

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Осаждение покрытий с МАХ-фазой из плазмы магнетронного разряда

УДК 621.793:621.359:621.385.64

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Хохлова Юлия Алексеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лабораторией НОЦ Б.П. Вейнберга	Юрьева Юрий Николаевич	К. Т. Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимова Татьяна Борисовна	К. Э. Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Передерин Юрий Владимирович	К. Т. Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н., доцент		

Компетенции выпускников ООП «Ядерные физика и технологии» по направлению 14.03.02 Ядерные физика и технологии, специализация «Пучковые и плазменные технологии» (2018 года приёма)

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ПК(У)-1	Готов принимать участие в теоретических исследованиях в различных областях физики, связанных с современными высокотехнологическими

Код компетенции	Наименование компетенции
	способами энергетического воздействия на материалы, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых процессов.
ПК(У)-2	Способен участвовать в экспериментальных исследованиях в различных областях физики, связанных с воздействием плазмы и пучков заряженных частиц на вещество, самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий.
ПК(У)-3	Способен осуществлять самостоятельный поиск, изучение и использование научно-технической информации по тематике исследования, применять современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-4	Способен проектировать плазменно-пучковые технологические процессы и оборудование для применения в научных исследованиях и промышленности
ПК(У)-5	Готов к участию в производственно-технологической деятельности, связанной с применением плазменных и пучковых технологий для обработки материалов и синтеза новых материалов (в том числе нанесению функциональных покрытий), определению основных параметров технологических процессов, анализу физических и механических свойств изделий и материалов.
ПК(У)-6	Способен применять современные цифровые технологии и пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов.
ПК(У)-7	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования

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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Блейхер Г.А.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Хохлова Юлия Алексеевна

Тема работы:

Осаждение покрытий с МАХ-фазой из плазмы магнетронного разряда	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ №47-2/с от 16.02.2022 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы	15.06.2022 г.
---	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования – покрытия с МАХ-фазой, полученные методом магнетронного распыления в системе трех планарных магнетронов с мишенями: Ti, Al, C на подложки из кремния и сапфира. Все исследуемые покрытия осаждались при одинаковых условиях для последующего их сравнения.</p>
<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>Обзор литературы по разделам: покрытия на основе МАХ-фаз, способы их получения; структура и свойства Ti_3AlC_2, анализ диаграмм состояний системы Ti-Al-C; методы исследования свойств покрытий: элементный, фазовый составы, толщина покрытий, твердость и модуль упругости. Описание экспериментального оборудования и представление схемы эксперимента. Разделы: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективности и ресурсосбережение», «Социальная ответственность».</p>

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Титульный лист; - Актуальность работы; - Цель работы и задачи; - Экспериментальное оборудование; - Параметры осаждения; - Определение элементного состава; - Параметры отжига; - Определение фазового состава; - Определение твёрдости и модуля Юнга; - Заключение.
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Якимова Татьяна Борисовна
«Социальная ответственность»	Передерин Юрий Владимирович

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лабораторией НОЦ Б.П. Вейнберга	Юрьева Юрий Николаевич	к. т. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Хохлова Юлия Алексеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Хохлова Юлия Алексеевна

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент- 1,3; - коэффициент дополнительной заработной платы -1,15; - накладные расходы – 15%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ потенциальных потребителей результатов исследования. Исследование конкурентных технических решений. Проведение SWOT-анализа.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения научного исследования. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка сравнительной эффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимова Татьяна Борисовна	К. Э. Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Хохлова Юлия Алексеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Хохлова Юлия Алексеевна

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы); – чрезвычайных ситуаций.
<p>2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования по обращению с газовыми баллонами; – требования безопасности при работе на вакуумной установке.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты .
<p>2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).
<p>3. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;

	<ul style="list-style-type: none"> – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Передерин Юрий Владимирович	к. т. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Хохлова Юлия Алексеевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 84 страниц, 29 рисунков, 28 таблиц, 40 источников.

Ключевые слова: МАХ-фаза; магнетронное распыление; планарный магнетрон; параметры осаждения; твёрдость.

Объектом исследования является покрытие на основе МАХ-фазы Ti-Al-C.

Цель работы – исследовать влияние параметров осаждения на свойства покрытий Ti_3AlC_2 , полученных с помощью магнетронного распыления.

В процессе исследования рассчитаны параметры, при которых элементный состав синтезированных покрытий (в системе трёх планарных магнетронов) совпадает с составом Ti_3AlC_2 , получены данные о фазовом составе осаждённых покрытий до и после отжига в вакуумной печи, изучены их механические свойства (твёрдость и модуль Юнга).

Оглавление

Введение.....	12
1. Ti_3AlC_2 фаза.....	15
1.1. Кристаллическая структура и свойства.....	15
1.2. Анализ диаграмм состояний системы Ti-Al-C.....	17
1.3. Получение.....	20
2. Методы и оборудование.....	24
2.1. Вакуумная установка.....	24
2.2. Вакуумная печь.....	26
2.3. Исследование толщины покрытия.....	26
2.4. Исследование состава покрытия.....	27
2.5. Исследование твердости покрытия.....	31
3. Практическая часть.....	34
3.1. Экспериментальная установка.....	34
3.2. Определение режимов.....	35
3.3. Получение и исследование покрытий на подложке из кремния.....	37
3.4. Получение и исследования покрытий на подложке из сапфира.....	40
Заключение.....	45
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	46
4.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	46
4.2. Анализ конкурентных технических решений.....	46
4.3. SWOT – анализ.....	48
4.4. Планирование научно-исследовательских работ.....	50
4.4.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	50
4.4.2. Разработка графика проведения научного исследования.....	51
4.5. Бюджет научно-технического исследования.....	53
4.5.1. Расчет материальных затрат НИИ.....	54
4.5.2. Затраты на специальное оборудование для научных работ.....	54
4.5.3. Основная заработная плата исполнителей.....	55

4.5.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	57
4.5.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	58
4.5.6. Накладные расходы.....	58
4.5.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	58
4.6.Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	59
Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	63
5. Социальная ответственность	64
5.1. Компоновка рабочей зоны исследователя.....	65
5.2. Анализ вредных и опасных производственных факторов	65
5.2.1. Анализ вредных факторов.....	67
5.2.2 Анализ опасных факторов.....	72
5.3. Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС)	76
Вывод по разделу «Социальная ответственность».....	79
Список литературы и информационных источников.....	80

С развитием промышленности появляется необходимость в улучшении свойств используемых материалов. Так, например, многие изделия вследствие применения их в агрессивных средах (сильные механические нагрузки, сверх-высокие/низкие температуры) подвергаются износу. Их прочностные свойства ухудшаются, что может стать причиной разрушения материала. По мере решения проблемы износостойкости появляется такое затруднение, как тяжелая обрабатываемость материалов. Описанные выше материалы на основе МАХ-фаз совмещают в себе решение этих двух проблем.

В настоящее время изучению синтеза покрытий на основе МАХ-фаз посвящено большое количество научных исследований. Наибольшее распространение получили методы импульсного лазерного осаждения и химические (CVD) технологии. Такие технологии отличаются повышенной сложностью получения однофазных покрытий, необходимостью высоких температур [4].

Напыление пленок методом ионно-плазменного магнетронного распыления в большинстве работ производится с использованием комбинированных мишеней, но в таком случае, по прошествии некоторого времени эксплуатации комбинированных мишеней, из-за разной скорости распыления ее компонентов, состав изменяется неравномерно, и получение покрытий с характерной для МАХ-фаз структурой становится невозможным.

Среди множества вариаций синтеза представленных материалов наибольший интерес представляют МАХ-фазы на основе титана. Такими соединениями выступают Ti_3AlC_2 , Ti_2AlN , Ti_2AlC . Все перечисленные МАХ-фазы обладают износостойкостью. Материалам на основе Ti-Al-C свойственно сохранять свои свойства при повышенных температурах, при этом обладая высокой стойкостью к окислению при высоких температурах, исходя из керамической природы материалов [5].

В работе выполнена диагностика параметров ионно-плазменного магнетронного распыления в системе трех планарных магнетронов Ti, C, Al при синтезировании покрытия МАХ-фазы Ti_3AlC_2 , произведен отжиг полученных

покрытий, исследованы механические свойства полученных покрытий, а также проведен анализ элементного и фазового состава пленок.

Цель: исследовать влияние параметров осаждения на свойства покрытий Ti_3AlC_2 , полученных с помощью магнетронного распыления.

Задачи:

- определение скоростей напыления материалов для каждой мишени;
- экспериментальное определение параметров (мощности, давления, расстояния от мишеней до подложки), необходимых для получения состава, характерного для Ti_3AlC_2 ;
- получение покрытий исходя из рассчитанных параметров (на подложки из Si и Al_2O_3) с последующим отжигом;
- изучение фазового состава полученных покрытий;
- определение твердости покрытий до и после отжига;
- анализ полученных результатов.

Объект исследования – покрытия на основе МАХ-фазы Ti_3AlC_2 .

Предмет исследования – параметры синтеза покрытия Ti_3AlC_2 .

1. Ti_3AlC_2 фаза

1.1. Кристаллическая структура и свойства

Элементарная ячейка Ti_3AlC_2 – гексагональная (рисунок 1.3) с параметрами решетки $a=0,30753$ нм и $c=1,8578$ нм. Подобная структура сочетает в себе сильные ковалентные связи переходного металла Ti и C, а также слабые связи между тем же металлом и элементом Al. В каждой из ячеек плотно упакованные слои Ti чередуются со слоями чистого элемента Al [6].

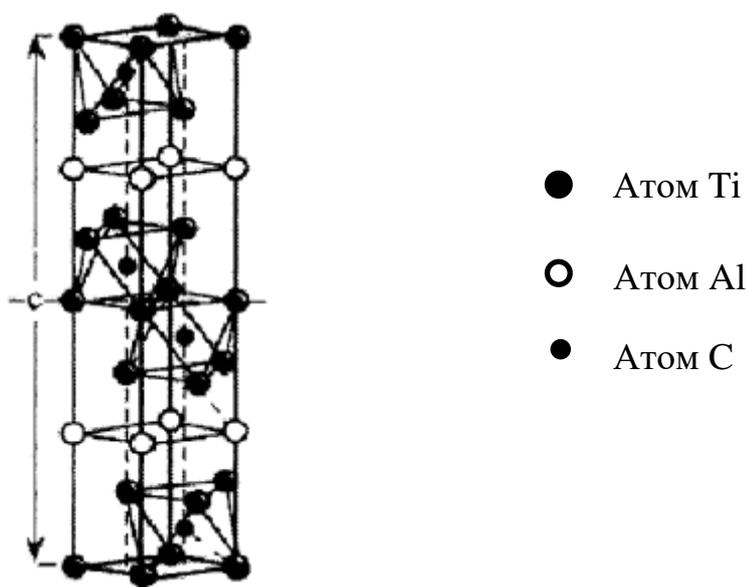


Рисунок 1.3 – Тип решетки Ti_3AlC_2 [6]

Атомы углерода располагаются в октаэдрических порах между вышеупомянутыми слоями. Октаэдрическая часть элементарной ячейки M_6X (рисунок 1.4) идентична структурам, состоящих из соответствующих MX карбидов [6].

Элемент Al располагается в центре треугольной призмы, образованной атомами Ti. Полость призмы несколько больше, чем полости внутри октаэдра и поэтому легче вмещает крупный атом Al. Пара атомных слоев Ti чередуются с одним атомным слоем Al.

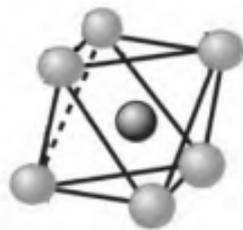


Рисунок 1.4 - Октаэдрическая часть ячейки [6]

Такие материалы имеют небольшой вес, жесткость, а также высокую химическую устойчивость к окислительным процессам в связи с их принадлежностью к керамическим материалам. А металлические свойства в свою очередь проявляются в виде пластичности при высоких температурах, устойчивости к тепловым ударам, а также теплопроводности и электропроводности. К ряду преимуществ можно отнести также относительную простоту обработки данных соединений, которая была достигнута благодаря уникальным свойствам. Плотности данных соединения располагаются в диапазоне от 4 до 5 г/см³, а модули Юнга в пределах 300 ГПа. Значения твердости соединений значительно выше, чем у титана и карбида титана.

В таблице 1.1 представлены некоторые сравнительные характеристики Ti₃AlC₂ с Ti и TiC.

