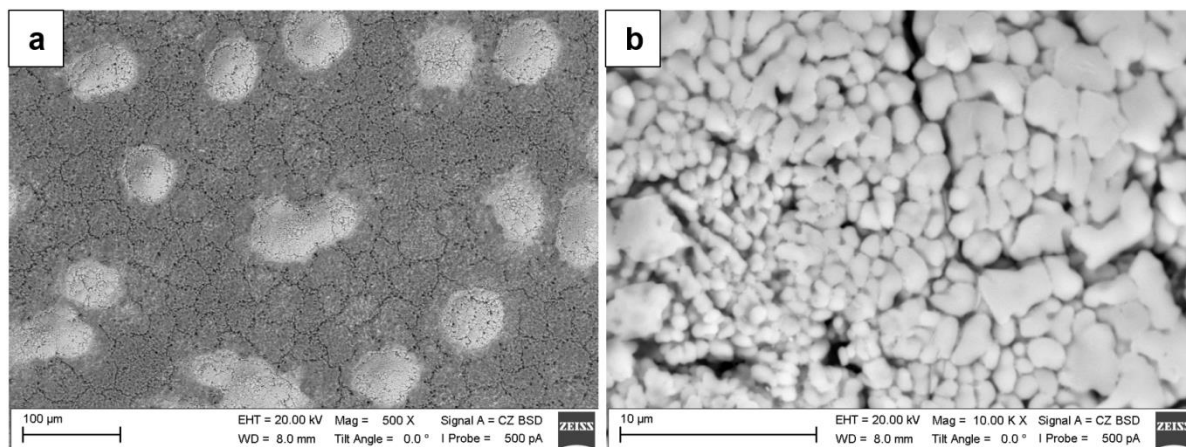


Рисунок 19 – Структура системы «пленка (Ti)/(SiC-керамика) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком при 30 имп. воздействия пучка электронов.

Рентгенофазовый анализ системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», подвергнутой модификации импульсным электронным пучком (15 Дж/см², 200 мкс, 20 имп), показывает, что формируется многофазный слой, основными фазами которого являются TiC (кубический) – 36,6% и Ti₅Si₃ – 44,9%; содержание SiC (гексагональный) составляет 18% (рисунок 20, а, Таблица 7). При увеличении количества импульсов облучения электронным пучком до 30 основной фазой поверхностного слоя является SiC (гексагональный) – 81,6 %, значительно меньшую долю объема поверхности образца занимает TiC (кубический), Si (кубический), C (гексагональный) в количестве 12%, 0,5% и 5,2% соответственно (рисунок 20, б, Таблица 7).

Выше (рисунок 18) было показано, что пленка титана, сформированная на поверхности образцов SiC-керамики электродуговым распылением катода из VT1-0, содержит большое количество микрокапель. Основным элементом микрокапель является титан (≈ 99 ат.%). Относительное содержание титана в пленке (объемы между каплями) ≈ 93 ат.%. Облучение системы «пленка (Ti)/(SiC-керамика) подложка» электронным пучком сопровождается изменением элементного состава пленки и включений капельной фракции, о чем свидетель-

ствуют результаты, полученные при микрорентгеноспектральном анализе материала (рисунок 21, табл. 8).

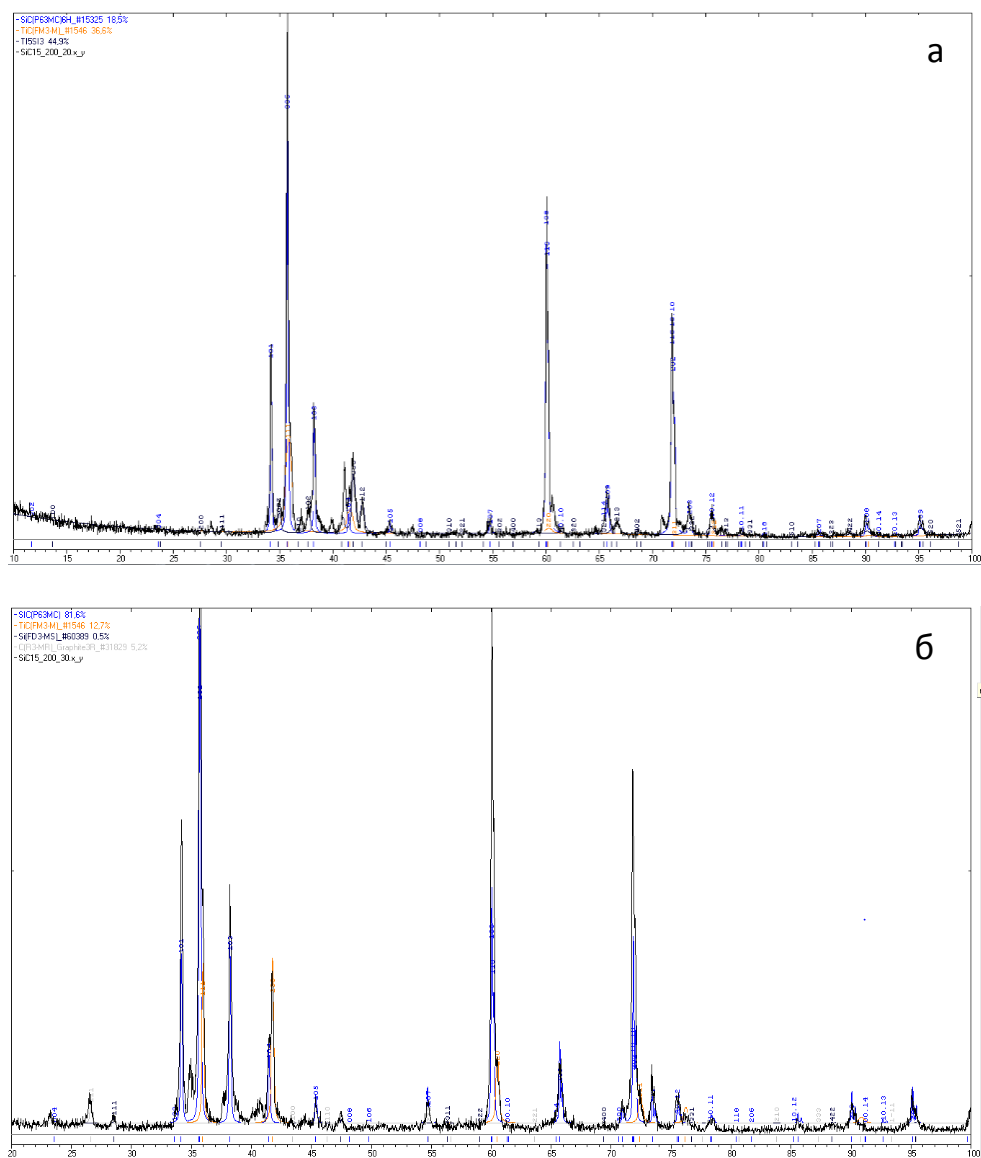


Рисунок 22 – Участки рентгенограмм системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» после обработки интенсивным импульсным электронным пучком при режимах: а) 15 Дж/см², 200 мкс, 20 имп б) 15 Дж/см², 200 мкс, 30 имп

Таблица 7 – Фазовый состав поверхностного слоя системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», подвергнутой модификации импульсным электронным пучком (15 Дж/см², 200 мкс).

Количество импульсов	Фазовый состав, %				
	SiC (гексагональный)	TiC (кубический)	Ti ₅ Si ₃	Si (кубический)	C
20	18,5	36,6	44,9	-	-
30	81,6	12	0,5	0,7	5,2

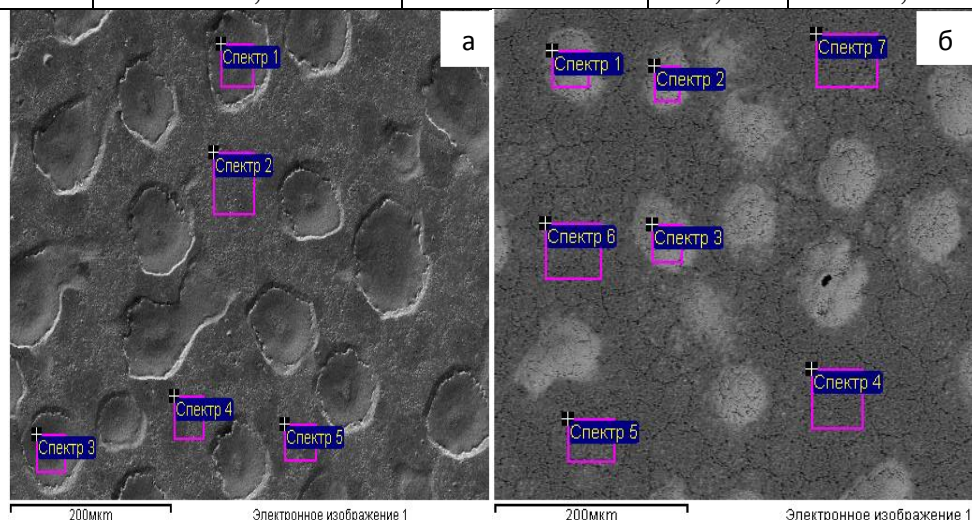


Рисунок 21 – Микроструктура системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» после обработки интенсивным импульсным электронным пучком при режимах: а) 15 Дж/см², 200 мкс, 20 имп б) 15 Дж/см², 200 мкс, 30 имп. Обозначены области микрорентгеноспектрального анализа.

Таблица 8 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа образцов системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», облученных интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком при различных режимах (к рисунку 21)

15 Дж/см ² , 200 мкс, 20 имп			
Спектр	C, ат.%	Si, ат.%	Ti, ат.%
Спектр 1	4.56	18.33	76.36
Спектр 2	43.87	37.87	18.10
Спектр 3	9.29	19.15	71.14
Спектр 4	42.77	35.73	21.37
Спектр 5	45.80	36.91	17.17
15 Дж/см ² , 200 мкс, 30имп			
Спектр 1	47.11	6.17	46.26

Спектр 2	48.46	5.77	45.13
Спектр 3	47.53	5.65	46.07
Спектр 4	69.05	29.93	0.74
Спектр 5	64.74	33.63	1.27
Спектр 6	64.52	33.90	1.27
Спектр 7	69.54	28.56	1.61

Анализируя результаты, представленные в табл. 8, можно отметить, что облучение системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» электронным пучком сопровождается снижением концентрации атомов титана и в пленке, и в микрокаплях. Увеличение количества импульсов облучения усиливает процесс перераспределения элементов системы «пленка/подложка». Эти факты хорошо согласуются с результатами рентгенофазового анализа, свидетельствующими о формировании в поверхностном слое системы «пленка/подложка» многофазного состояния, содержащего карбиды и силициды титана.

Методами сканирующей электронной микроскопии выполнен анализ поперечных сколов образцов системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», облученной электронным пучком (Рисунок 22). Показано, что толщина капель титана на поверхности пленки может достигать 10-15 мкм.

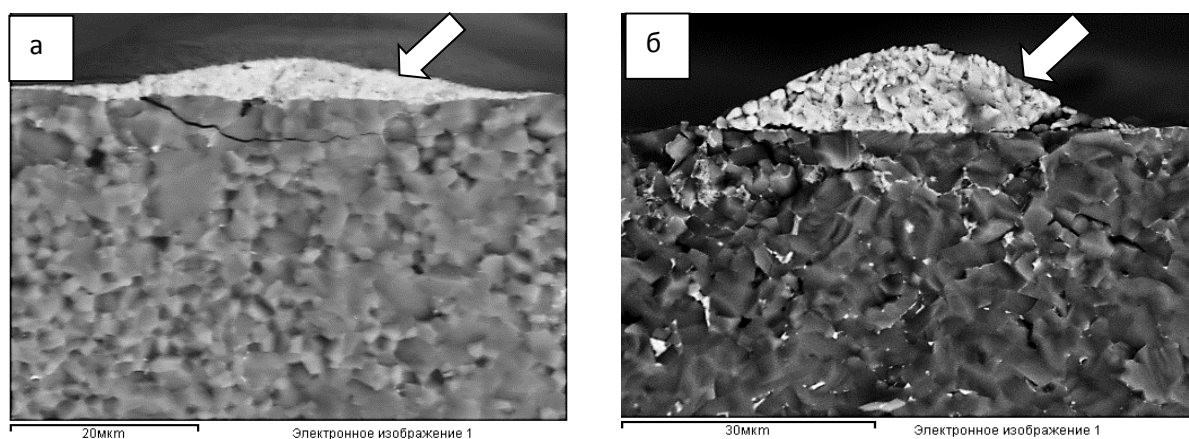
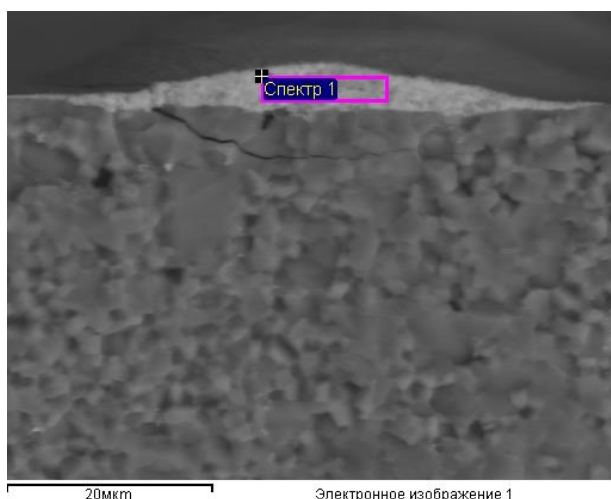


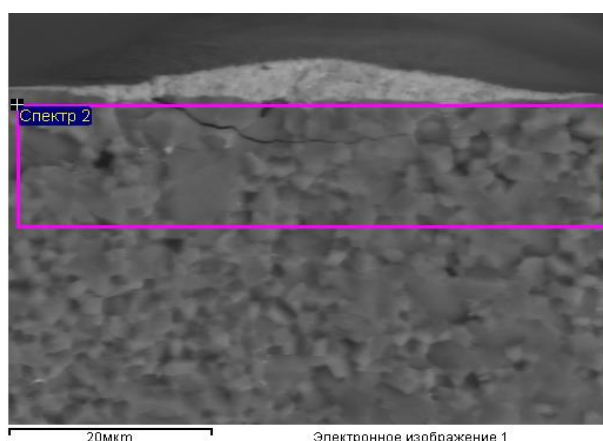
Рисунок 22 – Структура поверхности скола системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком (15 Дж/см^2 , 200 мкс) при 20 имп. (а) и 30 имп. (б). Стрелками указаны микрокапли. Сканирующая электронная микроскопия.

Выполнен микрорентгеноспектральный анализ элементного состава микрокапель и прилегающих к ним объемов SiC-керамики. Результаты исследова-

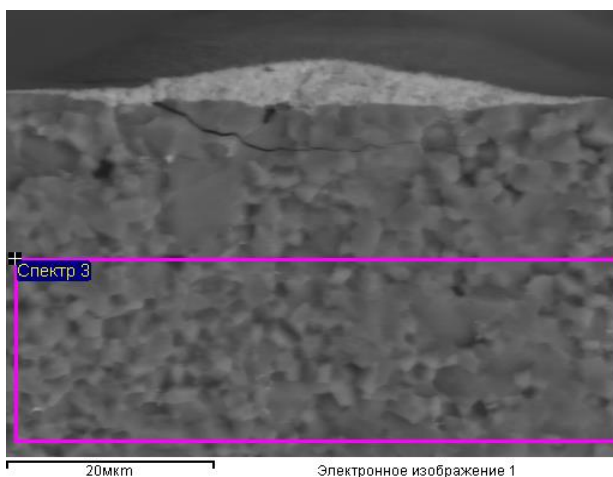
ний, представленные на рисунок 23 и рисунок 24, позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, облучение системы «пленка/подложка» электронным пучком сопровождается легированием капель толщиной до 15 мкм элементами подложки. С ростом количества импульсов процесс легирования усиливается. Во-вторых, наблюдается процесс легирования подложки атомами титана. Концентрация титана в поверхностном слое подложки увеличивается с ростом количества импульсов. Таким образом, облучение системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» импульсным электронным пучком сопровождается взаимной диффузией атомов пленки и подложки, что сопровождается, следуя результатам рентгенофазового анализа, образованием карбидов и силицидов титана.



Спектр 1	
Элемент	Атомный %
C	19.93
Si	29.53
Ti	50.55

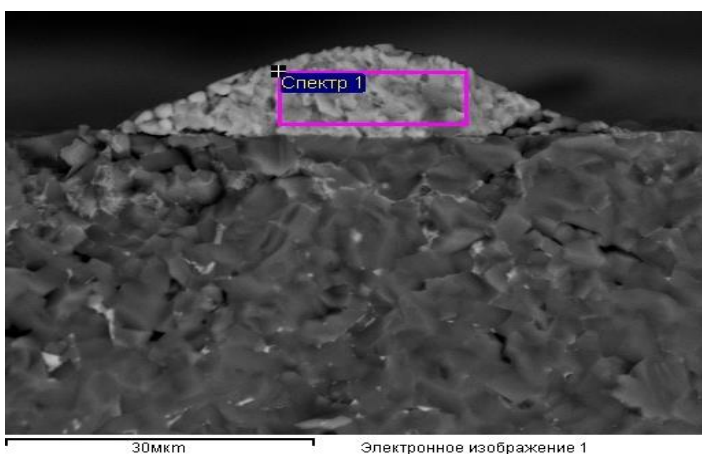


Спектр 2	
Элемент	Атомный %
C	50.95
O	2.39
Si	46.07
Ti	0.59

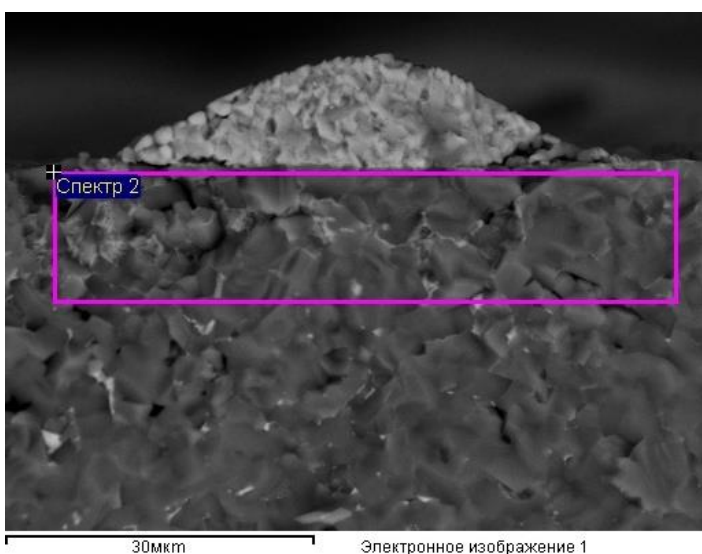


Спектр 3	
Элемент	Атомный%
C	54.67
Si	45.33

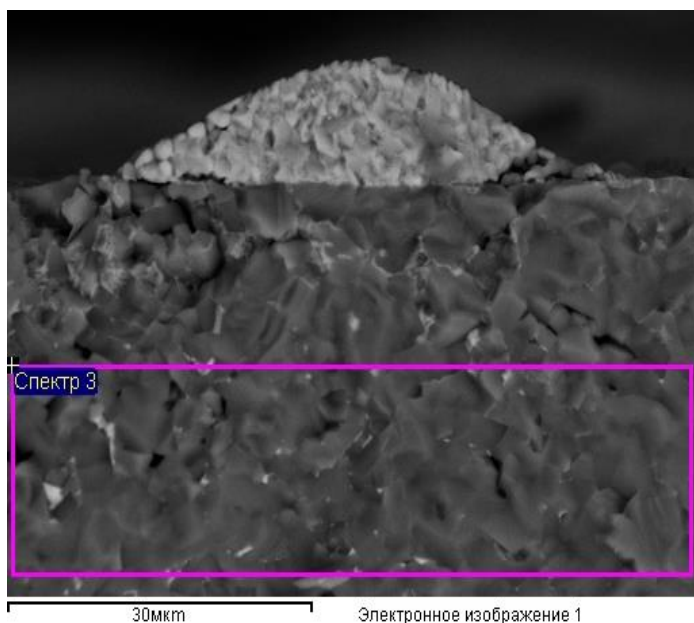
Рисунок 23 – Структура и элементный состав системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», сформировавшийся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком при режиме 15 Дж/см², 200 мкс, 20 имп. на различном расстоянии от поверхности облучения.



Спектр 1	
Элемент	Атомный %
C	47.29
Si	11.16
Ti	40.73
Fe	0.81



Спектр 2	
Элемент	Атомный%
C	47.83
Si	50.69
Ti	1.22
Fe	0.26



Спектр 3	
Элемент	Атомный%
C	48.54
Si	51.23
Ti	0.23

Рисунок 24 – Структура и элементный состав системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», сформировавшийся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком при режиме 15 Дж/см², 200 мкс, 30 имп. на различном расстоянии от поверхности облучения.

Определение микротвердости модифицированной электронным пучком системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» проводились на приборе ПМТ 3-М. В результате выполненных исследований было установлено, что микротвердость образцов меняется в пределах (33,2 - 74,7) ГПа (20 имп) и (33,1 – 96,3) ГПа (30 имп) (рисунок 25). Максимальные значения микротвердости выявлены вблизи границы, отделяющей области, обогащенные титаном (микрокапли) от основного объема покрытия. Очевидно, что столь высокие значения микротвердости обусловлены формированием нанокристаллического многоэлементного многофазного состояния, сформированного в результате взаимной диффузии атомов титана, углерода и кремния в процессе облучения интенсивным импульсным электронным пучком.

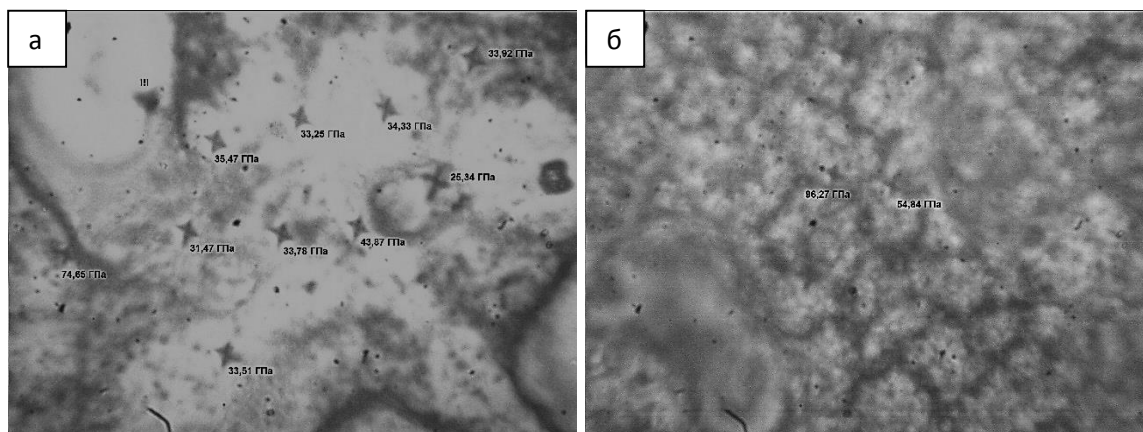


Рисунок 25 – Структура системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», обработанной интенсивным импульсным электронным пучком (15 Дж/см^2 , 200 мкс) при 20 имп. (а) и 30 имп. (б).

Таким образом, показано, что облучение системы «пленка (Ti) / (SiC-керамика) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком (15 Дж/см^2 ; 200 мкс; $0,3 \text{ с}^{-1}$; 20 и 30 имп.) приводит к формированию поверхностного слоя, имеющего многоэлементную многофазную структуру субмикро- наноразмерного диапазона. Выявлена взаимная диффузия атомов пленки и подложки. Толщина легированного титаном слоя керамики достигает 4 мкм. Толщина капель титана, легированных углеродом и кремнием, достигает 10-15 мкм. Микротвердость поверхностного слоя модифицированных образцов изменяется в пределах (33,2 - 74,7) ГПа (20 имп) и (33,1 – 96,3) ГПа (30 имп).

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕ-
РЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ6Б	Кузичкину Евгению Евгеньевичу

Инженерная школа	Новых производственных технологий	Отделение	Материаловедение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Материаловедение и технологии материалов

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	НИ проводится в лабораториях ИСЭ СО РАН. В исследовании задействованы 2 человека: студент-исполнитель и научный руководитель. Приблизительная стоимость на реализацию НИ составит около 30000 рублей.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность».
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам – 30% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	- Организация и планирование работ по разработке технологии импульсной ионно-плазменной обработки поверхности материалов; - Расчет затрат на материалы
2. Разработка устава научно-технического проекта	- Расчет общей себестоимости разработки
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	- Определение трудоемкости выполнения работ, разработка графика проведения НТИ, - Формирование бюджета НТИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	- Оценка научно-технического уровня исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИБ ТПУ	Петухов О.Н.	к.э.н. доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Б	Кузичкин Евгений Евгеньевич		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данной научно-исследовательской работе проводится Исследование структурно-фазовых преобразований поверхностного слоя SiC-керамики, подвергнутой электронно-ионно-плазменной обработке. Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности исследования, планирование процесса управления НИР, определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки проекта;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- рассчитать бюджет проекта;
- определить научно-техническую эффективность проекта

4.1 Оценка коммерческого потенциала исследования

В качестве потенциальных потребителей результатов исследования могут выступать ядерная, военная, и металлургическая отрасли промышленности. Также результаты исследования будут полезны при изготовлении из карбида кремния емкостей, нагревательных элементов, полупроводниковых приборов, автомотодеталей и других изделий, работающих в агрессивных средах.