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики [7, 8, 9]

	Ti ₃ AlC ₂	Ti	TiC
Плотность г/см ³	4,2	4,51	4,93
Твёрдость по Виккерсу, ГПа	~40	~1	~20
Модуль Юнга, ГПа	297	112	494
Модуль сдвига, ГПа	124	41	205
Коэффициент Пуассона	0,2	0,32	0,19
Электрическое сопротивление, мкОм·м	0,35 ± 0,03	до 0,58	1,8-2,5

Исходя из данных таблицы 1.1. можно сделать вывод о том, что соединение Ti_3AlC_2 при сравнительно небольшой плотности, а значит небольшом весе имеет повышенную твердость и пластичность в отличие от Ti и TiC .

1.2. Анализ диаграмм состояний системы $Ti-Al-C$

Для анализа возможного фазового состава рассмотрим диаграммы состояний тройной системы $Ti-Al-C$.

Система $Al - Ti$

Фазовая диаграмма системы $Al - Ti$ представлена на рисунке 1.5.

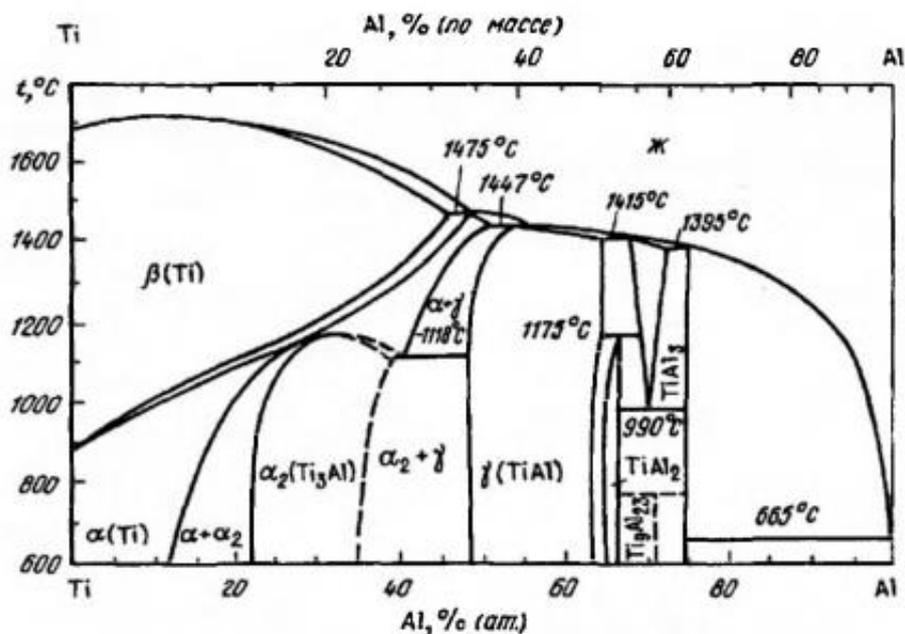


Рисунок 1.5 – Фазовая диаграмма системы $Al - Ti$ [6]

На диаграмме можно заметить широкие области, характерные для твердых растворов на основе $\alpha - Ti$ и $\beta - Ti$, а также соединения $TiAl$. Соединение $TiAl_3$ практически не имеет области гомогенности. Также для фазовой диаграммы характерны промежуточные фазы Ti_3Al , $TiAl_2$.

Растворимость алюминия в α - Ti уменьшается с понижением температуры и составляет 10, 9 и 7 % при температурах 900, 800 и 600 °С, соответственно.

Система Al – C

Фазовая диаграмма Al – C представлена на рисунке 1.6. Растворимость C в Al равна 0,03 %. В системе Al – C образуется карбид Al_4C_3 . Можно сделать вывод, что растворимость углерода в жидком алюминии незначительна.

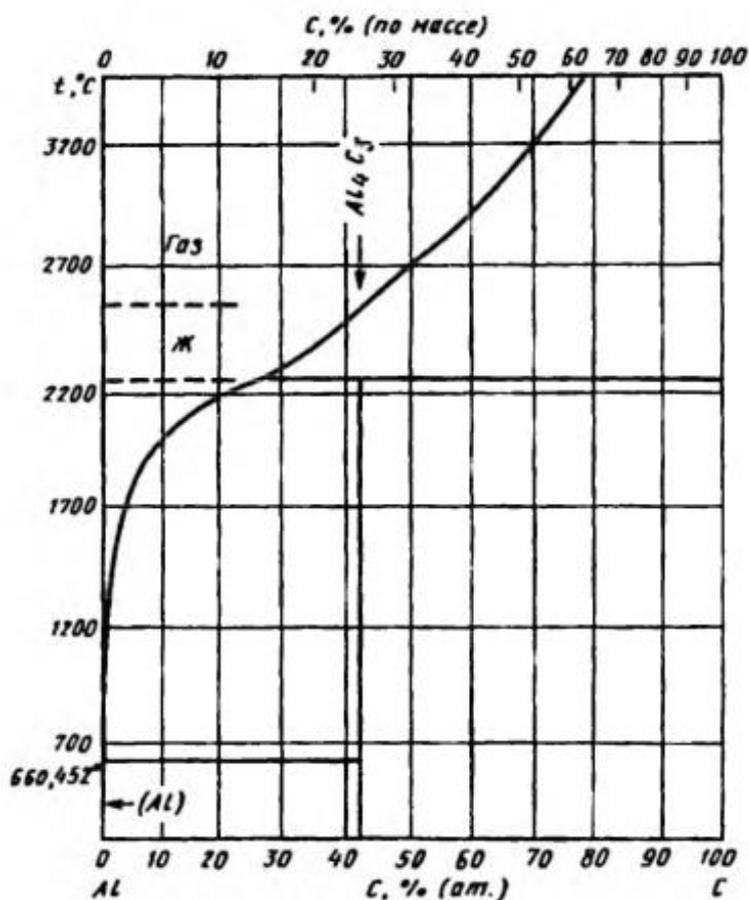


Рисунок 1.6 – Фазовая диаграмма системы Al – C [6]

Система Ti – C

На рисунке 1.7 представлена фазовая диаграмма системы Ti – C.

В представленной системе установлено образование одного соединения – TiC. Содержание C в карбиде возрастает с повышением температуры.

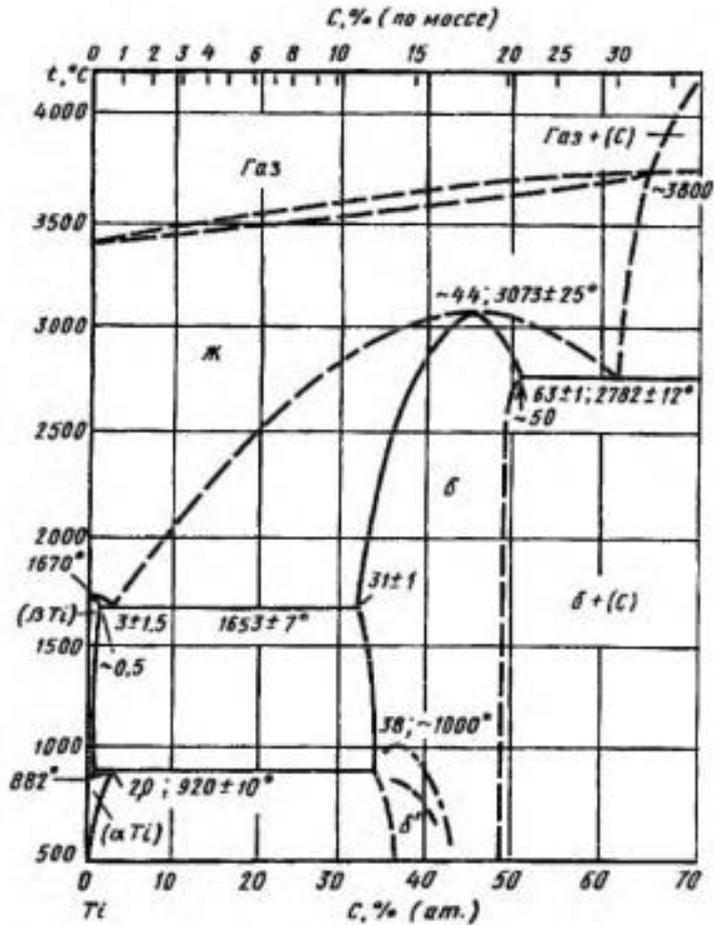


Рисунок 1.7 - Фазовая диаграмма системы Ti – C [6]

Таким образом, возможно образование следующих двойных соединений: Al_4C_3 , Ti_3Al , $TiAl_2$, $TiAl$, $TiAl_3$, TiC .

Система Ti – Al – C

Кроме двойных соединений в системе Ti - Al - C могут присутствовать следующие тройные фазы: Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , Ti_3AlC . Фазовая диаграмма данной системы представлена на рисунке 1.8.

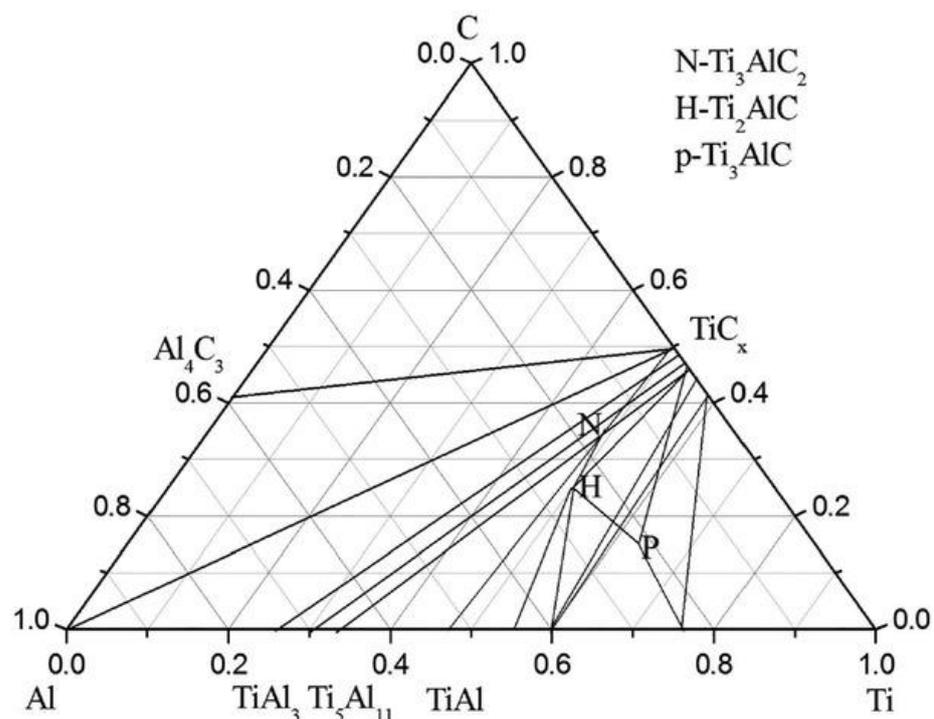


Рисунок 1.8 – Фазовая диаграмма системы Ti – Al – C [8]

Процентное содержание каждого из элементов для формирования фаз представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Процентное содержание элементов фаз системы Ti – Al – C

	Ti, ат %	Al, ат %	C, ат %
Ti_3AlC_2	50	17	33
Ti_2AlC	50	25	25
Ti_3AlC	60	20	20

1.3. Получение

Существует несколько методов синтеза МАХ-фаз. Рассмотрим основные методы, получившие широкое распространение.

Метод горячего прессования (ГП)

Горячее прессование (ГП) - производственный процесс, при котором используется одновременно применение высокой температуры и давления. Он был изобретен в 1955 году для диффузионно-связывающих процессов в атомной промышленности и с тех пор применяется во многих других областях.

ГП включает одновременное приложение изостатического давления и повышенной температуры к порошку-заготовке, что приводит к его уплотнению. Для создания среды спекания используется инертный газ, такой как аргон или азот, который закачивается в сосуд высокого давления (до 200 МПа), в то время как печь в сосуде производит температуру до 2000 °С. Заготовки помещаются в вакуумированную капсулу из листового металла, керамики или стекла [10].

Технологическая схема может представляется следующим образом:

- смешивание исходных материалов;
- размельчение смеси исходных материалов;
- горячее прессование;
- механическая обработка.

Параметры процесса горячего прессования:

- рабочее давление от 50 Мпа;
- скорость повышения температуры от 5°С/мин до температуры 300 °С/мин;
- температуры выдержки в диапазоне 1250–2000 °С исходя из состава смеси. Температура выдержки выбирается, учитывая данные о температуре плавления вещества матрицы;
- время выдержки при давлении и максимальной температуре от 1,5 до 2 часов;
- среда, в которой происходит спекание - инертный газ (аргон) или вакуум.

На рисунке 1.9 представлена установка для ГП.



Рисунок 1.9 – Прессы горячего прессования Centorr/Vacuum Industries [11]

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – процесс характерен созданием в процессе химической реакции твердых веществ. Используется для синтеза новых материалов. СВС представляет реакцию горения, в котором синтез инициируется точечным нагревом небольшой части образца и передается от слоя к слою через теплопередачу. Когда волна горения проходит через образец, она очищает материал и поддерживает его стехиометрию. СВС не требует внешнего давления для проведения спекания. Порошок со смесью исходных веществ закрывают в камере, в котором в свою очередь, находится газ. Затем происходит процесс горения, который оказывает воздействие на исходную смесь, после чего понижается температура и заканчивается процесс синтеза нового вещества [11].

Технологические параметры СВС-процесса:

- скорость горения 0,1-20 см/с;
- температура горения 2350-3850 К;
- скорость нагрева вещества 100-106 °С/мин;
- мощность зажигания 10-200 кал/(см² с);
- задержка зажигания 0,2-1,2 с;
- температура зажигания 800-1150 К.

Описанные методы ГП и СВС имеют один общий недостаток – высокие температуры процессов. Метод магнетронного распыления не требует таких высоких температур. Температуры отжига после магнетронного распыления не превышают 1200 °С.

Магнетронное распыление

Магнетронный диод представлен на рисунке 1.10. Он состоит из катода, материал которого распыляется, магнитной системы, анода и системы охлаждения.

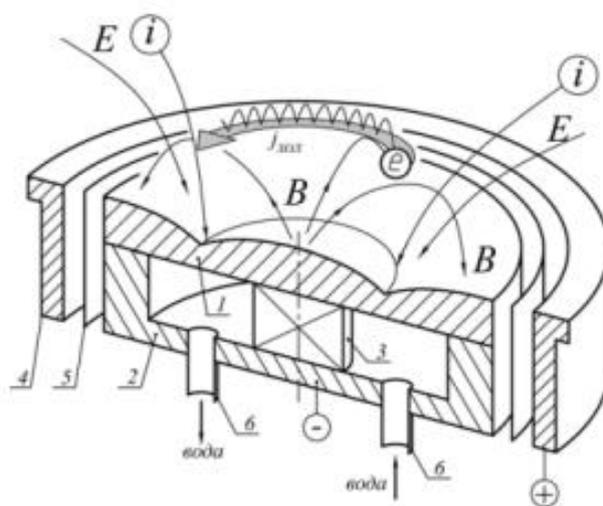


Рисунок 1.10 - Магнетронный диод: 1 – катод, 2 – магнитопровод, 3 – магнит, 4 – анод, 5 – электростатический экран, 6 – штуцера для подачи воды [12]

Электрическое поле возникает при подаче разности потенциалов на катод и анод и вызывает эмиссию электронов с поверхности мишени, которые ускоряются и ионизируют атомы в разрядном промежутке. Положительно заряженные ионы ускоряются в сторону мишени и бомбардируют её. Ускоренные ионы, падая на поверхность мишени сталкиваются с атомами решётки. Если энергия, переданная ей, выше порогового значения энергии связи для данного материала мишени, то атом покидает поверхность. В результате частица, лежащая на поверхности, получает импульс, направленный в сторону подложки [12].

При синтезе покрытий на основе МАХ-фаз возможно использование одной комбинированной мишени, но в таком случае уменьшается эксплуатационный срок мишени. Для его продления используют три планарных магнетрона с разными мишенями.

2. Методы и оборудование

2.1. Вакуумная установка

В работе использовалась вакуумная установка, представленная на рисунке 2.1. Вакуумная установка состоит из вакуумной камеры с системой откачки, трех магнетронов и автоматизированной системой управления. Система откачки включает в себя из спиральный, турбомолекулярный и криогенный насосы.



Рисунок 2.1 – Экспериментальная ионно-плазменная установка

Схема установки представлена на рисунке 2.2.

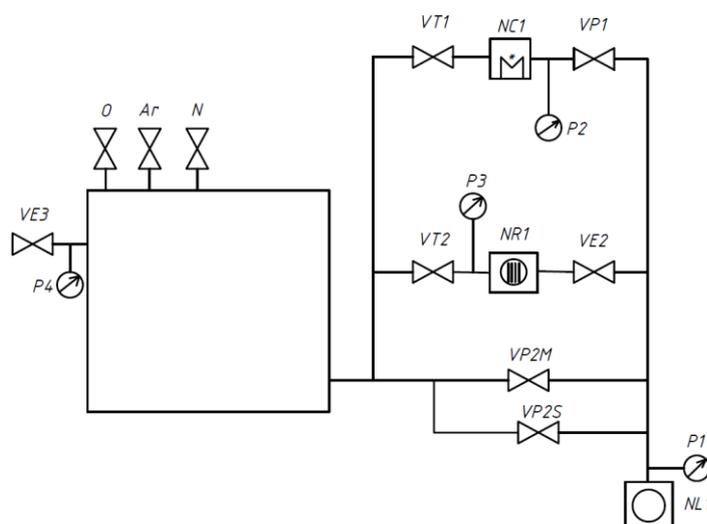


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема вакуумной установки

Компоненты вакуумной установки:

- P1 – вакуумметр Пирани;
- P2, P3, P4 – широкодиапазонные вакуумметры;
- VE2 – электромагнитный клапан;
- VE3 – электромагнитный клапан напуска газов;
- VP1 – пневматический клапан;
- VP2M + VP2S – пневматический клапан;
- Ar, O, N – регуляторы расхода газа (PPГ);
- VT1, VT2 – сверхвысоковакуумные шиберные затворы;
- NR1 – турбомолекулярный насос;
- NC1 – криогенный насос;
- NL1 – спиральный насос.

Порядок получения вакуума:

1. Включить форвакуумный насос NL1 и открыть клапан с меньшим сечением VP2S. Откачку производить до давления 10^4 Па, фиксируемое датчиком P4.
2. Открыть клапан VP2M. Откачку производить до давления 50 Па, фиксируемое датчиком P4.
3. Закрыть клапаны VP2S и VP2M.
4. Открыть клапан VE2, выполнить откачку турбомолекулярного насоса до 50 Па (по датчику P3) и включить воду и турбомолекулярный насос NR1.
5. Если разница давления (P4-P3) меньше 100 Па, то открыть затвор VT2, откачку производить до давления 10^{-1} Па, фиксируемое датчиком P4.
6. Закрыть затвор VT2 и открыть затвор VT1. С помощью криогенного насоса произвести откачку до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па по датчику P4;
7. Закрыть затвор -VT1 и открыть затвор -VT2, поддерживая рабочее давление в камере турбомолекулярным насосом.
8. Установка готова к старту технологического процесса.

2.2. Вакуумная печь

Отжиг образцов производился в вакуумной печи, представленной на рисунке 2.3.

Отжиг является незаменимым этапом после синтеза пленок. Именно термическая обработка приводит к кристаллизации аморфной фазы и задает кристаллическую структуру, характерную покрытиям на основе МАХ-фаз.



(а)



(б)

Рисунок 2.3 – Вакуумная печь: (а) - камера; (б) – панель управления

2.3. Исследование толщины покрытия

Для измерения толщины покрытий в работе применяли кварцевый измеритель толщины IZOVAC «Микрон – 5» [13]. Данный прибор позволяет оценивать толщину покрытий после процесса осаждения, в условиях атмосферного давления, а также в процессе нанесения покрытия при подключении датчика через специально подготовленный фланец. Измерения основаны на эффекте изменения резонансной частоты кварцевого кристалла при изменении его массы.

Алгоритм расчета толщины покрытия, заложенный в приборе, определяется по формуле:

$$d = \frac{\Delta F \cdot N \cdot \rho_q}{K \cdot F_2^2 \cdot \rho}, \quad (2.1)$$

где $\Delta F = F_2 - F_1$;

F_1, F_2 – частота после и до напыления соответственно, Гц;

ρ_q – плотность кварцевого датчика ($\rho_q = 2,65 \text{ г/см}^3$);

N – конструктивный коэффициент ($N = 1,67 \cdot 10^{12} \text{ Гц} \cdot \text{нм}$);

ρ – плотность вещества, г/см^3 ;

K – геометрический фактор ($K=1$).

Схема подключения кварцевого датчика представлена на рисунке 2.4.

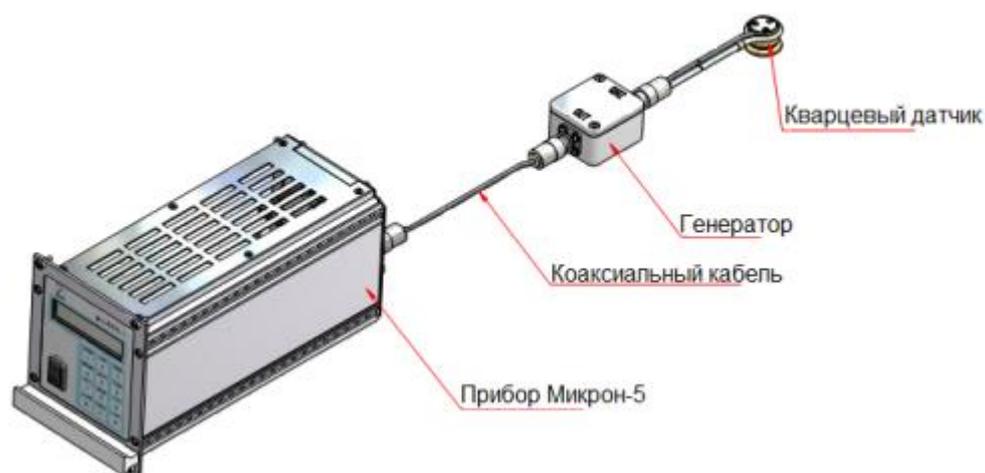


Рисунок 2.4 – Схема подключения кварцевого датчика [14]

2.4. Исследование состава покрытия

В работе были исследованы фазовый и элементный составы покрытия.

Рентгеновская дифракция (XRD) предоставляет информацию о фазовом и структурном составах кристаллических материалов. В основе рентгенодифракционного анализа лежит явление дифракции рентгеновских лучей. Кристалл – совокупность атомных плоскостей, на которых дифрагируют рентгеновские лучи. Основным условием, определяющим направление

максимумов дифракции упруго рассеянного на кристалле рентгеновского излучения, является условие Брэгга – Вульфа (рисунок 2.5) [15].

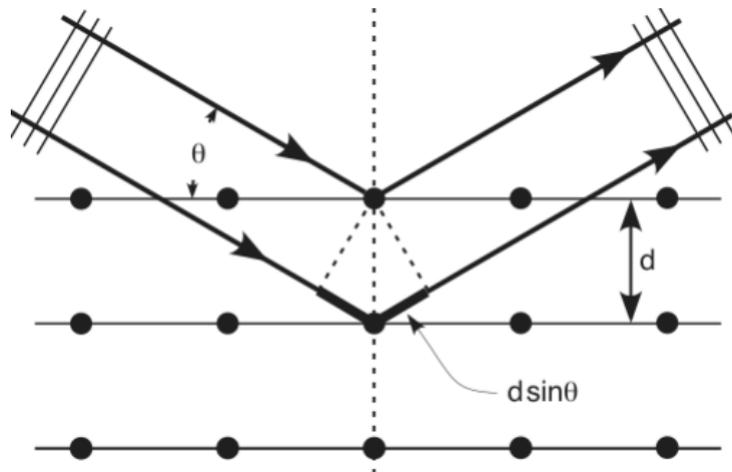


Рисунок 2.5 – Дифракция плоской волны [15]

Дифракцию рентгеновского излучения на кристалле можно рассматривать, как отражение излучения системой параллельных кристаллографических плоскостей с межплоскостным расстоянием d . Максимумы отражённого рентгеновского излучения (дифракционные максимумы) должны возникать при этом только в тех направлениях, для которых разность хода лучей между двумя лучами, отраженными соседними плоскостями равная $2d \cdot \sin \theta$, кратна целому числу длин волн λ . Тогда условие Брэгга – Вульфа имеет вид:

$$2d \cdot \sin \theta = n\lambda, \quad (2.2)$$

где d – межплоскостное расстояние;

θ – угол скольжения;

n – порядок дифракционного максимума;

λ – длина волны.

Установки для рентгеновской дифрактометрии называются рентгеновскими дифрактометрами. Основными его составляющими являются:

- источник рентгеновского излучения;
- гониометр;
- детектор, регистрирующий дифрагированное излучение.

В лабораторном источнике рентгеновского излучения электроны ускоряются напряжением 20-50 кВ по направлению к твердой мишени, где они тормозятся в результате столкновения. Это приводит к образованию линейчатого спектра на фоне непрерывного (тормозного) [15].

На рисунке 2.6 представлена схема дифрактометра.