Осуществим SWOT – анализ позволяет оценить факторы и явления способствующие или препятствующие достижению успеха научного исследования. Сильные и слабые стороны исследования представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Матрица SWOT

Сильные стороны	Возможности
С1. Уникальность метода С2. Получение высококачественных изделий С2. Данная методика является экономически выгодной, ресурсоэффективной; С3. Возможность применения методики для большинства металлов С4. Методика является перспективной; С5. Меньшее время изготовления детали по сравнению с аналогами.	В1. Возможность получения патента; В2. Использование во многих отраслях; В3. Появление большого спроса на продукцию.
Слабые стороны	Угрозы
Сл1. Сложное оборудование; Сл2. Сложность подбора режима; Сл3. Нет возможности поставить обеспечить крупносерийное производство.	У1. Неправильный выбор режима У2. Рост стоимости сырья; У3. Не обеспечение нужного количества выпускаемых деталей.

По полученным данным можно сделать следующие выводы, что возможности, и сильные сторонами метода, способствуют развитию спроса.

Проведен комплексный анализ научного исследования. Самое большое негативное влияние оказывает возможность не подбора оптимального режима обработки деталей, вследствие чего, деталь будет не соответствовать техническим требованиям заказчика. Неотъемлемым плюсом считается, экологичность данной технологии, которая не несет каких-либо вредных воздействий на окружающую среду.

Что касаясь слабых сторон, то электронно-ионно-плазменное модифицирование имеет небольшое количество потенциальных потребителей из-за дороговизны и сложности метода, но, с развитием технологий, данная слабая сторона регулируется сама собой. Так же данный метод модификации не исключает фактор человеческой ошибки, т.к. всю работу нужно проводить, опираясь на опыт и знания оператора установки.

4.2 Планирование работ по НИР

Планирование исследования – это составление календарных планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их реализации, а также трудовых и материальных ресурсов.

Трудоемкость выполнения ВКР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит предположительный характер, т.к. зависит от множества факторов.

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости инновационной разработки. Поэтому необходимо определить трудоемкость работ каждого участника научного исследования.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (2)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i}, \quad (3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для определения трудоемкости выполнения исследования составим перечень основных этапов работы написания ВКР (Таблица 12).

Работу выполняло 2 человека: руководитель, студент-дипломник.

Таблица 10– Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение задания НИР	Руководитель, студент-дипломник
Проведение НИР			
Выбор направления исследования	2	Изучение поставленной задачи и поиск материалов по теме	Студент-дипломник
	3	Выбор моделей и способов анализа	Студент-дипломник, руководитель
	4	Календарное планирование работ	Руководитель, студент-дипломник
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка моделей для исследования	Руководитель, студент-дипломник
	6	Поиск методов решения	Студент-дипломник
	7	Реализация моделей	Студент-дипломник,
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ полученных результатов, выводы	Студент-дипломник
	9	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент-дипломник
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Студент-дипломник

Для удобства построения графика работ, необходимо построить диаграмму Ганта, представляющая из себя столбчатую диаграмму (гистограмму), которая используется для иллюстрации плана, графика работ по какому-либо проекту. Первый формат диаграммы был разработан Генри Л. Гантом в 1910 году.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого используется следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,478, \quad (5)$$

где $k_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году. В России в 2015-2016 годах было 118 праздничных и выходных дней.

Результаты расчетов представлены в таблице 11.

По результатам расчетов строится диаграмма Ганта, приведенная в таблице 12.

На основе анализа составленной диаграммы Ганта можно сделать вывод, что продолжительность работ составляет 11 декад, начиная с первой декады марта и заканчивая второй декадой июня. Можно предположить, что объем работ, в ходе исследования, может быть увеличен или наоборот сокращен, в зависимости от полученных результатов.

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

Номер этапа	Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}
		t_{min} , чел.-дни	t_{max} , чел.-дни	$t_{\text{ож}}$, чел.-дни			
1	Составление ТЗ	3	5	3,8	1	2	3
2	Изучение литературы	12	20	15,2	1	20	30
3	Составление этапов проекта	1	2	1,4	1	2	3
4	Проверка оборудования	1	1	1	1	1	1

5	Выполнение работы	1	2	1,4	1	1	2
6	Проведение исследований	3	7	4,6	1	20	30
7	Составление пояснительной записки	16	20	17,6	1	20	30
8	Проверка проекта	3	6	4,2	2	6	9
9	Сдача проекта	2	4	2,8	2	1	2
Итого							110

Далее по диаграмме Ганта можно рассчитать время работы для каждого исполнителя. Занятость исполнителей представлена в таблице 12.

Таблица 12 – Диаграмма Ганта

Но- мер этапа	Этап работы	Исполни- тели	Т _{к,к} ал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Март			Апр.			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление ТЗ	Руководитель	3												
2	Изучение литературы	Дипломник	30												
3	Составление этапов проекта	Руководитель	3												
4	Проверка оборудования	Руководитель	1												
5	Выполнение работ	Руководитель	1												
6	Проведение исследований	Дипломник	30												
7	Составление пояснительной записки	Дипломник	30												
8	Проверка проекта	Дипломник	9												
		Руководитель	9												
9	Сдача проекта	Дипломник	2												
		Руководитель	2												

Далее по диаграмме Ганта можно рассчитать время работы для каждого исполнителя. Занятость исполнителей представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Показатели рабочего времени исполнителей исследования

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней работы	19	101
Количество нерабочих дней за период выполнения проекта	6	30
Продолжительность выполнения проекта, в рабочих днях	13	71

Календарная продолжительность выполнения научного исследования составит 150 дней. Из них:

101 дней – занятость дипломника; 19 дней – занятость руководителя;

Продолжительность выполнения исследования в рабочих днях составит 103 дня. Из них:

13 дней – продолжительность выполнения работ дипломником; 71 день – продолжительность выполнения работ руководителем.

4.3 Составление сметы научного исследования

Составление сметы научного исследования является необходимым условием. Она должна отражать все расходы, связанные с выполнением данного исследования. В процессе формирования бюджета НИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- 1) амортизация;
- 2) электроэнергия;
- 3) полная заработная плата;
- 4) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 5) накладные расходы.

4.3.1 Амортизация

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_{об} = (Ц \cdot F_{ф}) / (F_{н} \cdot F_{сс}) \quad (6)$$

где Ц – цена оборудования, руб.;

$F_{н}$ – номинальный фонд времени (рабочее время в году), ч;

F_{cc} – срок службы оборудования, год;

F_{ϕ} – фактическое время занятости оборудования, ч. $F_n = 250$ дней = 6000 ч.

Вычисленная амортизация оборудования представлена в таблице 14. Данные взяты на основе отчета лаборатории.

Основная статья амортизационных отчислений приходится на микровизор, в связи с его постоянным использованием.

Таблица 14 –Амортизационные расчеты

Номер	Наименование оборудования	Ц, руб.	F_{cc} , год	F_{ϕ} , ч.	$Z_{об}$, руб.
1	Установка «Соло»	9 млн.	20	200	15000
2	Установка «Квинта»	400000	15	400	1778
3	Микротвердомер ПМТ-3	50000	10	1000	833
4	Шлифовально-полировальный станок	230000	15	1000	2556
5	Компьютер	15000	5	500	250
6	Микровизор металлографический μ Vizo - MET-221P	270000	5	900	8100
Итого:					28517

4.3.2 Электроэнергия

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = C \cdot N \cdot n \cdot t_{зан.ч.}, \quad (7)$$

где C — стоимость 1 кВт/ ч электроэнергии, руб;

N — мощность оборудования, кВт; n — количество единиц оборудования одного вида, ед.;

$t_{зан.ч.}$ — время занятости оборудования, ч.

Вычисленные затраты на электроэнергию представлены в таблице 15.

Таблица 15- Затраты на электроэнергию

	Наименование оборудования	Цена, Ц, р.	N , кВт	n	$t_{зан.ч.}$, ч.	Затраты, р.
1	Установка «Соло»	4,36	15	1	200	13080
3	Установка «Квинта»	4,36	40	1	400	69760
2	Микротвердомер ПМТ-3	4,36	1	1	1000	4360
3	Шлифовально-полировальный станок	4,36	3	1	1000	13080
4	Компьютер	4,36	0,3	1	500	654

5	Микровизор металлографический μVizo - MET-221P	4,36	3	1	900	11772
Итого:						112706

4.3.3 Полная заработная плата исполнителей

Заработная плата (оплата труда работника) — вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные выплаты и стимулирующие выплаты [26]. Или другими словами денежное поощрение труда работника.

Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (8)$$

где $Z_{осн}$ — основная заработная плата;

$Z_{доп}$ — дополнительная заработная плата (12-15 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (9)$$

где $Z_{осн}$ — основная заработная плата одного работника;

T_p — продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$ — среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \times M}{F_d}, \quad (10)$$

где Z_m — месячный должностной оклад работника в рублях.

M — количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб.дн. $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб.дн. $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d — количество рабочих дней в месяце (26 при шести дневной рабочей неделе, 22 при пяти дневной рабочей неделе), раб. д.;

$$Z_m = Z_{тс} \times (1 + k_{пр} + k_d) \times k_p, \quad (11)$$

где $Z_{тс}$ — заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$);

$k_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5.

$k_{р}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 16.

Таблица 16 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$, руб	$k_{д}$, руб	$k_{р}$, руб	$Z_{м}$, руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{р.}$ раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	20000	6000	4000	26000	39000	1773	13	23049
Дипломник	8000	2400	1600	10400	15600	709	71	50339
Итого $Z_{осн}$, руб.								73388

Расчет дополнительной заработной платы, размер которой составляет 12 – 15% от основной, представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	$k_{доп}$	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{зп}$, руб.
Руководитель	0,15	23049	3457	26506
Дипломник	0,12	50339	6041	56380
Итого $Z_{осн}$, руб.		73388	9,498	82886

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В соответствии с законодательством Российской Федерации обязательными являются отчисления в фонды: пенсионные, социального и медицинского страхования.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (12)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2016 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (23049 + 3457) = 7183$ рублей для научного руководителя;

$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (50339 + 6041) = 15279$ рублей для дипломника.

4.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергия, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}} = 289398 \cdot 0,16 = 46304, \quad (13)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Таким образом, величина равняется 46304 рублей.

4.3.6 Формирование бюджета затрат научного исследования

Еще на этапе планирования исследования должна быть составлена смета затрат. Это станет основой для формирования договора с заказчиком и является минимальным в рамках данного исследования.

Определение бюджета затрат на научное-исследование приведено в таблице 18

Таблица 18 – Смета научного исследования

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Амортизационные расчеты	28517
2. Электроэнергия	112706
3. Затраты по полной заработной плате исполнителей	82886
4. Отчисления во внебюджетные фонды	22462
5. Накладные расходы	46304
Бюджет затрат НИ	292875

Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию научного исследования составят 292875 рублей, из которых 141223 руб. приходится на амортизацию оборудования и затраты на электроэнергию, 82886 руб. на заработную плату исполнителей научного исследования, 46304 руб. на накладные расходы и 22462 руб. на отчисления в пенсионный и страховой фонды.

4.4. Эффективность работы

4.4.1. Оценка научно-технического уровня НТИ

Важнейшим результатом проведения НТИ является его научно-технический уровень, который характеризует, в какой мере выполнены работы и обеспечивается ли научно-технический прогресс в данной области. В последнее время для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НТИ, получил распространение метод бальных оценок. Бальная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НИР. Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент ее научно-технического уровня по формуле:

$$H_T = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (14)$$

где H_T — показатель научно-технического уровня, определенный по трем признакам;

R_i — весовой коэффициент i -го признака научно-технического эффекта;

n_i — количественная оценка i -го признака научно-технического эффекта, в баллах (таблицы 19, 20).

Таблица 19 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признак НТУ	Примерное значение весового коэффициента
1. Уровень новизны	0,5
2. Теоретический уровень	0,3
3. Возможность реализации	0,2

Таблица 20 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, способ	8-10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия, дополняют ранее полученные результаты	5-7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2-4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 21 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
1. Установка закона, разработка новой теории	10
2. Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ, взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
3. Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
4. Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
5. Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Результаты оценок признаков отображены в таблице 19.

Таблица 22 – Количественная оценка признаков НИОКР

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИОКР	K_i	P_i
1. Уровень новизны	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия	0,5	6
2. Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,3	7
3. Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,2	8
4. Масштабы реализации	Одно или несколько предприятий	0,2	2

Используя исходные данные по основным признакам научно-технической эффективности, определяем показатель научно - технического уровня:

$$H_m = 0,5 \times 6 + 0,3 \times 7 + 0,2 \times 8 + 0,2 \times 2 = 7,1 \quad (13)$$

Таблица 23 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень НТУ	Показатель НТУ
Низкий	1 - 4
Средний	4 - 7
Сравнительно высокий	7 - 10
Высокий	10 - 13

Таким образом, данная НИР имеет сравнительно высокий уровень НТУ, равный 7,1.

В ходе разработки данной главы были решены следующие задачи:

1. Проведена оценка коммерческого потенциала научного исследования при помощи SWOT-анализа. Выявлены потенциальные потребители ре-

зультатов НИ. Было показано, что наше НИ обладает рядом преимуществ: уникальность метода, получение высококачественных заготовок и образцов, малое время получения одной детали.

2. Составлен план научного исследования, разработан календарный план-график. Согласно разработанному плану объем запланированных работ реализуем за указанные сроки.

3. Рассчитан бюджет научного исследования. Стоимость исследования составляет 292875 рублей, из которых 141223 руб. приходится на амортизацию оборудования и затраты на электроэнергию, 82886 руб. на заработную плату исполнителей научного исследования, 46304 руб. на накладные расходы и 22462 руб. на отчисления в пенсионный и страховой фонды.

4. Определен показатель научно-технического уровня НИР, который является сравнительно высоким, что говорит о том, что выполненная работа обеспечивает научно-технический прогресс.

Таким образом, задачи, поставленные для осуществления цели раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», выполнены. Показано, что проведенное исследование является перспективным и целесообразным с точки зрения ресурсоэффективности.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 4БМ6Б	ФИО Кузичкину Евгению Евгеньевичу
-----------------	--------------------------------------

Инженерная школа	Новых производственных технологий	Отделение	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Материаловедение и технологии материалов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Научно-исследовательская работа проводилась в лаборатории плазменных источников ИСЭ СО РАН. В рабочей зоне размещается экспериментальная установка, импульсной модификации поверхности материалов электронным пучком «СОЛО», персональный компьютер, В качестве вредных факторов на рабочем месте рассмотрены: запыленность, повышенная пульсация светового потока в рабочей камере, рентгеновское излучение. В качестве опасных факторов на рабочем месте рассмотрены: электробезопасность, раскаленная стружка..</p>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>ГОСТ 12.0.003-74 СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 ГОСТ Р 54578-2011 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.548-96 СанПиН 2.2.2.542-96 СНиП 2.01.02-85</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>На этапе заготовки и предварительно обработки титановых образцов рабочий подвергается воздействию титановой пыли. В дальнейшем воздействие этой пыли может привести к развитию профессиональных бронхитов, пневмоний, аллергических ринитов, бронхиальной астмы, пылевых заболеваний глаз и кожи. На этапе заготовки образцов защитой от воздействия пыли служит устройство местной вытяжной вентиляции для удаления пыли непосредственно от места распиливания образцов. Рабочие, подвергающиеся влиянию пыли титана и его соединений, должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты органов дыхания. Рекомендуется использовать респиратор «Лепесток рабочие должны быть обеспечены перчатками и защитными очками. В качестве абразивного материала используются алмазные суспензии различной концентрации, которые, в силу своей влажности, являются фактором, препятствующим распространению титановой пыли и стружки. В процессе облучения материалов интенсивным</p>
--	---

	<p>импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» в рабочей камере происходит интенсивная световая пульсация, способная при длительном воздействии оказывать негативное влияние на зрительные органы работника, поэтому смотровое окно камеры оснащено специальной заслонкой, открываемой на короткое время лишь для контролирования процесса облучения работником.</p> <p>Рентгеновское излучение, возникающее при генерации импульсного электронного пучка, экранируется стенками камеры.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>На этапе заготовки рабочий подвергается воздействию раскалённой стружки и пыли; во избежание воздействия этих факторов помещение оснащено местной вытяжной вентиляцией, а рабочие снаряжены защитными халатами, перчатками и специальными очками Рабочий также может подвергнуться поражению электрическим током; .В помещении подавляющая часть проводки является скрытой, к тому же, кабель имеет двойную изоляцию, в помещении токонепроводящие полы, токоведущие части оснащены кожухами</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Титан способен токсическое воздействия на растения и человека, кроме того 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. В современных установках используются рабочие камеры все больших размеров, что позволит обрабатывать за один раз большее количество образцов, а, следовательно, и рабочее время установки.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	<p>При работе в лаборатории ИСЭ СО РАН наиболее вероятно возникновение ЧС техногенного характера. Наиболее типичные ЧС для лаборатории являются пожары. В целях предотвращения возгорания необходимо соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием. Предусмотренные средства пожаротушения (согласно требованиям противопожарной безопасности СНиП 2.01.02-85): огнетушитель порошковый ОУ-2, ящик с песком (в коридоре). Кроме того, каждое помещение оборудовано системой</p>

	<i>противопожарной сигнализации.</i>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<p><i>Рабочее место оператора установки оборудовано компьютерным столом, Высота рабочей поверхности над уровнем пола составляет 70 см. Глубина составляет 80 см, а ширина 60 см.. Кроме этого работник обеспечивается средствами индивидуальной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя: Обучается безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя. Имеет регламентированный режим работы – отдыха в течение рабочего дня, также между сменами. не привлекается к сверхурочной работе без его согласия, за исключением чрезвычайных ситуации Работник не привлекается к сверхурочной работе без его согласия, за исключением чрезвычайных ситуации. между сменами отдых - после окончания рабочего дня или смены. Ежедневный непрерывный отдых составляет не менее 42 часов, обеспечивается ежегодным оплачиваемым отпуском, составляющим не менее 28 календарных дней; ежегодным дополнительным оплачиваемым отпуском.</i></p>
Перечень графического материала:	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i>	<i>План эвакуации из рабочей зоны при пожаре</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОКид ИШХБТ ТПУ	Раденков Т. А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Б	Кузичкин Евгений Евгеньевич		

5 Социальная ответственность

Введение

В выпускной квалификационной работе рассматривается процесс модификации поверхности системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» Для выполнения данной разработки требовалось следующее: помещение размерами 8x5x3 м, модернизированная технологическая установка типа ННВ-6.6-И1, оснащенной плазмогенератором «ПИНК», установка «СОЛО» для импульсной модификации поверхности материалов электронным пучком. В разработке принимали участие двое человек, студент и руководитель проекта.

Осаждение металлической пленки толщиной 0,5 мкм на подложку SiC-керамики осуществляли на установке «КВИНТА» вакуумно-дуговым методом при испарении титанового катода.

Систему «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» облучали интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛО» при режимах: 15 Дж/см², 200 мкс, 20 имп, 15 Дж/см², 200 мкс, 30 имп.

В качестве предварительной обработки карбида кремния подвергались облучению электронным пучком на установке «СОЛО», затем подвергались ионной очистке и нагреву до заданной температуры ионами аргона в течение 15 мин при давлении 0,5 Па.

В качестве потенциальных потребителей результатов исследования могут выступать ядерная, военная, и металлургическая отрасли промышленности. Также результаты исследования будут полезны при изготовлении из карбида кремния емкостей, нагревательных элементов, полупроводниковых приборов, автомобилдеталей и других изделий, работающих в агрессивных средах.

В настоящем разделе рассматриваются вопросы охраны труда и техники безопасности, связанные с работой в помещении, содержащем энергетические установки. А также разрабатываются мероприятия по предотвращению воздействия на здоровье работников опасных и вредных факторов, создание безопасных условий труда для работников.

5.1 Техногенная безопасность

Таблица 24 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ по модификации поверхности сплава на основе титана электронно-ионно-плазменным методом

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1)Предварительная механическая подготовка образцов; 2)Обработка образцов на энергетических установках;	1. Повышенная запыленность воздуха рабочей зоны. 2.Повышенная пульсация светового потока в рабочей камере установки «СО-ЛО»;	1.Электрический ток. 2.Раскаленная стружка	1.Запыленность и загазованность рабочей зоны регулируется ГОСТ Р 54578-2011

Вдыхание паров метатитанатной кислоты и оксихлорида титана вызывает полнокровие слизистой оболочки гортани, голосовых связок и трахеи с последующим рубцеванием и позднее наступающим ларингостенозом.

Таблица 25 – Предельно допустимые концентрации и класс опасности веществ, воздействию которых подвергается рабочий

Вещество	Класс опасности	ПДК
Титановая пыль	5	10 мг/м ³
Метатитановая кислота	0	0
Хлорид титана	8	1 мг/м ³

Галогениды титана, попавшие на кожу, необходимо, не размазывая, удалить тампоном из ваты или промокательной бумагой, после этого тщательно промыть кожу проточной водой. При попадании в глаза необходимо тщатель-

ное промывание проточной водой при хорошо раскрытой глазной щели около 10 минут, либо изотоническим раствором хлорида натрия. При попадании внутрь — обильное питье жидкости, молока (по возможности с несколькими взбитыми сырыми яйцами). После рвоты — активированный уголь (Лудевиг, Лос).

На этапе заготовки и предварительно обработки титановых образцов рабочий подвергается воздействию титановой пыли. В дальнейшем воздействие этой пыли может привести к развитию профессиональных бронхитов, пневмоний, аллергических ринитов, бронхиальной астмы, пылевых заболеваний глаз и кожи. Пыль может оказывать влияние на органы зрения, вызывать воспалительные процессы (конъюнктивиты), профессиональные катаракты, вызвать сильную сенсibiliзирующего действие на слизистую оболочку и роговицу глаза. Загрязняя кожные покровы, пыль оказывает раздражающее, сенсibiliзирующее и фотодинамической действие (дерматиты, аллергические дерматиты и экземы, фотодерматиты открытых участков кожи). Проникновение пыли в сальные потовые железы вызывает нарушение потовыделительной функции кожи. Пыль может проявлять чисто механическое воздействие - острыми краями нарушать целостность слизистой оболочки верхних дыхательных путей, глаз.

На этапе заготовки образцов защитой от воздействия пыли служит устройство местной вытяжной вентиляции для удаления пыли непосредственно от места распиливания образцов. Рабочие, подвергающиеся влиянию пыли титана и его соединений, должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты органов дыхания. Рекомендуется использовать респиратор «Лепесток», при работе с хлоридом титана (IV) — противогаз. При работе с горячим раствором хлорида титана (IV) рабочие должны быть обеспечены перчатками и защитными очками. В качестве абразивного материала используются алмазные суспензии различной концентрации, которые, в силу своей влажности, являются фактором, препятствующим распространению титановой пыли и стружки.

В процессе облучения материалов интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» в рабочей камере происходит интенсивная световая пульсация, способная при длительном воздействии оказывать негативное влияние на зрительные органы работника, поэтому смотровое окно камеры оснащено специальной заслонкой, открываемой на короткое время лишь для контролирования процесса облучения работником.

Рентгеновское излучение, возникающее при генерации импульсного электронного пучка, экранируется стенками камеры.

Основным опасным фактором является опасность поражения электрическим током. Исходя из анализа состояния помещения, данную лабораторию по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

В помещении подавляющая часть электрической проводки является скрытой. Поражение электрическим током возможно только при возникновении оголенных участков на кабеле, а также нарушении изоляции распределительных устройств, однако в лаборатории кабель имеет двойную изоляцию, поэтому опасность поражения значительно снижается. Не исключается также опасность поражения и от токоведущих частей компьютера в случае их пробоя и нарушении изоляции. В помещении токонепроводящие полы, отсутствует токопроводящая пыль, отсутствует электрически активная среда, отсутствует возможность одновременного прикосновения к металлическим частям прибора и заземляющему устройству, отсутствует высокая температура и сырость. Для защиты от поражения электрическим током все токоведущие части защищены от случайных прикосновений кожухами, корпус устройства заземлен. Заземление выполняется изолированным медным проводом сечением $1,5 \text{ мм}^2$, который присоединяется к общей шине заземления с общим сечением 48 мм^2 при помощи сварки. Общая шина присоединяется к заземлению, сопротивление которого не превышает 4 Ом. Питание устройства осуществляется от силового щита через автоматический предохранитель, срабатывающий при коротком замыкании нагрузки. Для устранения опасности поражения электрическим током ре-

гулярно проводится осмотр кабелей, проводов, электрических розеток и токоведущих частей установок и приборов. А также, перед началом работы каждый работник проходит инструктаж по технике безопасности.