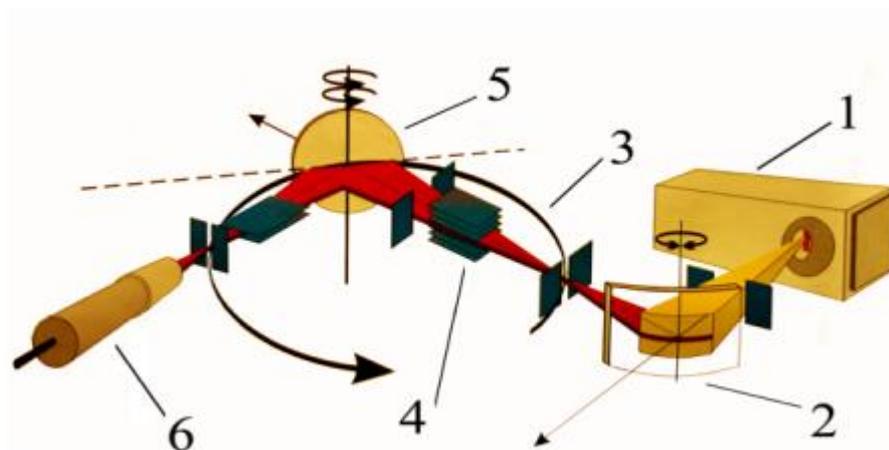


Рисунок 2.6 – Схема дифрактометра: 1 – рентгеновская трубка, 2 – монохроматор, 3 – гониометр, 4 – щели, 5 – образец, 6 – детектор [15]

Гониометр обеспечивает одновременный поворот образца на угол θ и поворот детектора на угол 2θ , чтобы всегда выполнялось равенство углов падения и отражения необходимое по условию Брэгга-Вульфа (2.2). Таким образом измерение дифрактограммы осуществляется в режиме θ - 2θ -сканирования, при котором скорость поворота детектора в два раза больше скорости поворота образца

Дифрактограмма представляет собой зависимость интенсивности дифрагированного рентгеновского пучка от двойного Брэгговского угла 2θ . При этом каждому дифракционному максимуму на дифрактограмме соответствует свое межплоскостное расстояние согласно уравнению Брегга-Вульфа (2.2).

В исследовании использовался рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD7000 [17].

Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS, EDX, EDXS)

предоставляет информацию об элементарном составе твердого вещества. Данный метод основан на возбуждении атомов исследуемого образца рентгеновскими лучами, в результате чего атомы испускают характеристическое рентгеновское излучение. Спектрометр регистрирует рентгеновские лучи всех энергий одновременно и выдает результат в виде графика зависимости интенсивности от энергии рентгеновского фотона [18].

Анализ может быть выполнен как с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), так и помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Принцип работы детектора с СЭМ представлен на рисунке 2.7.

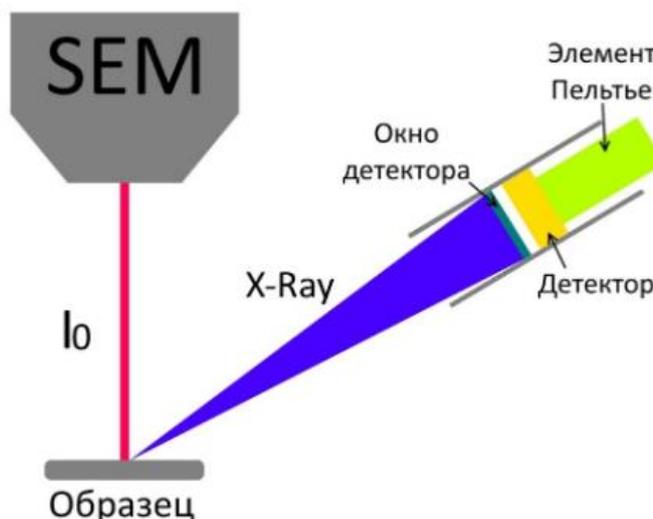


Рисунок 2.7 – Принцип работы детектора энергодисперсионного рентгеновского спектрометра [19]

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) позволяет получить увеличенное изображение объекта в следствии сканирования по объекту сфокусированным пучком электронов и регистрации детектором сигнала, возникающего в результате взаимодействия электрона с веществом.

Принцип работы сканирующего электронного представлен на рисунке 2.8 и включает в себя источник электронов, оптическую систему для фокусировки электронов и сканирования (электронную колонну), камеру с образцом и

детекторы для регистрации сигнала, а также систему откачки, необходимую для создания вакуума в микроскопе [20].



Рисунок 2.8 – Принципиальная схема СЭМ [20]

Электроны в следствии электронной эмиссии из катода, проходят через систему электронной оптики, фокусируются и ускоряются в направлении образца. Детектор регистрирует вторичные электроны, которые образуются в процессе сканирования сфокусированным пучком по поверхности образца. Таким образом, на систему сбора данных поступает информация о координатах пучка на образце и величине сигнала с детектора. При построении изображения каждой точке образца приписывается яркость пропорциональная величине сигнала, измеренного в момент, когда пучок находился в этой точке [20].

2.5. Исследование твердости покрытия

Для определения твердости покрытия использовали нанотвердомер CSM NHT2 [21] (рисунок 2.9). Принцип действия нанотвердомеров основан на статическом вдавливании наконечника алмазной пирамиды Виккерса, с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка.

Затем, значения длин диагоналей пересчитываются в значения твёрдости по Виккерсу (HV).



Рисунок 2.9 – Нанотвердомер CSM NHT2 [21]

Метод Виккерса заключается во вдавливании в образец алмазной пирамиды (рисунок 2.10). Усилие вдавливания выбирается в зависимости от толщины и твёрдости образца.

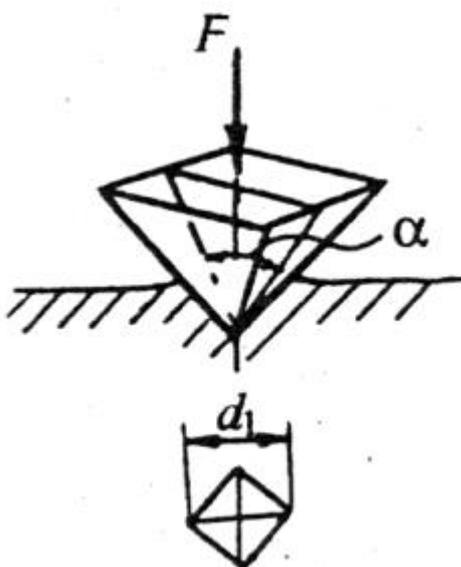


Рисунок 2.10 – Определение твердости по Виккерсу [22]

Значение твердости (HV) – это отношение приложенной к индикатору нагрузки к площади пирамидального отпечатка [19].

$$HV = \frac{0,102 \cdot F}{A}, \quad (2.3)$$

где F – приложенная нагрузка, Н;

A – поверхность отпечатка, мм².

$$A = \frac{d^2}{1,854}, \quad (2.4)$$

где d – длина диагоналей, мм.

В результате получается выражение:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}. \quad (2.5)$$

3. Практическая часть

3.1. Экспериментальная установка

Схема эксперимента представлена на рисунке 3.1.

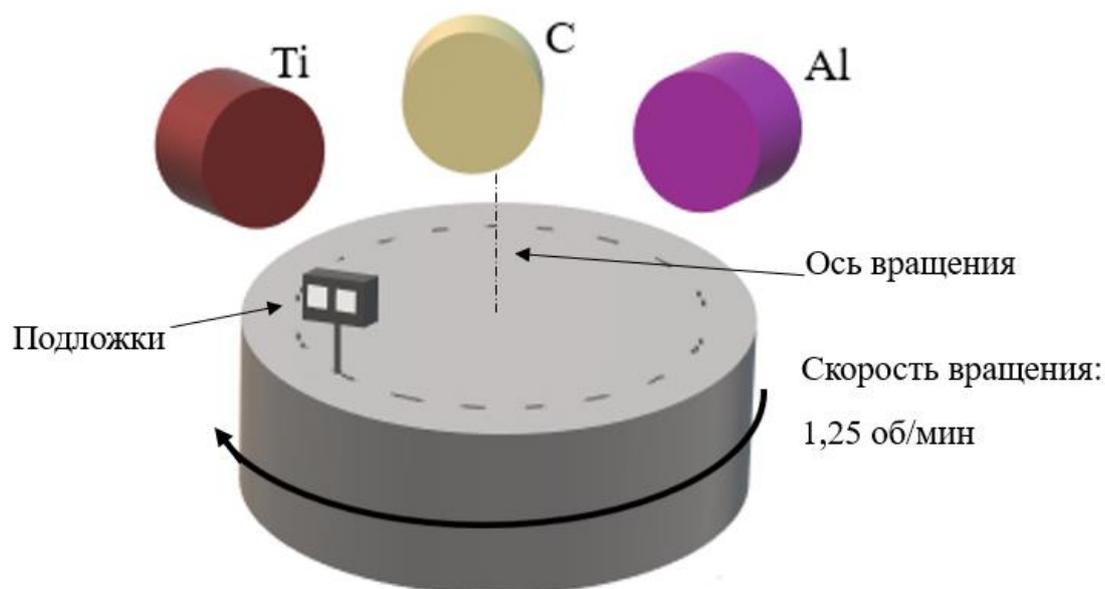


Рисунок 3.1 – Схема эксперимента

Магнетроны находятся на разном расстоянии от подложек. Расстояние составляет примерно 9, 12 и 7 см для мишеней из Ti, C и Al соответственно. Такое расположение обусловлено разной скоростью распыления материалов мишени. Карусель вращалась с постоянной скоростью (1,25 об/мин). Подложки закреплены в подложкодержателе и в процессе эксперимента не вращаются вокруг своей оси.

Работа производилась на вакуумной установке, описанной в главе 2. Процесс откачки осуществлялся в несколько этапов: на первом этапе с использование форвакуумного насоса (спирального), на втором этапе – высоковакуумных (турбомолекулярного и криогенного). Перед осаждением покрытий производилась чистка подложек ионным источником в среде аргона, который также использовался в качестве рабочего газа в процессе напыления.

3.2. Определение режимов

Для определения режимов на первом этапе произвели оценку скоростей осаждения покрытий для каждой из мишени отдельно. Напыление осуществили при одинаковых условиях, представленных в таблице 3.1. Перед напыление производили ионную чистку образцов в среде аргона в течении 20 минут.

Скорость вращения карусели – 1,25 об/мин.

Таблица 3.1 – Параметры осаждения для мишеней Ti, Al, C

Давление $P_{\text{ост}}, \text{Па}$	Давление $P_{\text{раб}}, \text{Па}$	Время t , мин	Газ	Мощность W , кВт
10^{-3}	10^{-1}	4	Ar	1

Скорость осаждения покрытий определялась по формуле:

$$V = \frac{D}{t}, \quad (3.1)$$

где V – скорость, нм/мин;

D – толщина покрытия, нм;

t – время осаждения, мин.

Расчет толщины покрытия заключался в определении частоты внутренних колебаний кварцевого датчика измерителя «Микрон–5» до и после напыления. В приборе заложен алгоритм расчета толщины пленки:

$$D = \frac{(F2 - F1) \cdot N1 \cdot \rho_q}{Kg \cdot F2^2 \cdot \rho}, \quad (3.2)$$

где $F1$ – частота после напыления, Гц;

$F2$ – частота до напыления, Гц);

ρ_q – плотность кварцевого датчика ($\rho_q = 2,65 \text{ г см}^3$);

$N1$ – конструктивный коэффициент ($N=1,67 \cdot 10^{12} \text{ Гц} \cdot \text{нм}$);

ρ – плотность вещества, г/см³;

K – геометрический фактор ($K=1$).

Известно, что соотношение элементов Ti-Al-C в фазе Ti_3AlC_2 составляет 3:1:2 соответственно, что эквивалентно 50:17:33 ат.%. Таким образом, подобрали мощности, при которых скорости напыления мишеней имеют аналогичные соотношения.

На втором этапе, произвели серию экспериментов, направленных на корректировку параметров: мощности и расстояние от мишеней до подложки. После каждого эксперимента определили элементный состав покрытия и выяснили, что при условиях, представленных в таблице 3.2 состав покрытия соответствует составу Ti_3AlC_2 (таблица 3.3).

Таблица 3.2 – Параметры осаждения Ti-Al-C

Давление $P_{ост}$, Па	Давление $P_{рабт}$, Па	Время, мин	Газ	Плотность мощности, Вт/см ²			Расстояние от мишени до образца, см		
				Ti	Al	C	Ti	Al	C
10^{-3}	10^{-1}	60	Ar	39,30	6,29	14,15	~9	~12	~7

Элементный состав, характерный представленным параметрам представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Элементный состав образца

Область измерения	Ti, атом %	Al, атом %	C, атом %	Всего
21	57	11	31	100,00
22	56	11	33	100,00
23	56	10	33	100,00
Среднее зн-е	56,33	10,67	32,33	100,00
M_3AX_2	50,00	16,66	33,33	100,00

Рисунок 3.2 иллюстрирует результат рентгеноспектрального анализа и соответствует метке спектра 23, представленному в таблице 3.3.