На этапе заготовки образцов рабочий подвергается воздействию раскаленной титановой стружки в процессе резания титановых брусков.

Во избежание попадания раскаленной стружки на кожу рабочий производит резание в специальном защитном халате и перчатках. Также для защиты от попадания стружки в глаза, он использует специальные очки

5.2 Региональная 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.

5.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности

Метеорологические условия (микроклимат), определяющие следующие параметры: температура воздуха в помещении; относительная влажность воздуха согласно СанПиН. Так как эти параметры напрямую зависят от габарит-

ных 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.

Расчет искусственного освещения производственного помещения производился методом коэффициента использования светового потока:

Подсчитает потребное число светильников

$$N = \frac{E_H * S * K * Z}{n * F_{л} * \eta} \quad (14)$$

где E_H - нормированное значение освещенности, лк;

S - освещаемая площадь помещения, м;

K - коэффициент запаса;

Z - коэффициент неравномерности распределения светового потока по освещаемой поверхности;

η - коэффициент использования светового потока в долях единицы n - 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.

$$S = 8 \cdot 5 = 24 \text{ м}^2$$

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 индекса помещения i находят η .

Для данного помещения:

$$r_p = 50\%$$

$$r_c = 30\%$$

Индекс помещения определяется исходя из его размеров:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (15)$$

где A и B - ширина и длина помещения, м; h - расчетная высота подвеса светильника, м;

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

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

$$N = \frac{300 * 40 * 1,5 * 1,1}{4 * 1200 * 0,35} = 12 \quad (16)$$

Определим число светильников в одном ряду:

$$N_p = \frac{N}{C}, \quad (17)$$

где C - число рядов светильников в помещении.

$$N_p = \frac{300 * 40 * 1,5 * 1,1}{4 * 1200 * 0,35} = 12$$

Длина светильников в одном ряду

$$L = N \cdot l, \quad (18)$$

где l - длина выбранного типа светильника, м.

$$L = 3 * 0,0604 = 0,18 \text{ м}$$

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

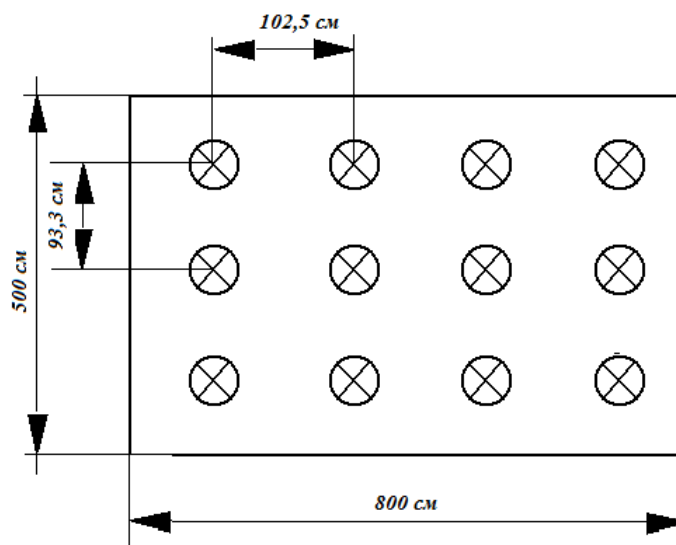


Рисунок 26 – Схема размещения светильников ЛБ-20

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 Особенности законодательного регулирования проектных решений.

Рабочее место в лаборатории было оборудовано следующим образом: рабочая поверхность представляет собой компьютерный стол, позволяющий управлять модернизированной технологической установкой «СОЛО» с выдвижной поверхностью для клавиатуры. Высота рабочей поверхности над уровнем пола составляет 70 см. Глубина составляет 80 см, а ширина 60 см. Эти параметры соответствуют санитарным правилам и нормам,

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ каждый работник обеспечивается рабочим местом, соответствующим требованиям охраны труда: регламентированным рабочим пространством, столом, стулом, компьютером, для управления установкой «Соло». Кроме этого работник обеспечивается средствами индивидуальной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя: в данном случае халатом, защитными очками, перчатками из по-

лимера. Обучается безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя. Работник не привлекается к сверхурочной работе без его согласия, за исключением чрезвычайных ситуации. Продолжительность перерыва для отдыха и питания варьируется от 30 минут до одного часа. Имеет место ежедневный и междуменный отдых - после окончания рабочего дня или смены. Ежедневный непрерывный отдых составляет не менее 42 часов. Работник обеспечивается ежегодным оплачиваемым отпуском, составляющим не менее 28 календарных дней; ежегодным дополнительным оплачиваемым отпуском.

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При эксплуатации установке «СОЛО» 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, нагрева оболочек 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 (огнетушители 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 НИИ ТПУ, 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 возгорающих 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 27.

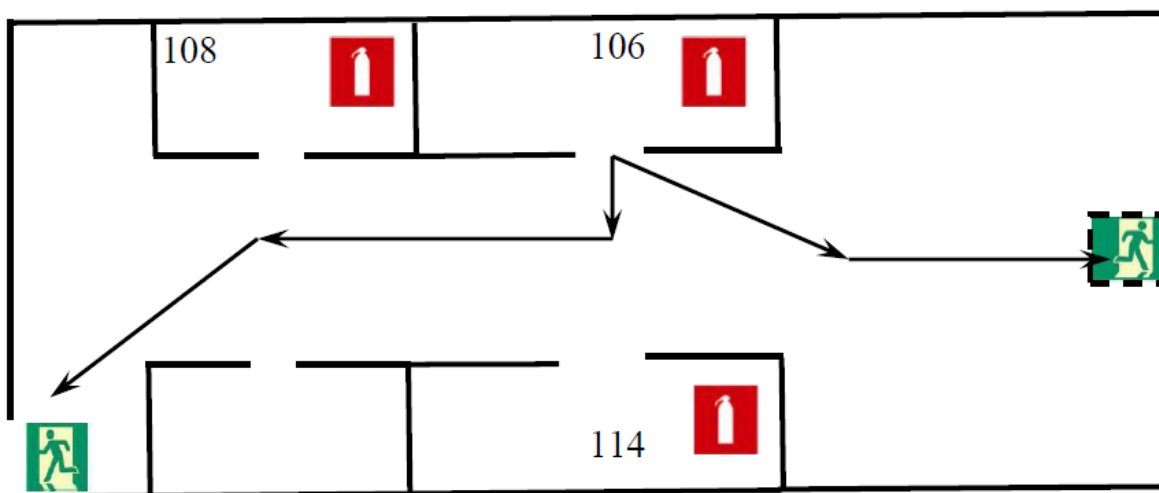


Рисунок 27 – План эвакуации рабочих помещений

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)-АВСЕ-02 (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:

1. Баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких-либо предметов.

2. 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.

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

Заключение

В результате работы над магистерской диссертацией были решены следующие задачи:

- 1 Изготовлены методом SPS керамические образцы из порошка карбида кремния;
- 2 Осуществлена шлифовка и полировка полученных образцов до зеркального состояния на шлифовально-полировальном станке «Полилаб»;
- 3 Принято участие в напылении титановой пленки толщиной 0,5 мкм на подложку из карбидокремниевой керамики на установке «КВИНТА» вакуумно-дуговым методом при испарении катода из технически чистого титана марки ВТ1-0;
- 4 Принято участие в облучении интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛО»:
 - а) керамики из карбида кремния, полученной методом SPS, при различных плотностях энергии пучка: 10, 15, 20 Дж/см², одинаковом количестве и длительности импульсов – 3 имп., 200 мкс соответственно;
 - б) системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка» при различном количестве импульсов: 20 имп. и 30 имп., одинаковой плотности энергии пучка электронов 15 Дж/см² и длительности импульса 200 мкс;
- 5 Принято участие в исследовании полученных образцов (структура, фазовый состав поверхностного слоя керамики, морфология, дефектная субструктура,) методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа;
- 6 Определены физико-механические характеристики SiC-керамики и системы «пленка (титан) / (SiC-керамика) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком.

В результате выполненных исследований:

1. Установлено, что облучение SiC-керамики интенсивным импульсным электронным пучком (18 кэВ, 200 мкс, 0,3 с⁻¹, 3 имп., (10, 15, 20) Дж/см²) сопровождается:

- закономерным изменением полиморфного состава (увеличение более чем в два раза, по сравнению с исходным материалом, относительного содержания поли типа α -SiC-15R);

- фрагментацией и наноструктурированием поверхностного слоя;

- увеличением твердости и модуля Юнга.

Высказано предположение, что одной из причин зафиксированных преобразований материала при облучении керамики интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия являются релаксационные процессы, вызванные термомеханическими напряжениями, возникающими в поверхностном слое материала в результате высокоскоростных нагрева и охлаждения, имеющих место при облучении.

2. Установлено, что облучение системы «пленка (Ti) / (SiC-керамика) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком (15 Дж/см²; 200 мкс; 0,3 с⁻¹; 20 имп.) приводит:

- к формированию поверхностного слоя, имеющего многоэлементную многофазную структуру субмикро- наноразмерного диапазона;

- к формированию поверхностного слоя, микротвердость которого изменяется в пределах от 33 ГПа до 96 ГПа.

Список публикаций

Леонов А. А., Кузичкин Е. Е., Иванов Ю.Ф. Эволюция структурно-фазового состояния поверхностного слоя керамики из карбида кремния при облучении интенсивным импульсным электронным пучком // Фундаментальное материаловедение и материалы: сборник тезисов Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018». – г. Москва, 9-13 апреля 2018.

Леонов А. А., Кузичкин Е. Е., Иванов Ю.Ф. Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2018» (С-Петербург, 5-7 июня 2018 г.).

Леонов А. А., Кузичкин Е. Е., Иванов Ю.Ф. Структурно-фазовые преобразования поверхностного слоя SiC-керамики при электронно-пучковой обработке // Материаловедение: 24 Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. – Томск, 31 марта – 7 апреля.

Список использованных источников

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. – М.: Metallurgy, 1977. – 215с.
2. Лучинин В. Профессиональное ориентирование nanoиндустрии // Nanoиндустрия. – 2010. – №4 – С. 36-39.
3. Зборщик А.М. Новые материалы в металлургии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://uas.su/books/newmaterial/142/razdel142.php>. – 25.08.12.
4. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Metallurgy, 1984. – 256 с.
5. Грибков В.А. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
6. Мой диплом вставить
7. Гаршин А.П. Керамика для машиностроения. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 381 с.
8. Singer F. Ceramic Building Materials. – Springer, Dordrecht, 2017. – С. 1066-1088.
9. Матренин С.В. Техническая керамика. – Томск: ТПУ, 2004. – 75 с.
10. Студопедия. Бескислородная керамика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.org/4-85323.html>. – 18.11.14.
11. Jankovský O. Properties of oxygen-free ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – V 34. – P. 4131-4136.
12. Калагур Е. С. Влияние пористости на структурно-фазовое состояние, деформацию и разрушение пористой керамики $ZrO_2(Me_xO_y)$: Автореф. дис. канд. тех. Наук. – Томск, 2013. – 144 с.
13. Федосова Н. А. Разработка и математическое моделирование процесса получения керамоматричного композита, армированного углеродными нанотрубками: Автореф. дис. канд. тех. наук. — Москва, 2016. — 270 с.

14. Андриевский Р. А. Порошковое материаловедение. – М.: Металлургия. 1991. – 205 с.
15. Adamiano A. Stabilization of cubic Silicon Carbide // J. Phys. Chem. Solid. – 1965. – V.26. – P.669-672.
16. Elder P. Effect of Surface Area on Densification of P-SiC Powders in the Presence of B and C. //Br. Ceram. Trans. J. – 1992. – No.3. – P.67-71.
17. Двилис, Э. С. Развитие теоретических основ и разработка способов холодного одноосного прессования порошковых материалов с применением ультразвукового воздействия: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2002. – 240 с.
18. Бадашкеева Е. М. Гиперпрессованные эффективные материалы на основе малопластичных глин: Автореф. дис. канд. тех. наук. Улан-Уде, 2004. – 160 с.
19. Двилис Э. С. Закономерности процессов консолидации порошковых систем при изменении условий деформации и физических воздействий: Автореф. дис. д. ... физ.-мат. наук. Томск, 2014. – 386 с.
20. Московских Д. О. Получение субмикронного порошка карбида кремния и наноструктурированной керамики на его основе: Автореф. дис. канд. тех. наук: - Москва, 2015. – 166 с.
21. Балкевич В.Л. Техническая керамика. – М.: СИ. 1968. – 200 с.
22. Chakrabarti O.P. Effects of fabrication parameters in controlling the ultimate properties of reaction Silicon Carbide. – M: Indian Ceram. Soc, 1996. – P. 487-493.
23. Горшков В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений. - М.: Высш. шк. 1988. – 400 с.
24. Heinz U. C. Field Assisted Sintering Technology (“FAST”) for the consolidation of innovative materials // International Journal of Thermophysics. – 2004. – № 15 – С. 130-133.

25. Перевислов Д.Д. 2013 г. Получение материалов на основе SiC и Si₃N₄ методом высокоимпульсного плазменного спекания // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. - № 5 – С. 60-68.
26. Хасанов О.Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий. – М.: Бином. Лаборатория знаний. 2015. – 269 с.
27. Овсянников Д. А. Высокотвердая керамика на основе карбида бора и производных фуллерита // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59. – №. 2. – С.318-322.
28. А.А. Качаев. Производство керамики из карбида кремния методом SPS с добавлением субмикронных порошков // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – №2. – С. 51-52.
29. Speyer R.F. Flexural Strength, Fracture Toughness, and Hardness of Silicon Carbide and Boron Carbide Armor Ceramics // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2010. – № 5. – С. 643– 651.
30. Нешпор В.С. Физико-механические характеристики высокотвёрдых поликристаллических материалов // Огнеупоры и техническая керамика. – 1995. – № 5. – С. 2–5.
31. О. Л. Хасанов. Определение оптимальных режимов изготовления высокоплотной керамики из порошка карбида бора методом спекания в плазме искрового разряда // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 2. – С. 58 -63
32. Хасанов О. Л. Метод компактирования и консолидации наноструктурных материалов изделий. – М.: ТПУ, 2008. – 212 с.
33. Филимонов С. Ю. Закономерности формирования структуры и свойств поверхностного слоя стали 45, модифицированной методами электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки: Автореф. дис. ...канд. тех. наук. – Томск, 2013. – 20 с.

34. Карпий С В. Особенности поверхностного упрочнения титана при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке: Дис. ... канд. тех. наук. – Новокузнецк, 2011. – 150 с.
35. Овчаренко В. Е. Исследование влияния длительности импульса электронно-пучкового облучения на стойкость металлокерамических пластин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. - Т.13. - №13. – С.687 – 691.
36. Гынгазов С.А. Радиационно-термическая активация диффузионного массопереноса в оксидной керамике: Дис. ... д. тех. наук. – Томск, 2011. – 253 с.
37. Гынгазов С.А. Ионная обработка циркониевой керамики мощными импульсными пучками // Журнал технической физики. – 2015, Т.1 – №113. – С. 200-2012.
38. Remnev G.E. Application of high-power ion beams for technology // Laser and Particle Beams. – 1993. – V. 14. – №4. – P. 707–731.
39. Mazur R.G., Dickey D.H. A Spreading Resistance Technique for Resistivity Measurements on Silicon // J. Electrochem. Soc. – 1966. – Vol. 113. – № 3. – P. 255–259.
40. Саврук Е.В. Структура и свойства поликристаллического α - Al_2O_3 , модифицированного мощным лазерным излучением: Автореф. дис. ...канд. тех. наук. – Томск, 2013. – 24 с.
41. Мурзин С. П. Модификация поверхности деталей из карбида кремния лазерным воздействием с целью улучшения их трибологических свойств // Вестник самарского государственного университета. – 2014. – Т.1. - №11. – С 9-17.
42. Александров А.Ф. Основы Электродинамики плазмы. – М.: ОмГТУ, 2003. – 112 с.
43. Пузурьков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: МГТУ им. Баумана Н.Э., 2003. – 120 с.

44. Чесов Ю. С. Исследование структуры износостойких плазменных покрытий из механических смесей // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – Т.1. - № 2. – С. 96 – 105.
45. Белый А. В. Структура и методы создания износостойких поверхностных слоев. – М.: Наука и техника, 1991. – 175 с.
46. Белый А. В. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. – М.: Наука и техника, 1997. -185 с.
47. Bernard, F. Dense nanostructured materials obtained by spark plasma sintering and field activated pressure assisted synthesis starting from mechanically activated powder mixtures // Sci. Sintering. – 2004. – V. 36. – P.155-164.
48. Borisov D.P. Plasma-Assisted Deposition of a Three-Layer Structure by Vacuum and Gas Arcs // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1998. – V. 26. – № 6. – P. 1680-1684.
49. Бурдовицин, В. А. Структура поверхности алюмооксидной керамики при облучении импульсным электронным пучком // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып.1. – С. 117--120.
50. Видяев И.Г., Серикова Г.Н. Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. - Томск:Изд-во ТПУ.-2014.-36с.
51. Котлер Ф., Бергер Р., Бикхофф Н. Стратегический менеджмент по Котлеру. Лучшие примеры и методы. - Альпина Паблишер.-2012.-143 с.
52. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;
53. ГОСТ Р 54578-2011 Воздух рабочей зоны. Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия. Общие принципы гигиенического контроля и оценки воздействия
54. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)
55. Шум на рабочих местах, в помещениях, жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки;

56. СанПиН 2.2.2.542-96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации;
57. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение
58. Типовая инструкция по охране труда для пользователей персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ) Технический регламент о требованиях пожарной безопасности
59. СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы ЭВМ

Приложение А
(Справочное)

Раздел 1
Review of the literature

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Б	Кузичкин Евгений Евгеньевич		

Консультант отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Парнюгин А.С.	к.п.н.		

Консультант – лингвист отделения материаловедения ИШ НПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения ма- териаловедения	Лямина Г.В.	к.х.н.		

Introduction

Due to unique combinations of physical and mechanical properties, silicon carbide ceramics are widely used in various industries: in machine building, nuclear power, defense industry enterprises and power electronics [1, 2].

The most important flaws of silicon carbide ceramics are its fragility and, as a result, low crack resistance, as well as the complexity of processing. In addition, silicon carbide ceramic is unsuitable for work under cyclic loads, as well as mechanical or thermal shocks. At the same time, it has excellent resistance to corrosion, low thermal conductivity and high heat resistance, which ensures its successful use as thermal protection elements [3].

To improve the physical, mechanical and tribological properties of a part made of ceramic materials, in particular silicon carbide, in some cases it is sufficient to increase the properties of only its surface. The main, at the present stage of the development of science and technology, methods of modification of the surface of silicon carbide and materials based on it are coating deposition, laser treatment, implantation and the method of diffusion saturation of the surface layer with doping elements [4,5].

1.1 Classification of the ceramic materials

In the broadest sense, all ceramics are products which are obtained by sintering powders of the first starting materials or other materials based on them (clays, silicates, quartz, etc.), (pure oxides, carbides, nitrides, etc.) at temperatures well below the melting point (softening, decomposition or sublimation) of these substances or materials. Therefore, a wide range of the composite materials can be used in ceramics, the components of which can differ significantly in their compositions and properties, and all the products obtained from them have not only the sum of all the properties of the initial materials, but principally new ones. This feature makes it possible to have broad prospects for the use of ceramics in many industries, for example, in machine building, because it always uses materials which have the highest strength, elasticity, chemical stability, high-temperature strength and melting point [7, 8].

Ceramic materials by chemical composition are divided into 2 groups:

1. Oxide ceramics. These materials consist of pure oxides (for example, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , CaO , BeO , ThO_2 , TiO_2), oxides of rare earth metals, and their mixtures ($\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, etc.), and also like as solid solutions ($\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{-MgO}$, etc.);

2. Non-oxide ceramics. Nitrides, carbides, silicides, borides, phosphides (transition metals and non-metals of III-VI groups of Mendeleev's periodic system).

Also ceramics is divided according to its functional purpose:

1. Construction;
2. Chemically resistant;
3. Thin;
4. Technical;
5. Refractory.

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

1. Constructional ceramics;
2. Instrumental ceramics;
3. Electroradiotechnical ceramics.

Ceramics are divided into "traditional" and "a new-type ceramic". The "traditional" ceramics are used in constructions, metallurgy and the chemical industries. The second "new-type ceramic" is used in engineering, in the space electronics and aviation industries as a structural and instrumental material. Traditional and electro-technical ceramics are mainly oxide, and "new" ceramics can be oxide and non-oxide [9].

1.2 The structure and properties of the ceramic materials

1.2.1 The structure of anoxic ceramic

To the refractory oxygen-free compounds are compounds of elements with carbon (MeC) – carbides, with boron (MeB) – borides, with nitrogen (MeN) – nitrides, with silicon (MeSi) – silicides and with sulfur (MeS) – sulfides. These compounds are different by a high refractoriness (2500 ... 3500°C), hardness (sometimes as in the diamond) and wear resistance with respect to aggressive media. The materials are highly brittle. The resistance to oxidation at high temperatures (scale resistance) of carbides and borides is more than 900...1000°C, and lower for nitrides. The silicides can withstand a temperature of 1300...1700°C (a silica film is formed on the surface) [10, 11].

The sintered ceramic material usually consists of an amorphous (glassy) phase and a crystalline phase. The crystalline phase represents certain chemical compounds, implantation phases and solid solutions. Sintered ceramics contain pores. They are divided into:

- open-pores that communicate with the environment;
- closed-pores that do not communicate with the environment.

In some ceramic materials, porosity is formed purposefully, for example, in ceramic filters. In other types of ceramics, for example refractory, a certain porosity is allowed, which doesn't reduce the operational properties of the finished products. In porcelain and ceramic design technology, porosity is a negative moment and it determines the strength of the products.

The density and porosity of ceramics are characterized by these 5 following indices:

1. The true or theoretical density, g/cm^3 is the density of the material without their pores;
2. The apparent density is the density of the material with their pores;
3. The relative density is the ratio of apparent and the true densities;

4. The true porosity of “Pi” is the sum of all the pores by volume to the total volume of the material, expressed as a percentage or fractions;

5. The apparent or open porosity is the volume of the open pores filled with some water during boiling, which is expressed as a percentage of the total volume of that material [12].

1.2.2 The mechanical properties

At the room temperature, after a slight elastic deformation, the ceramic is one of the brittle fracture (unlike metals that can be largely subjected to a plastic deformation) under the influence of mechanical stresses. Strength properties of the ceramics are characterized, in particular, by the values of the ultimate strength for bending and compression.

The microstructure of the ceramics has a significant influence on the properties, like as: grain size, porosity, content and composition of the glass-phase. With a decrease in grain size and an increase in the content of crystalline phases, the strength of the material also increases.

One of the main characteristics of the strength of the ceramics is the crack resistance - the ability of the material to withstand the spread of cracks. This value is characterized by a critical stress intensity factor K_{Ic} [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$].

The third of the important characteristic determining the level of mechanical properties of the ceramics is its hardness. When the diamond indenter is pushed into the surface of the ceramic, plastic deformation of the material occurs. The resistance of the material to this deformation is the hardness, which is mainly measured by the Vicker's method (H_V).

Also, the mechanical properties of the ceramics can be estimated by the using of the elastic modulus E (or Young's modulus).

The modulus of elasticity is determined by the formula:

$$\varepsilon = \sigma/E, \quad (2)$$

where “ ε ” is the elastic deformation,

“ σ ” is the normal stress.

1.2.3 Thermomechanical properties

As that the most of the ceramic materials are operated at high temperatures, it's necessary to evaluate the thermomechanical properties of the parts. The properties are evaluated with the help of the following characteristics: the strength of the ceramics at its service temperatures, the deformation temperature under load and creep.

As well as the strength at ordinary temperature, the strength of the ceramic at operating temperatures is determined by the bending /compression strength limit. By the loading at elevated temperatures (above 1000°C), the ceramic material undergoes plastic deformation, in contrast to the behavior of the ceramics at room temperature (20°C).

The thermal stability of the ceramic materials is determined by such parameters as: a heat capacity, thermal expansion, thermal conductivity, thermal diffusivity.

1.2.4 Chemical and electrophysical properties

The electrophysical properties of the ceramics include such quantities as dielectric permittivity ϵ , the temperature coefficient of permittivity TK_{ϵ} , specific resistance ρ (Om*m), a dielectric losses ($\tan \delta$), electric strength or breakdown tension ($E_{str.}$)

The electrophysical properties of the ceramics depend on the structure and the composition of the crystalline phases. The crystalline phases are crystals with ionic or covalent bonds. The free electrons in the ceramic materials are practically absent.

As the temperature increases, the electrical conductivity increases and since the movement of ions increases as a result of heating.