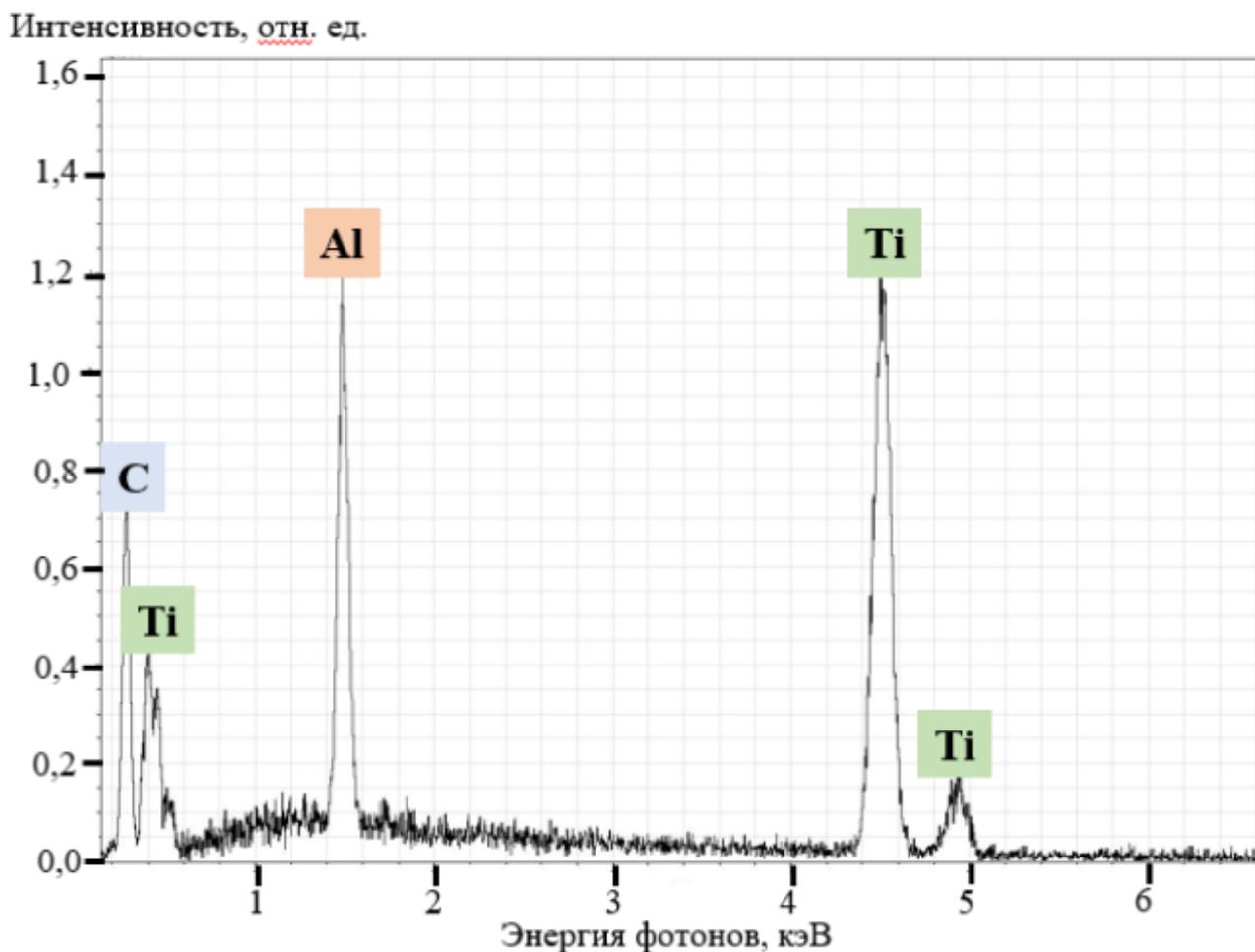


Рисунок 3.2 – Результат рентгеноспектрального анализа (метка спектра 23)

По результатам рентгеновского спектрального анализа полученные данные соответствуют данным об элементном составе Ti_3AlC_2 [10]. Рассчитанные параметры применялись к дальнейшим экспериментам.

3.3. Получение и исследование покрытий на подложке из кремния

Следующим этапом исследования является напыление покрытия на подложки из кремния, отжиг и определение фазового состава и твердости.

Термическая обработка необходима для формирования кристаллической структуры покрытия. Температура и время выдержки влияет на фазовый

состав. Отжиг производился в вакуумной печи при параметрах, представленных в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры отжига покрытий на кремниевых подложках

Давление, Па	Время выдержки, мин	Температура, °С		Скорость повышения температуры, град/мин
		800	900	
10^{-3}	60	800	900	10

Образцы после отжига представлены на рисунке 3.3.

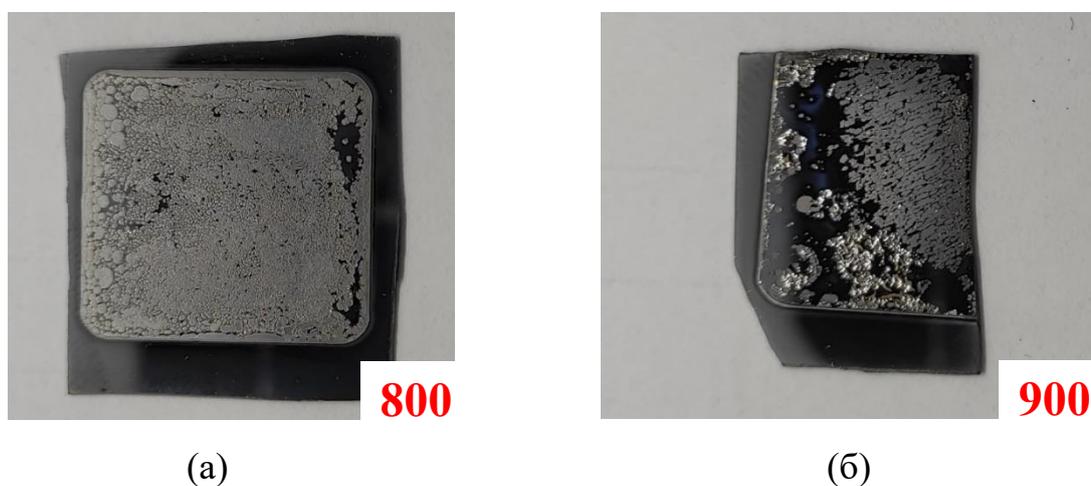


Рисунок 3.3 – Образцы после отжига: (а) – 800°С; (б) – 900°С

Можно заметить разрушение плёнки после отжига, что связано с низкой адгезией покрытия. В связи с этим измерение твердости образца и проведение структурного анализа на СЭМ оказалось невозможным. Фазовый же состав определился удалось. Результаты можно увидеть в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Фазовый состав покрытия на подложке из кремния при разных температурах отжига

Температура отжига, °С	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, объем. %
800	TiSi ₂	38,3
	TiC	16,5

Таблица 3.5 - Фазовый состав покрытия на подложке из кремния при разных температурах отжига (продолжение)

Температура отжига, °C	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, объем.%
800	Ti ₂ AlC	24,0
	Ti ₃ Al	21,2
900	TiSi ₂	81,6
	TiC	18,4

Рисунок 3.4 иллюстрирует результат рентгенодифракционного анализа и соответствует фазовому составу, представленному в таблице 3.5.

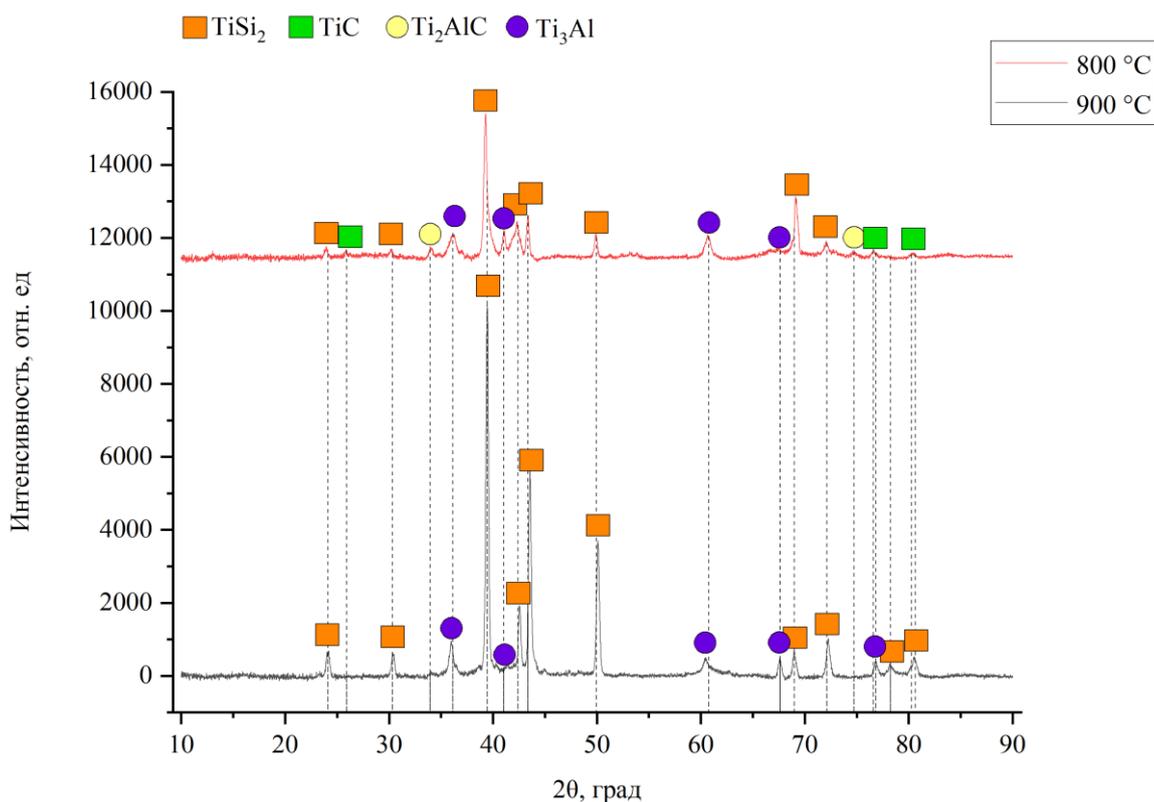


Рисунок 3.4 – Результат рентгенодифракционного анализа

На фазовых диаграммах в образцах, отожженных при температуре 800 °C отсутствует соединение Ti₃AlC₂, но наблюдаются соединения Ti₂AlC,

что связано с активным присоединением Ti к материалу подложки и образованием фаз TiSi₂.

По результатам эксперимента было принято решение об использовании сапфировой подложки (Al₂O₃) для увеличения адгезии, а также для исключения образования фазы TiSi₂.

3.4. Получение и исследования покрытий на подложке из сапфира

Напыление Ti-A-C на подложки из сапфира производилось при условиях, аналогичных напылению на кремниевые подложки. Параметры отжига представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры отжига покрытий на сапфировых подложках

Давление, Па	Время выдержки, мин	Температура, °C		Скорость повышения температуры, град/мин
10 ⁻³	60	800	1200	10

Образцы после отжига представлены на рисунке 3.5.

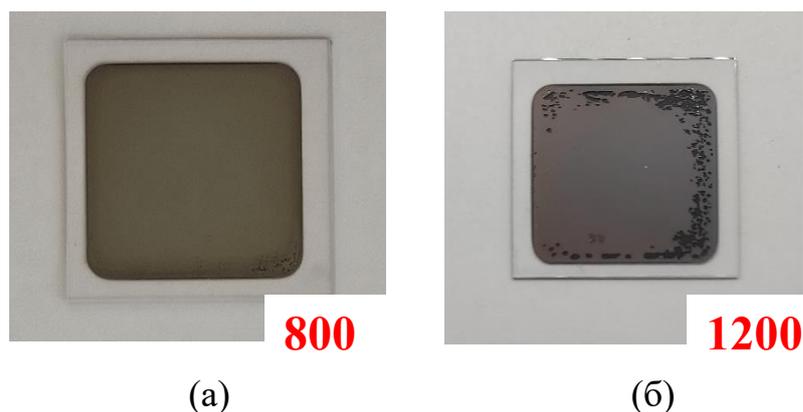


Рисунок 3.5 – Образцы после отжига: (а) – 800 °C; (б) – 1200 °C

Также был произведен рентгенодифракционный анализ. Результаты отражены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Фазовый состав покрытия на подложке из сапфира при разных температурах отжига

Температура отжига, °C	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, объем.%
800	Al_2O_3	22,2
	Ti_3AlC_2	44,5
	Ti_3Al	11,1
	TiC	22,2
1200	Al_2O_3	12,5
	Ti_3AlC_2	25
	Ti_2AlC	25
	Ti_3Al	12,5
	TiC	25

Рисунок 3.6 (б) соответствует фазовому составу, представленному в таблице 3.7. Рисунок 3.6 (а) иллюстрирует фазовый состав покрытия до термической обработки.