The electrical strength of the ceramics is the resistance of the material to the action of an electric field, which is expressed by the ratio of the breakdown voltage to the thickness of the dielectric.

The common chemical interactions of the ceramics and other substances are:

1. The interaction with acids and alkalis. The investigation of the corrosion resistance of all materials in various alkali and acid solutions to assess the possibility of manufacturing the parts of a various chemical equipment, bearings operating in corrosive environments, etc.

2. The interaction with the melts. Oxygen-free ceramics are also used to manufacture parts that will be in contact with the metal melts.

3. The interaction with gases. In many cases, the ceramics should be resistant to the action of the gaseous halogens, sulphurous gas, nitrogen oxides, various hydrocarbons, etc. The durability of the ceramics depends on its first chemical nature, as well as on its structure.

The oxide ceramics are not subject to oxidation. Oxygen-free construction ceramics is oxidized, if it's heated in air to high temperatures. Because of the high corrosion resistance of ceramic materials, it is very difficult to assess the degree of their corrosion damage by the changing the mass of the samples, the depth of penetration of corrosion, the number of foci of corrosion per unit surface area, etc., as is done for the metals. The oxidation can not only worsen the properties of the ceramics, but also improve its strength, and, consequently, improve the operability of the ceramic product. Therefore, it is possible to evaluate the effect of a corrosion on the performance of the ceramics only by changing its mechanical characteristics.

1.2.5 Application area

The most widely ceramic materials are used in the manufacture of the parts of an internal combustion engines and the gas turbine engines, cutting tools, etc.

For a number of properties: inertia in the process of cutting (to most metals), wear resistance and hardness (including heating) the ceramics is exceeding of materials used traditionally for the manufacture of the cutting tools is hard alloys and high-speed steels. These advantages of the cutting ceramics provide a high speed of the machining of the cast iron and steel.

The cutting ceramic plates are equipped with turning tools, cutters, special tools and boring heads.

The most effective ceramics is used for manufacturing a high-temperature gas turbine and diesel adiabatic piston engines (having ceramic insulation).

With the use of the ceramics for the manufacture of engines, therefore of the increased operating temperature, their efficiency is increased, and for the ceramic engines the cost of the cooling system is so much lower (or non-existent), than for the conventional engines. In addition, improving the tactical and technical characteristics of aircraft engines is impossible without the use of ceramic materials.

Isuzu company (Japan) has developed a ceramic gasoline-diesel engine, which has a combustion efficiency of 50% higher and a mass of 30% less than a conventional engine. This engine can reach speeds of up to 150 km / h.

To produce containers with a radioactive waste, armor-ceramics for military equipment and thermal protection of the rocket space vehicles, ceramics of a special purpose are used. Also, this type of the ceramics includes superconducting ceramics.

Containers for storage of radioactive waste are made of the ceramics based on oxide and boron carbide by mixing with lead oxide or compounds of the type $2\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$. Such sintered ceramics are characterized by high density, low porosity and strong absorbing power with respect to the neutrons and γ -quanta.

The high hardness of ceramic materials, as well as the melting point and the modulus of elasticity, determined their use as an armor protecting even from armor-burning projectiles due to the preservation of the heat resistance. The highest protective properties have materials based on boron carbide used when it is necessary to significantly reduce the weight of armor protection (protection of seats and automatic control systems for helicopters, crew and landing). Ceramics from titanium diboride has the greatest hardness and modulus of elasticity and is used to protect against heavy armor-piercing and armor-burning tank shells.

For the protection of manpower, land and naval military equipment use ceramics based on aluminum oxide because of its low cost.

To increase the reflectivity, strength and ablation characteristics of the surface of heat-shielding materials, they are covered with a layer of enamel with a thickness of about 300 μm containing SiC or 94% SiO_2 and 6% B_2O_3 and sintered at 1470 K.

Such coatings are used in the most heated places of spacecraft, ballistic missiles and hypersonic aircraft. They can withstand up to 500 ten-minute heating in an electric arc plasma at a temperature of 1670 K.

1.3 The sintering of anoxic ceramics.

1.3.1 The methods of forming anoxic ceramics.

The pressing of powder materials is one of the main methods for the production of ceramic products. A distinctive feature of this method is the complete combination of the process of compaction, hardening and giving the workpiece a final shape form by effectively applying large ones, when acting on the molded system [14-16].

For a number of ceramic manufactures, the task of further expanding the possibilities of methods for pressing powder materials in closed rigid molds is very relevant for obtaining pressings of particularly high density and strength, which make it possible to significantly increase the density of finished articles or reduce shrinkage during sintering, duration and sintering temperature [17].

To solve these problems, research, development and introduction into production of a number of promising and pressing methods are underway, which are divided into the following: cold pressing in the closed molds, one-sided pressing, two-sided, impact, explosive, magnetic-pulse, quasi-isostatic and ultrasonic pressing, and slip casting, etc [18].

The method of hot pressing (HP) produces ceramic products with a small density difference in volume. This method is actively used for the production of structural ceramics based on refractory compounds, combining the operations of molding and sintering products in the molds, which allows a significant reduction in the cost of products. The result of hot pressing is the products having very good strength properties. However, this method is characterized by the low productivity and for its implementation it's necessary to use heat-resistant rapidly wearing expensive molds. Consequently, the use of this method is advisable only for certain types of technical ceramics, the production of which by other methods is technically impossible [19].

1.3.2 Methods of sintering.

1.3.2.1 The method of self-propagating high-temperature synthesis (SPHTS).

The self-propagating high-temperature synthesis (SPHTS) is one of the most effective methods of obtaining ceramics, as well as composites based on it. It has significant advantages over traditional powder metallurgy technologies, such as: a short synthesis time, low energy consumption, high purity products simplicity of process equipment.

The distinctive feature of the mode of a layer-by-layer combustion is a self-sustaining rapidly spreading stable exothermic wave chemical reaction passing through a heterogeneous mixture of reagents, which leads to the synthesis of the desired materials. The temperature of such a wave reaction, as a rule, reaches about 2000-4000 K.

With the volumetric combustion, the reaction occurs immediately over the entire a volume after uniform heating of the sample. This method is sometimes called the thermal explosion mode. So, the term "explosion" refers to a rapid rise of the temperature, and isn't a process of the destruction.

The dried powders of the starting reagents are mixed until the highest uniformity is achieved, then the resulting mixture is loaded into a reactor which is sealed and evacuated, then the reactor is filled with an inert or reactive gas, the local initiation of the reaction is usually carried out by tungsten wire [20].

1.3.2.2 Reaction Sintering

Reactive sintering is used when firing ceramics, for example, based on SiC, Si₃N₄, and some other oxygen-free compounds.

The specificity of the process of the reaction sintering is that in order to realize this method, active mass exchange between the solid and gas phase of the sintered article is necessary. Therefore, the denser and larger the article, the higher the degree of sintering and, consequently, the less porosity, the more difficult this process goes through.

The condensation of a matter in reaction sintering, unlike other types of sintering, isn't due to the spatial redistribution of matter, but due to the formation of a new phase as a result of the chemical reaction between the solid substance, and the impregnating gas phase of another substance. If, as a result of such a reaction, products are formed that have a large mass and volume in comparison with the reacting solid, they fill the pores of the caking body and increase its density [21-23].

To obtain the so-called "self-bonded" silicon carbide, the sintering of the compacts made of SiC and carbon in the presence of the silicon is carried out by the method of the reaction sintering. Secondary SiC and recrystallization of SiC through a silicon melt occurs and as a result, non-porous materials are formed, containing about 5-15% free silicon in a silicon carbide matrix. The reaction sintering method is also produced with a SiC ceramic molded by the injection molding. In this case, the charge based on silicon and other substances is mixed with the molten low-melting organic binder (paraffin) to obtain a slurry mass, which is then molded a blank under pressure. The article is then placed in a carburizing environment in which the low-melting binder is distilled first, and then through the saturation of the billet with carbon at a temperature of 1100°C. As a result of reaction sintering a silicon carbide particles are formed and gradually fill the original pores. The sintering is then carried out at a temperature of 1300°C. The reaction sintering is an economical process the use of inexpensive thermal equipment, the sintering temperature is reduced from the commonly used 1600-2000°C to 1100-1300°C.

The method of reaction sintering is used in the production of the heating elements made of a silicon carbide. Electroheating resistance from a silicon carbide is a so-called thermistor, i.e., materials that can change their resistance under the influence of heating or cooling. The black silicon carbide has a high resistance at room

temperature and a negative temperature coefficient of resistance. The method of reaction sintering is used in the production of the heating elements made of a silicon carbide. Electroheating resistance from a silicon carbide is a so-called thermistor, i.e., materials that can change their resistance under the influence of heating or cooling. The black silicon carbide has a high resistance at room temperature and a negative temperature coefficient of resistance. Green silicon carbide has a low initial resistance and a slightly negative temperature coefficient, which turns into the positive at the temperatures of 500-800°C

1.3.2.3 The sintering in the plasma discharge. Spark Plasma Sintering (SPS method)

The SPS-sintering method combines the simplicity of pressing powders in closed molds with the advantages of the hot pressing method. In the sintering in a plasma discharge, a mixture of powders is placed in a cylindrical graphite mold, which is heated by a pulsed current of up to 10-20 kA and compacted with the simultaneous synthesis in the SPS installation, in a vacuum under the action of pulsed electric fields. A significant influence on the sintering process and the properties of the resulting materials is due to the speed which the electromagnetic field is introduced into the powder material, the spatial distribution of the input energy during the sintering process, the character and magnitude of the mechanical pressure created by the discharge in the process of the electropulse sintering. So, physical processes in the contact zones are characterized by a high spatial inhomogeneity and nonstationarity in time [24].

The sintering in a plasma discharge leads to the formation of nanoscale crystals of the sintered powder (in the case of a nanometer-sized grain of the original powder).

In work [25], SPS materials were obtained on the basis of the silicon carbide and nitride with high mechanical properties: $S \sim 98\%$; $D \sim 2\%$; $K_{IC} \sim 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; $\sigma_{\text{density}} = 450 \text{ MPa}$ (for SiC-based material); $\sigma_{\text{density}} = 850 \text{ MPa}$ (for a material based on Si_3N_4), and in a silicon nitride ceramic was obtained by the same method with the

following characteristics: microhardness reached 15,72 GPa, bending resistance 716,46 MPa and crack resistance $7,03 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ [26].

The new direction in improving strength and fracture toughness of non-oxide ceramics, including boron carbide, is the use of additives of this nanostructured powder fractions and application of new sintering technology to significantly increase the strength and fracture toughness by retaining of a fine microstructure of nanoscale scale [27].

SEM image analysis chipping surface showed that the ceramic $\text{B}_4\text{C}_{\text{mix}}$ manufactured by SPS in optimal conditions, makes it possible to obtain dense samples with a perfect grain structure and strong homogenous boundaries, which is confirmed by the transcristalline nature of the destruction.

In the Tomsk Polytechnic University, ceramic samples of silicon carbide and boron carbide were obtained at the SPSNS by SPS sintering at the SPS 515S (SPS SYNTEX) unit [28].

The high values of the microhardness of the $\text{B}_4\text{C}_{\text{mix}}$ ceramics ($H_v = 47,9$ GPa and $H_v = 42,19$ GPa) and a high density (98% of the theoretical value) were obtained under the SPS-sintering modes $T_{\text{Max.}}$, $P_{\text{density max.}}$ и T_2 , P_{density} respectively. Table 1 shows the technological modes and mechanical properties of ceramic samples from a boron carbide obtained by the SPS method are presented.

Table1 – Technological modes and mechanical properties of samples of the ceramics $\text{B}_4\text{C}_{\text{mix}}$.

T_{dens}	$P_{\text{dens } 2}, \text{ MPa}$	$H_v, \text{ GPa}$	$K_{\text{Ic}}, \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$\rho_a, \text{ g/cm}^3$	$P_{\text{prox } 2} \%$
T_{d1}	$P_{\text{dis} \cdot 1}$	22,5	9,2	2,17	86,0
	$P_{\text{dis} \cdot 2}$	23,7	7,6	2,24	88,7
	$P_{\text{dis. max}}$	24,8	7,3	2,38	94,8
$T_{\text{d } 2}$	$P_{\text{dis} \cdot 1}$	32,5	4,4	2,45	97,1
	$P_{\text{dis} \cdot 2}$	35,6	6,5	2,49	98,5

	$P_{dis\ max}$	42,2	9,5	2,48	98,3
T_{12}	$P_{dis\cdot1}$	38,1	5,6	2,45	97,2
	$P_{dis\cdot2}$	41,4	9,9	2,46	97,6
	$P_{dis\ max}$	47,9	15,0	2,47	98,0

In these samples, the value of crack resistance was $K_{Ic} = 8.0\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, which exceeds the values of $K_{Ic} = 3,5 \dots 4,0\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ in the ceramics without a hot-pressed UDP additives [30, 31].