Можно заметить, что формирование фаз происходит после отжига. Фаза Ti_3AlC_2 образуется как при температуре 800 °C, так и при температуре 1200 °C. Наилучший результат достигается при температуре 800 °C. Здесь содержание фазы Ti_3AlC_2 составляет 44,5 %.

Помимо фазы Ti_3AlC_2 происходит активное формирование фаз Ti_2AlC при температуре 1200 °C, TiC и Ti_3Al при температурах 800 и 1200 °C.

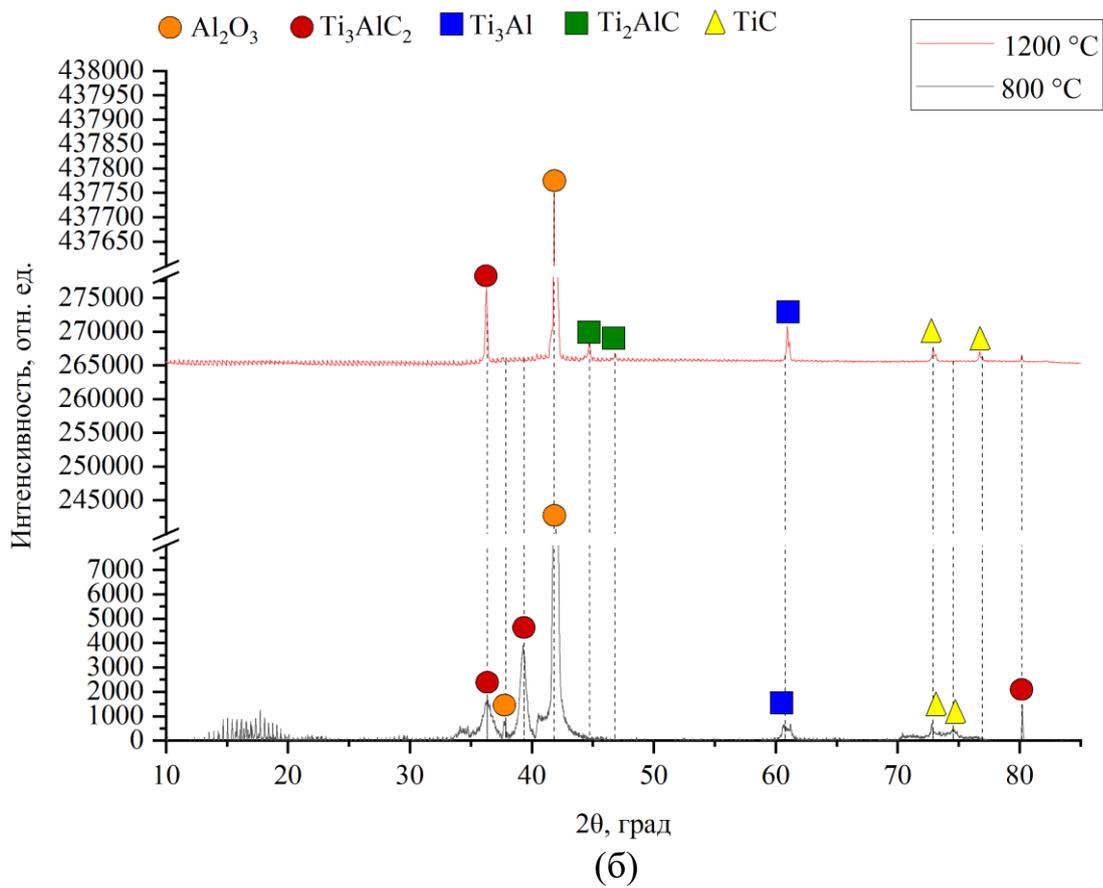
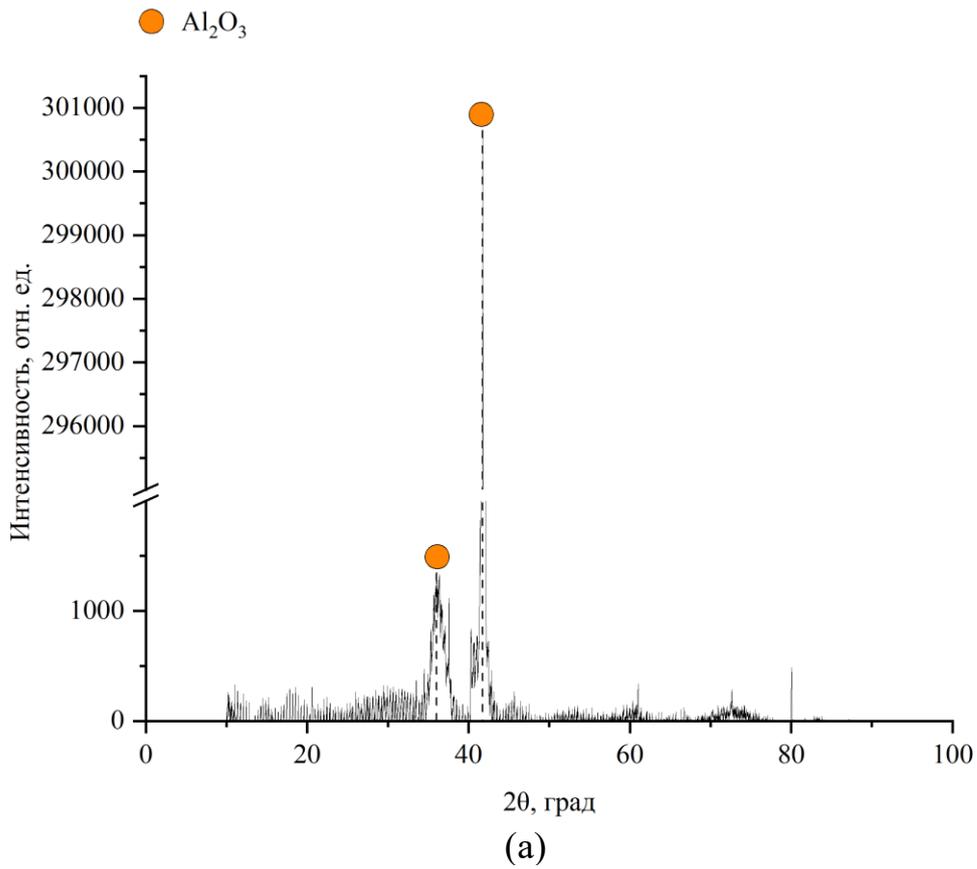


Рисунок 3.6 – Результат рентгенодифракционного анализа: (а) – до отжига;
(б) – после отжига

Данные рентгенодифракционного анализа подтверждаются результатами измерения твердости покрытий и модуля Юнга, представленных на рисунках 3.7 и 3.8 соответственно.

Для более точного сравнения в таблице 3.8 приведены значения твердости и модуля Юнга некоторых образующихся фаз.

Таблица 3.8 – Значения твердости и модуля Юнга [7, 8, 9, 23, 24]

Фаза	Твёрдость, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
Ti_3AlC_2	40	297
Ti_2AlC	20	293
Al_2O_3	18	380
TiC	20	494

Представленные в таблице данные подтверждают результаты измерения механических свойств полученного покрытия.

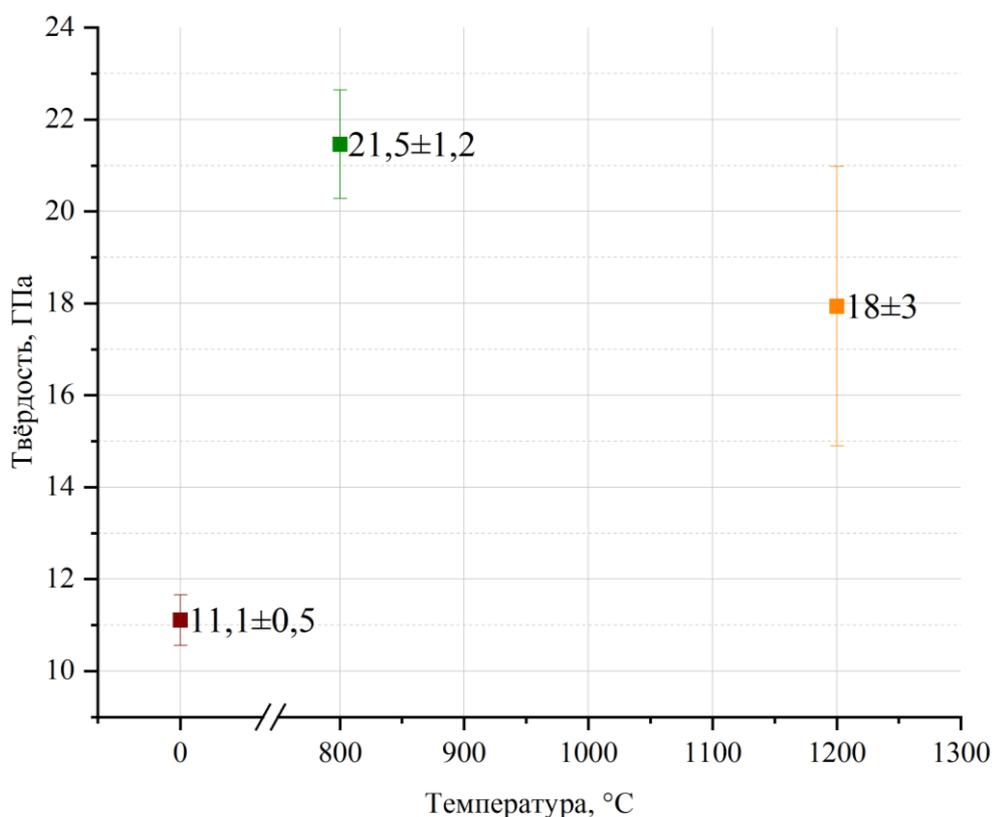


Рисунок 3.7 – Зависимость твердости покрытий от температуры отжига

Твердость после отжига возрастает минимум в 1,5 раза – формируются твердые фазы TiC, Ti₃AlC₂ и др. При 800 °С наблюдается наибольшая твердость покрытия, что можно объяснить наибольшим содержанием фазы Ti₃AlC₂ (44,5 %).

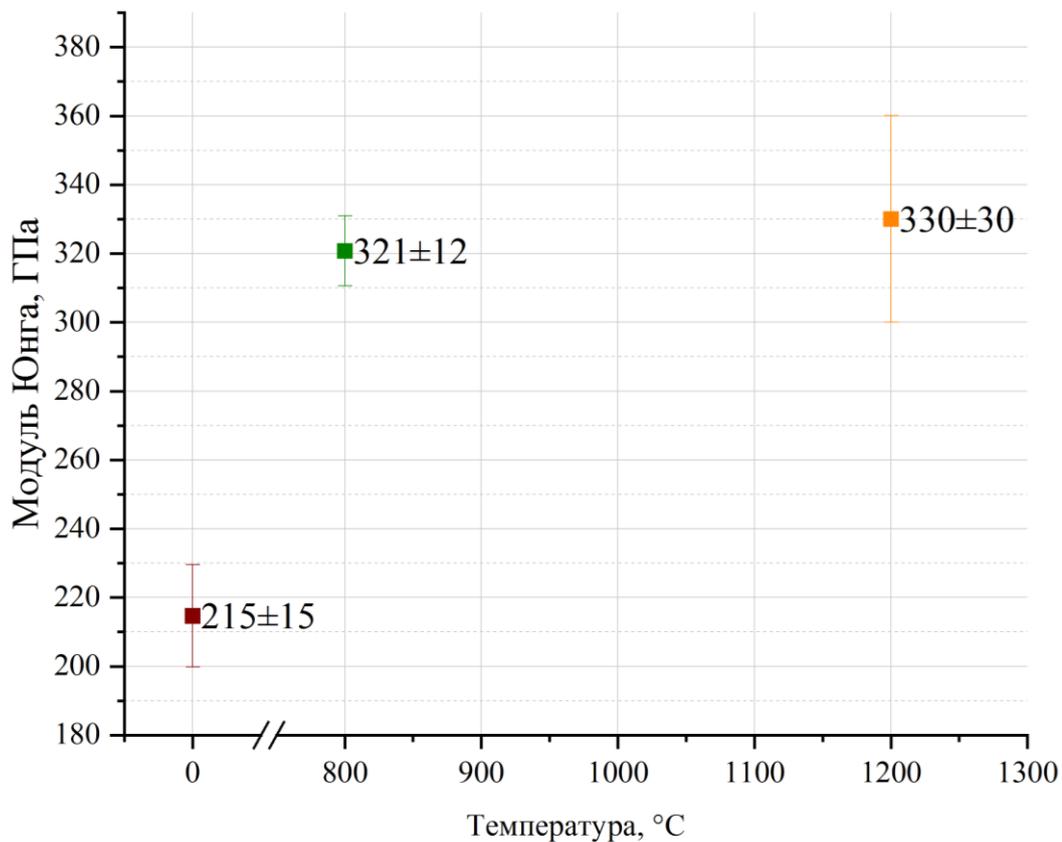


Рисунок 3.8 – Зависимость модуля Юнга от температуры отжига

Модуль Юнга после отжига возрастает минимум в 1,5 раза. Из таблицы 3.8 модуль Юнга TiC в 1,7 раз больше модуля Юнга Ti₃AlC₂. Несмотря на существенную разницу значений, экспериментально полученные показатели модуля Юнга соизмеримы друг с другом. Это связано с тем, что при температуре 1200 °С фаза TiC составляет всего 25 % от всего состава.

Заключение

В процессе выполнения работы были исследованы свойства покрытий Ti_3AlC_2 , полученные с помощью магнетронного осаждения.

Были определены скорости напыления материалов для каждой мишени при использовании трех магнетронов, а также параметры, необходимые для получения состава, характерного для Ti_3AlC_2 : плотности мощности – 39,30; 6,29; 14,15 Вт/см²; расстояние от мишени до подложки: 9, 12, 7 см для Ti, Al, C соответственно. Энергодисперсионная спектроскопия показала соответствие элементарного состава полученных покрытий элементарному составу Ti_3AlC_2 .

Для формирования кристаллической структуры после осаждения покрытий на подложку из кремния был произведен отжиг в вакууме при температурах 800 и 900 °С.

Было установлено, что на подложках из монокристаллического кремния на фазовых диаграммах отсутствует соединение Ti_3AlC_2 , но наблюдаются соединения Ti_2AlC при температуре 800 °С, что связано с активным присоединением Ti к материалу подложки и образованием фаз TiSi, а при температуре отжига 900 °С образуются только фазы TiC и TiSi. Определение твердости полученных покрытий оказалось невозможным, в связи с разрушением покрытий после отжига.

Отжиг покрытий, осажденных на сапфировые подложки, при температурах от 800 и 1200 °С показал наличие как требуемых фаз Ti_3AlC_2 , так и фаз Ti_3Al , Ti_2AlC , TiC.

При этом образцы после отжига при температуре 800 °С, имели максимальное содержание фазы Ti_3AlC_2 (44,5 %).

Результаты измерений твердости и модуля упругости образцов после отжига хорошо коррелируются с результатами рентгенофазного анализа. Образцы, имеющие максимальное содержание фазы Ti_3AlC_2 , отожженные при температуре 800 °С, имеют максимальное значение твердости – $21,5 \pm 1,2$ ГПа, что в два раза больше твердости образца до отжига.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Представленная работа посвящена поиску режимов осаждения покрытий с МАХ-фазой Ti_3AlC_2 , синтезированных методом магнетронного распыления в системе трёх планарных магнетронов.

С развитием промышленности появляется необходимость в улучшении свойств используемых материалов. Так, например, многие изделия вследствие применения их в агрессивных средах подвергаются износу. Их прочностные свойства ухудшаются, что может стать причиной разрушения материала. МАХ – фазы особые соединения, совмещающие в себе свойства металлов и керамики, могут быть применены в качестве упрочняющих покрытий на изделия, подвергающиеся сильным механическим нагрузкам.

Напыление пленок методом ионно-плазменного магнетронного распыления в большинстве работ производится с использованием комбинированных мишеней. Но в таком случае, по прошествии некоторого времени эксплуатации комбинированных мишеней, из-за разной скорости распыления ее компонентов, состав изменяется неравномерно, и получение покрытий с характерной для МАХ-фаз структурой становится невозможным.

Так как покрытия на основе МАХ-фаз и их синтез – области малоизученные, в качестве потенциального потребителя рассматриваем организации, связанные с осаждением упрочняющих покрытий на изделия, подвергающиеся сильным механическим нагрузкам.

4.2. Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений проводится при помощи оценочной карты. Для этого были определены 2 конкурента на рынке: получение покрытий с МАХ-фазой из комбинированной мишени (B_1), получение покрытий с МАХ-фазой методом спекания из порошков (B_2).

Расчет показателя конкурентоспособности производился по следующей формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки. Для этого была составлена оценочная карта (таблица 4.1). Обозначения в таблице: индекс ϕ – рассматриваемый метод, индекс $k1$ – метод конкурента V_1 , индекс $k2$ – метод конкурента V_2 .

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_ϕ	B_{k1}	B_{k2}	K_ϕ	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Производительность	0,25	4	3	4	1,25	0,85	1
2.Простота методики получения покрытий	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
3.Надёжность	0,1	4	4	4	0,5	0,4	0,4
4.Качество покрытий	0,2	4	5	2	0,8	1	0,4
5.Возможность автоматизации	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1.Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	5	4	4	0,35	0,35	0,27
2. Стоимость технологии	0,05	3	4	5	0,15	0,2	0,25
3.Послепродажное обслуживание	0,04	5	5	3	0,2	0,2	0,12
4.Конкурентоспособность продукта	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15

Таблица 4.1 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (продолжение)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность				
		БФ	Бк1	Бк2	КФ	Кк1	Кк2		
1	2	3	4	5	6	7	8		
5.Уровень проникновения на рынок			0,04	5	5	4	0,2	0,2	0,16
Итого			1	45	44	39	4,7	4,4	3,55

Согласно расчету, предлагаемая нами технология синтеза покрытий на основе МАХ-фаз имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,7). Это обусловлено следующим рядом факторов: технология безопасна, проста в эксплуатации и надёжна, а также имеет высокую производительность в сравнении с конкурирующими технологиями.

4.3. SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализе (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Долгий срок эксплуатации мишеней;</p> <p>С2. Простая методика получения покрытий.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Недостаточная инструментальная база для проведения измерений</p> <p>Сл2. Отсутствие достаточного финансирования;</p> <p>Сл3. Использование устаревшего оборудования для исследования.</p>
--	---	---

Таблица 4.2 – SWOT-анализ (продолжение)

<p>Возможности: В1. Использование инновационной структуры ТПУ; В2.Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>1.Получение результатов НТИ 2. Продвижение НТИ на рынок</p>	<p>1.Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 2.Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 3.Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p>
<p>Угрозы: У1.Отсутствие спроса на технологию; У2.Уменьшение финансирования исследования; У3.Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p>	<p>1.Продвижение технологии с целью создания спроса 2.Сертификация и стандартизация продукта</p>	<p>2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 3.Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта. Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований.

4.4. Планирование научно-исследовательских работ

4.4.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

1. определение структуры работ в рамках научного исследования;
2. определение участников каждой работы;
3. установление продолжительности работ;
4. построение графика проведения научных исследований.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания (ТЗ)	1	Составление и утверждение ТЗ	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследования	Руководитель
	4	Календарное планирование	Руководитель, инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических обоснований	Инженер
	6	Подготовка образцов для исследования	Инженер

Таблица 4.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей (продолжение)

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Теоретические и экспериментальные исследования	7	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер
	9	Определение целесообразности проведения	Руководитель, инженер
Разработка технической документации и проектирование	10	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	Руководитель инженер
	11	Составление пояснительной записки	Инженер

4.4.2. Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.2)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.3)$$

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

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

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Коэффициент календарности составляет:

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22. \quad (4.4)$$

Продолжительность выполнения i -ой работы:

$$T_{ki} = 8 \cdot 1,22 = 9,76 \approx 10 \text{ раб. дн.} \quad (4.5)$$

Календарный план-график проведения НИОКР по теме представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Календарный план-график проведения НИОКР

Вид работ	Т _к , кал. дн.	Исполнитель	Продолжительность выполнения работ													
			Февр.			Март			Апрель			Май				
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Составление ТЗ	5	Руководитель	■													
	5	Инженер	⊗													
Изучение литературы по теме	18	Инженер		⊗	⊗											
Подбор режимов работы	13	Руководитель				■	■									
	13	Инженер				⊗										
Календарное планирование	8	Руководитель					■									
	8	Инженер					⊗									
Осаждение покрытий	18	Руководитель						■	■							
	18	Инженер						⊗								

Таблица 4.4 – Календарный план-график проведения НИОКР (продолжение)

Вид работ	Тк, кал. дн.	Исполнитель	Продолжительность выполнения работ													
			Февр.			Март			Апрель			Май				
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Измерение полученных покрытий	15	Руководитель									■					
	15	Инженер									⊗					
Анализ полученных результатов	5	Руководитель											■			
	10	Инженер											⊗			
Оценка эффективности результатов	5	Руководитель												■		
	5	Инженер												⊗		
Составление пояснительной записки	30	Инженер														⊗
Итого	122															

4.5. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования учитывается полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.5.1. Расчет материальных затрат НТИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

Таблица 4.5 – Сырьё, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за ед., руб	Сумма, руб
Мишень 1	Ti	1	12 000	12 000
Мишень 2	Al	1	10 000	10 000
Мишень 3	C	1	11 000	11 000
Подложка 1	Si	1	1 000	1 000
Подложка 2	Al ₂ O ₃	1	1 000	1 000
Баллон аргона	Ar, 99,9 %	1	9 000	9000
Всего за материалы				44 000
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				2 900
Итого				46 900

4.5.2. Затраты на специальное оборудование для научных работ

При выполнении ВКР было использовано оборудование, которое уже имелось в ТПУ, а именно: вакуумная установка ВЧ и персональный компьютер. Данный вид оборудования не учитывался в материальных затратах, так как был приобретен заранее, при оснащении лаборатории.

Проведем расчет амортизации использованного оборудования на примере персонального компьютера. Первоначальная стоимость 30 000. Срок полезного использования составляет от 2 лет и 1 месяца до 6 лет. Время работы на всем оборудовании не превышало 1 месяца за все время исследования.

Расчет нормы амортизации:

$$H_a = \frac{1}{n} \cdot 100\% = \frac{1}{6} \cdot 100\% = 16,7\%, \quad (4.6)$$

где H_a – норма амортизации в процентах;

n – срок полезного использования в годах.

Годовые амортизационные отчисления:

$$A_r = 30\,000 \cdot 0,167 = 5010 \text{ руб.} \quad (4.7)$$

Ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_M = \frac{5010}{12} = 417,5 \text{ руб.} \quad (4.8)$$

Итоговая сумма амортизации основных средств:

$$A = 417,5 \cdot 1 = 417,5 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

Результаты расчета амортизационных отчислений для всего оборудования представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Расчёт амортизационных отчислений

Наименование	Перв.цена, руб.	Норма аморти- зации, %	Годовые амортиз - ные отчисления, руб.	Ежемесячные амортиз – ные отчисления, руб.	Затраты, руб.
Вакуумная установка	8 000 000	20	1 600 000	133 333,3	133 333,3
Персональный компьютер	30 000	16,7	5 010	417,5	417,5
Итого					133 750,8

Таким образом, амортизационные затраты на специальное оборудование в ходе научного исследования в сумме на специальное оборудование (вакуумная установка, персональный компьютер) составили 133750,8 рублей.

4.5.3. Основная заработная плата исполнителей

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Баланс рабочего времени и расчет основной заработной платы представлены в таблице 4.7 и 4.8, соответственно.

Таблица 4.7 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	90	90
– праздничные дни	28	28
Потери рабочего времени		
– отпуск	28	28
– невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	227	227

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИТ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.10)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (4.11)$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.,

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.12)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 28 раб. дней $M=11,08$ месяца, 5-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.13)$$

где $Z_{\text{ТС}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Таблица 4.8 – Расчёт основное заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{ТС}}$, руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$	$Z_{\text{дн}}$	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	37 700	1,3	49 010	2 392,2	69	165 061,8
Инженер	13 900	1,3	18 070	882,0	122	107 604
Итого, $Z_{\text{осн}}$						272 665,8

4.5.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 – 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$C_{\text{ЗП}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.14)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.,

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} + Z_{\text{осн}}, \quad (4.15)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

Таблица 4.9 – Дополнительная заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата	165 061,8	107 604
Дополнительная заработная плата	19 702,3	11 611,35
Заработная плата исполнителей	151 050,7	89 020,35
Итого по статье, руб.	303 979,45	

4.5.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.16)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Общая ставка взносов составляет в 2022 году – 30%.

$$Z_{\text{внеб}} = 0,30 \cdot 240\,071,05 = 72\,021,3 \text{ руб.}$$

4.5.6. Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты на управление и хозяйственное обслуживание и расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Что порядка 15% от заработной платы. Суммарно накладные расходы составляют 36 010,7 рублей.