The obtained studies show that the temperature and the SPS-sintering time for obtaining high-density B_4C_{mix} the ceramics under optimal conditions decrease with respect to these values in the traditional hot pressing (the temperature is about 200°C , the sintering time is 5...10 minutes). In addition, samples with an isotope grain structure and well-formed intergranular boundaries were obtained, and the introduction of nanoadditives into the feedstock for SPS synthesis leads to an increase in density, fracture toughness, and microhardness.

Table 2 show the results of the measurements of some characteristics of SiC-ceramics sintered by the SPS-method with a different percentage of SiC nanopowder are presented.

Table 2 – Mechanical characteristics of SiC-ceramics obtained by the SPS-method.

Nanopowders' content SiC, %	ρ , %	HV, GPa	K_{Ic} , $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
0	97,8	27,79	5,40
1	98,3	30,41	5,18
5	98,7	25,22	7,09
10	98,7	29,88	5,16

Such a combination (SPS - synthesis / introduction of nanoadditives) of the characteristics of the final material to date, has practically no alternatives.

1.5. The modification of the ceramic surface by the concentrated energy flows.

1.5.1. The electron-beam treatment

The main trends in the increasing of the strength and crack resistance of non-oxide ceramics are the use of additives of nanostructural fractions of the powder, as well as the use of new sintering technologies. It was shown in the [33-34] that use of nano- and submicron powders as additives in the range (2-10) mass. % to industrial powders of micron sizes promotes compaction of the charge during compaction and activates the sintering process, which leads to an increase in the density, crack resistance, microhardness and bending strength of the sintered ceramic.

A promising tool that allows nanostructuring of surface layers of various materials is low-energy intense electron beams of submillisecond duration of action. Ultra-high speeds (up to 10^9 K/s) of heating the melting point and subsequent cooling of a thin surface layer of material (10^{-7} - 10^{-8} m), the formation of temperature gradients (10^7 - 10^8 K/m) ensuring the cooling of the surface layer due to heat in an integrally cold volume of material with a velocity (10^4 - 10^9) K/s, conditions are created for the formation in the surface layer of an amorphous, nano- and submicrocrystalline structure [34].

In [32], a relationship was established between the change in the stability of a cermet alloy (TiC-NiCr) under the conditions of cutting structural steel from the structural state of the near-surface layer of the cutting insert, determined by the duration of the electron-beam irradiation pulse of its front surface [34]. he investigated cutting inserts were metal-ceramic cutting samples (12x12x4 mm) made of cemented carbide based on titanium carbide with NiCr binder (50 vol% TiC – about 50% NiCr ligament). The processing of the front surface of the experimental samples with an electron beam was performed on a SOLO unit under the following irradiation modes of the samples: the energy density in the beam was 40 J/cm², the pulse frequency was 15 s⁻¹, and the duration of the irradiation pulses was 100, 150, 200 μs. Stable experiments were carried out under the following conditions: the constant cutting speed and

the necessary number of repetitions to exclude the influence of the quality of the initial alloy. As a criterion of the wear, the value of the chamfer of the wear on the rear surface was 1 mm. Based on the results obtained, a conclusion is made about the possibility of a multiple increase in the resistance of experimental samples of metal-ceramic plates. The effect of the duration of the irradiation pulse in the range from 100 to 200 μs is insignificant, only 6-7%, the stability increases with irradiation at a pulse duration of 100 and 150 μs and decreases with irradiation with a pulse duration of 200 μs . The confidence interval obtained for the mean values of resistance is: $t = 100\mu\text{s} - 19\%$; $t = 150\mu\text{s} - 18\%$; $t = 200\mu\text{s} - 23\%$. For the original (unirradiated) plates, the average resistance value was 2.58 minutes with a confidence interval of 28%, an increase in stability was 4,36; 4,59; 4.51 times with an irradiation pulse duration of 100, 150, 200 μs , respectively.

The object of the study [36] was corundum-zirconium ceramics of the composition $20\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}80\text{ZrO}_2(\text{Y})$ (in % by weight) as a partially stabilized alloy in the form of tablets with a diameter of 10mm and a thickness of 2,5 mm. The technological modes used made it possible to obtain samples with different density $\rho_{\text{ex1}} = \text{g/cm}^3$, $\rho_{\text{ex2}} = 4,3 \text{ g/cm}^3$). The irradiation of the samples was carried out in a vacuum ($P = 10\text{-}2 \text{ Pa}$) at the SOLO accelerator (ISE SB RAS). The processing was carried out with the following parameters of the pulsed beam of low-energy electrons: $E = 20 \text{ keV}$, the current density in the pulse was 7 A/cm^2 , the pulse duration was 80 μs , repetition rate $f = 0.3 \text{ Hz}$. The energy density in the WH pulse was 11.2 J/cm^2 . The number of pulses is $N = 8$. To reduce the mechanical stresses that cause the formation of a grid of cracks in the ceramic during its processing, the samples were preheated by an electron beam with a reduced impulse power $W_{\text{H}} = 1.0 \text{ J / cm}^2$, 400 pulses at a frequency of $f = 10 \text{ Hz}$. As shown by the studies, the mechanical characteristics (microhardness, nanohardness, Young's modulus), as well as the phase composition of the ceramic samples KCK-1 and KCK-2 in the initial state differ significantly. According to these estimates, the porosity of the CCC-1 was "5%, while for the CCC-2, 9" 18,5%. Experimental data indicate a significant decrease in the content of corundum phase in the near-surface layers of both types of ceramics. The change in the phase

composition of the near-surface layers should affect their hardness. Since the hardness of corundum exceeds the hardness of zirconia, the decrease in the content of the corundum phase should lead to a decrease in the hardness and modulus of elasticity of surface-modified ceramic layers of the electron beam. It is to such effects that the electronic processing of KCK-1 sample.

Irradiation of a layer of ceramics from boron carbide (manufactured by the SPS method at a pressing pressure of 30 MPa and a temperature of $\sim 1950^{\circ}\text{C}$) by a low-energy intense electron beam (residual gas pressure (argon) in a 10^{-2} Pa working chamber, electron beam parameters: electron energy $U = 15$ keV, electron beam energy density (5-30) J/cm^2 , the pulse duration 100 ns, pulse repetition rate $0,3 \text{ s}^{-1}$). To prevent brittle fracture of the ceramic during the irradiation, immediately before irradiation, the specimen was heated by an electron beam (up to 900 K) leads to an increase in the fracture toughness of the modified layer: (if the hardness of the initial ceramic decreased from 43 GPa to 17 GPa for 10 cycles of loading, then after irradiation by a pulsed electron beam after 10 cycles of loading, the hardness of the ceramic was 27 GPa), due to the formation of the most dense (nonspherical) surface layer; formation of microtubes in a material shaped like thin plates and arranged in a grain bundles; the formation along the grain boundaries and at their joints of extended interlayers having a sub-monocrystalline. presumably, are boron carbide B_4C . The studies of fractures of irradiated ceramics have shown that at a given energy density of the electron beam, the thickness of the fusion layer reaches a thickness of about 15 μm with grain sizes in which vary in the range from 4 to 11 micrometres.

Conclusion

It was established that modification of SiC ceramics with methods of modification of the surface of silicon carbide and materials based on it are coating deposition is accompanied by a regular change in the polymorphic composition, fragmentation and nanostructuring of the surface layer, increased hardness and Young's modulus, to the formation of a surface layer having a multi-element multiphase structure of the submicron-range range.

References

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. – М.: Металлургия, 1977. – 215с.
2. Лучинин В. Профессиональное ориентирование nanoиндустрии // Nanoиндустрия. – 2010. – №4 – С. 36-39.
3. Зборщик А.М. Новые материалы в металлургии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://uas.su/books/newmaterial/142/razdel142.php>. – 25.08.12.
4. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия. 1984. – 256 с.
5. Грибков В.А. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
6. Мой диплом вставить
7. Гаршин А.П. Керамика для машиностроения. – М.: Научтехлитиздат. 2003. – 381 с.
8. Singer F. Ceramic Building Materials. – Springer. Dordrecht. 2017. – С. 1066-1088.
9. Матренин С.В. Техническая керамика. – Томск: ТПУ. 2004. –75 с.
10. Студопедия. Бескислородная керамика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.org/4-85323.html>. – 18.11.14.
11. Jankovský O. Properties of oxygen-free ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – V 34. – P. 4131-4136.
12. Калагур Е. С. Влияние пористости на структурно-фазовое состояние, деформацию и разрушение пористой керамики $ZrO_2(Me_xO_y)$: Автореф. дис. канд. тех. Наук. – Томск, 2013. – 144 с.
13. Федосова Н. А. Разработка и математическое моделирование процесса получения керамоматричного композита, армированного углеродными нанотрубками: Автореф. дис. канд. тех. наук. — Москва, 2016. — 270 с.
14. Андриевский Р. А. Порошковое материаловедение. – М.: Металлургия. 1991. – 205 с.

15. Adamiano A. Stabilization of cubic Silicon Carbide // J. Phys. Chem. Solid. – 1965. – V.26. – P.669-672.
16. Elder P. Effect of Surface Area on Densification of P-SiC Powders in the Presence of B and C. //Br. Ceram. Trans. J. – 1992. – No.3. – P.67-71.
17. Двилис, Э. С. Развитие теоретических основ и разработка способов холодного одноосного прессования порошковых материалов с применением ультразвукового воздействия: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2002. – 240 с.
18. Бадашкеева Е. М. Гиперпрессованные эффективные материалы на основе малопластичных глин: Автореф. дис. канд. тех. наук. Улан-Уде, 2004. – 160 с.
19. Двилис Э. С. Закономерности процессов консолидации порошковых систем при изменении условий деформации и физических воздействий: Автореф. дис. д. ... физ.-мат. наук. Томск, 2014. – 386 с.
20. Московских Д. О. Получение субмикронного порошка карбида кремния и наноструктурированной керамики на его основе: Автореф. дис. канд. тех. наук: - Москва, 2015. – 166 с.
21. Балкевич В.Л. Техническая керамика. – М.: СИ. 1968. – 200 с.
22. Chakrabarti O.P. Effects of fabrication parameters in controlling the ultimate properties of reaction Silicon Carbide. – M: Indian Ceram. Soc, 1996. – P. 487-493.
23. Горшков В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений. - М.: Высш. шк. 1988. – 400 с.
24. Heinz U. C. Field Assisted Sintering Technology (“FAST”) for the consolidation of innovative materials // International Journal of Thermophysics. – 2004. – № 15 – С. 130-133.
25. Перевислов Д.Д. 2013 г. Получение материалов на основе SiC и Si₃N₄ методом высокоимпульсного плазменного спекания // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. - № 5 – С. 60-68.

26. Хасанов О.Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий. – М.: Бином. Лаборатория знаний. 2015. – 269 с.
27. Овсянников Д. А. Высокотвердая керамика на основе карбида бора и производных фуллерита // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59. – №. 2. – С.318-322.
28. А.А. Качаев. Производство керамики из карбида кремния методом SPS с добавлением субмикронных порошков // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – №2. – С. 51-52.
29. Speyer R.F. Flexural Strength, Fracture Toughness, and Hardness of Silicon Carbide and Boron Carbide Armor Ceramics // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2010. – № 5. – С. 643– 651.
30. Нешпор В.С. Физико-механические характеристики высокотвёрдых поликристаллических материалов // Огнеупоры и техническая керамика. – 1995. – № 5. – С. 2–5.
31. О. Л. Хасанов. Определение оптимальных режимов изготовления высокоплотной керамики из порошка карбида бора методом спекания в плазме искрового разряда // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 2. – С. 58 -63
32. Хасанов О. Л. Метод компактирования и консолидации наноструктурных материалов изделий. – М.: ТПУ, 2008. – 212 с.
33. Филимонов С. Ю. Закономерности формирования структуры и свойств поверхностного слоя стали 45, модифицированной методами электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки: Автореф. дис. ...канд. тех. наук. – Томск, 2013. – 20 с.
34. Карпий С В. Особенности поверхностного упрочнения титана при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке: Дис. ... канд. тех. наук. – Новокузнецк, 2011. – 150 с.
35. Овчаренко В. Е. Исследование влияния длительности импульса электронно-пучкового облучения на стойкость металлокерамических пластин

// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. - Т.13. - №13. – С.687 – 691.

36. Гынгазов С.А. Радиационно-термическая активация диффузионного массопереноса в оксидной керамике: Дис. ...д. тех. наук. – Томск, 2011. – 253 с.