4.5.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Расчет бюджета затрат НТИ представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Бюджет затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	46 900	7,5
Затраты на специальное оборудование	133 750,8	21,45
Затраты на основную заработную плату	303 979,45	48,70
Затраты на дополнительную заработную плату	31 313,7	5,02
Страховые взносы	72 021,3	11,54
Накладные расходы	36 010,7	5,77
Бюджет затрат НИИ	623 975,95	100

4.6. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{542\,753,9}{542\,753,9} = 1, \quad (4.17)$$

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{400\,000}{542\,753,9} = 0,74, \quad (4.18)$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{300\,000}{542\,753,9} = 0,55, \quad (4.19)$$

где I_{Φ}^P - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки показывает, что стоимость разработки больше стоимости конкурентов.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.20)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Далее в таблице 4.11 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта, где аналог 1 – получение покрытий с МАХ-фазой с использованием комбинированной мишени, а аналог 2 – получение покрытий с МАХ-фазой методом спекания из порошков.

Таблица 4.11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Критерии				
1. Производительность	0,35	5	3	4
2. Простота методики получения покрытий	0,1	5	5	5
3. Надёжность	0,15	4	4	4
4. Качество покрытий	0,3	4	5	2
5. Возможность автоматизации	0,1	5	5	3
Итого	1	24	22	18

$$I_m^p = 0,35 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 = 4,55,$$

$$I_m^{a1} = 0,35 \cdot 3 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 4,15, \quad (4.21)$$

$$I_m^a = 0,35 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,3 \cdot 2 + 0,1 \cdot 3 = 3,40,$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{финр}}^P$) и аналога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$\begin{aligned} I_{\text{финр}}^P &= \frac{I_m^P}{I_{\phi}^P} = \frac{4,55}{1} = 4,55, \\ I_{\text{финр}}^{a1} &= \frac{I_m^{a1}}{I_{\phi}^{a1}} = \frac{4,15}{0,74} = 5,61, \\ I_{\text{финр}}^{a2} &= \frac{I_m^{a2}}{I_{\phi}^{a2}} = \frac{3,4}{0,55} = 6,18, \end{aligned} \quad (4.22)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^P}{I_{\text{финр}}^{ai}}, \quad (4.23)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта;

$I_{\text{финр}}^P$ – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{финаi}}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В таблице 4.12 представлена сравнительная эффективность разработки, где аналог 1 – получение покрытий с МАХ-фазой с использованием комбинированной мишени, а аналог 2 – получение покрытий с МАХ-фазой методом спекания из порошков.

Таблица 4.12 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,74	0,55
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,55	4,15	3,40

Таблица 4.12 – Сравнительная эффективность разработки (продолжение)

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
3	Интегральный показатель эффективности	4,55	5,61	6,18
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,74	0,91	1

Можно заметить, что сравнительная эффективность используемого метода разработки меньше, чем у аналогов за счет его большей стоимости. Но в долгосрочной перспективе данный метод получения покрытий с МАХ-фазой более выгоден благодаря качеству получаемых покрытий.

Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

В ходе описания раздела, была проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования. Кроме того, исследование было рассмотрено с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения в сравнении с существующими на рынке конкурентами. С помощью SWOT – анализа были определены сильные и слабые стороны проекта, а также изучены рыночные возможности и угрозы. Также в данном разделе разработан поэтапный план проведения научно-исследовательских работ с привязкой к исполнителю. На основе этого плана был разработан график работы, спланирован бюджет проекта.

5. Социальная ответственность

Введение

Основная задача данного раздела – осветить вопросы, связанные с обеспечением нормативных условий труда, а именно: санитарно-гигиенических условий, пожарной безопасности, а также защиты от опасных производственных факторов. Важным условием является согласование данных действий с нормативными документами, действующими на территории Российской Федерации.

Настоящая дипломная работа посвящена осаждению покрытий с использованием магнетронной распылительной системы. Эксперименты производились на вакуумной установке, состоящей из источника электромагнитного излучения, персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ), баллонов со сжатым газом аргоном, форвакуумного пластинчато-роторного, турбомолекулярного и криогенного насосов, и блоков питания высокого напряжения. Следовательно, для внедрения определенных правил и мер предосторожности требуется разработать комплекс мероприятий технического, организационного, режимного и правового характера, минимизирующих негативные последствия.

Согласно [25] к выполнению работы на вакуумных системах допускается работник не моложе 18 лет, прошедший медицинский осмотр и не имеющий противопоказаний по состоянию здоровья, имеющий необходимую теоретическую и практическую подготовку, получивший необходимые практические навыки по выполнению работ на вакуум-формовочной машине и прошедший вводный и первичный на рабочем месте инструктажи по охране труда.

Работник, независимо от квалификации и стажа работы, не реже одного раза в три месяца должен проходить повторный инструктаж по охране труда; в случае нарушения требований безопасности труда, при перерыве в работе более чем на 30 календарных дней, он должен пройти внеплановый инструктаж.

Для того чтобы работник был допущен к самостоятельной работе на вакуум-формовочной машине, он должен пройти стажировку под руководством более

опытного работника для приобретения практических навыков работы на станке. Работник, показавший неудовлетворительные навыки и знания правил безопасности при работе на вакуум-формовочной машине, к самостоятельной работе не допускается.

5.1. Компоновка рабочей зоны исследователя

В этом разделе рассмотрены различные аспекты вопросов, тесно связанных с созданием рабочего места в полном соответствии с существующими нормами техники производственной безопасности, нормами санитарии и требованиями по охране окружающей среды [26, 27].

Помещение № 101 научного парка ТПУ, расположенное по адресу: проспект Ленина 2, строение 33, имеет линейные размеры 14,5×9,5 м и высоту 3 м. В аудитории есть четыре окна размерами 1,8×1,5 м, которые обеспечивают достаточное проникновение солнечного света.

Экспериментальные работы заключались в осаждении износостойких покрытий на основе МАХ-фаз при помощи вакуумной установки. Установка оснащена тремя насосами для откачки (пластинчато-роторный, турбомолекулярный и криогенный). Физический процесс напыления производился в плазме магнетронного разряда. Его предварял процесс ионной очистки с использованием ионного источника. В качестве рабочего газа был использован газ аргон.

5.2. Анализ вредных и опасных производственных факторов

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [28]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды и соответствующие им нормативные документы представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1 Отклонение показателей микроклимата	Требования к допустимым параметрам микроклимата регулируются СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [29].	3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[32].
2. Превышение уровня шума и вибрации	Требования к допустимым уровням шума приводятся в СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. [30] СН 2.2.4/2.1.8.566 Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [31].	4 Опасность поражения электрическим током	Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017 [33]

Работая на вакуумной установке возможно воздействие вредных и опасных факторов, негативно влияющих на здоровье сотрудников. К первой группе факторов

можно отнести микроклимат помещения, шум, освещение рабочей зоны. В качестве второй группы факторов необходимо рассмотреть возможность поражения электрическим током и работу с баллонами.

5.2.1. Анализ вредных факторов

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, освещённость.

Микроклимат

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха.

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 5.2. Допустимые микроклиматические не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности [29].

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата [29]

Период года	Параметры	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Оптимальные	22-24	40-60	0,1
	Допустимые	20-22 / 24-25	15-40 / 60-75	0,1
Тёплый	Оптимальные	23-25	40	0,1
	Допустимые	21,23 / 25-28	15-40 / 40-75	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Согласно [34] кратность воздухообмена аудитории, учебных кабинетов, лабораторий равна 2 с^{-1} в 1 час, при условии минимального расхода наружного воздуха на 1 человека не менее $20 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На установке предусмотрена принудительная вытяжка из вакуумного насоса.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – $0,1 \text{ м/с}$, температура летом – $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$, зимой – $13\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$. В лаборатории вентиляция осуществляется механическим путём.

Расчет вентиляции

Расчет вентиляции производится по формуле:

$$L = k \cdot V. \quad (5.1)$$

где L – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

k – кратность воздухообмена, ч^{-1}

V – объем помещения, м^3

Площадь помещения составляет:

$$S = 14,5 \cdot 9,5 = 137,75 \text{ м}^2. \quad (5.2)$$

Высота потолков 3м. Отсюда следует, объем помещения:

$$V = 137,75 \cdot 3 = 413,25 \text{ м}^3. \quad (5.3)$$

Таким образом:

$$L = 2 \cdot 413,25 = 826,5 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (5.4)$$

Необходимый расход воздуха обеспечивает радиальный вентилятор ВЦ 4-70(М)-2,5 производительностью $380 - 880 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Параметры микроклимата в помещении соответствуют нормам [29, 34].

Шум и вибрация

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, утверждённых [30].

В таблице 5.3 представлены предельно допустимые уровни звукового давления для лаборатории с шумным оборудованием.

Таблица 5.3 – Предельно допустимые уровни звукового давления для лаборатории с шумным оборудованием [30]

Рабочее место	Частота, Гц								
	Уровень звукового давления, дБ								
Лаборатории с шумным оборудованием	31	65	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	103	91	83	77	73	70	68	66	64

Источник шумового загрязнения – вращающиеся части механических насосов. При работе механического насоса максимальность шумового загрязнения составляет 52 дБ на расстоянии 1 м. Длительность возникновения максимальных шумов составляет не более 5 минут. Рабочее место расположено в 2-2,5 метров от установки. Работающих в этих зонах администрация снабжает средствами индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противозумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

К средствам защиты от вибрации можно отнести вибродемпфирование (процесс уменьшения уровня вибрации путём превращения энергии механических

колебаний системы в другие виды энергии), виброгашение (уменьшение уровня вибрации защищаемого объекта путем введения в систему дополнительных сопротивлений упругого или инерционного типа) и виброизоляцию (осуществляется посредством упругой связи, препятствующей передаче вибраций от источника колебаний к элементам конструкции или человеку).

В таблице 5.4 представлены предельно допустимые значения производственной локальной вибрации.

Таблица 5.4 – Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации [31]

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Виброускорение		Виброскорость	
	м/с ²	дБ	м/с ² ·10 ⁻²	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,8	129	1,4	109
63	5,6	135	1,4	109
125	11,0	141	1,4	109

Параметры шума и вибрации в помещении соответствуют нормам [30, 31].

Уровень освещенности

Уровень освещенности, на рабочем месте, должен соответствовать условиям работы и быть оптимальным по яркости. Световой спектр должен максимально соответствовать дневному освещению, так как оно оптимально соответствует человеческой физиологии. Очень высокий уровень освещенности, так же, как и недостаточный, приводит к быстрому утомлению зрения. Освещение должно быть равномерным на всей площади рабочего места, так как при переносе взгляда с более освещенных на менее освещенные участки рабочего места и наоборот происходит понижение остроты зрения на достаточно долгий промежуток времени. Требования к уровню освещенности в производственных помещениях утверждены сводом правил [32].

Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Выбор между равномерным и локализованным освещением проводится с учётом особенностей производственного процесса и размещения технологического оборудования. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Применение одного местного освещения на рабочих местах не допускается.

Расчет светильников

Производственное помещение, где располагается экспериментальная ионно – плазменная установка, имеет следующие параметры (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Параметры помещения

Длина (A), м	Ширина (B), м	Высота (H), м	Высота рабочей поверхности над полом (h_{pn}), м
14,5	9,5	3,0	0,8

Согласно СНиП 23-05-95 [32], необходимо создать освещенность данного помещения не ниже $E_H = 200$ лк, в соответствии с характеристикой зрительной работы (грубая, очень малой точности). Значение отклонения светового потока должно находиться в диапазоне от -10 % до 20 %.

Рассчитаем площадь помещения S :

$$S = A \cdot B = 14,5 \cdot 9,5 = 137,75 \text{ м}^2. \quad (5.5)$$

Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

В помещении установлены светодиодные светильники TDS-ARM 418-56 ECO, световой поток которых равен ФЛД = 4000 Лм, мощность 34 Вт, длина светильника равна 595 мм, ширина – 595 мм.

В помещении находится 3 ряда осветительных приборов по 8 светильников в каждом ряду. Тогда $N = 24$.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E_{\text{н}} \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot 0,53} = \frac{200 \cdot 137,75 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{24 \cdot 0,53} = 3573,7. \quad (5.6)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%, \quad (5.7)$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{4000 - 3573,7}{4000} \cdot 100\% = 10,65\%. \quad (5.8)$$

Таким образом: $-10\% \leq 10,65\% \leq 20\%$. Значит световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Параметры освещенности соответствуют нормам [32].

5.2.2 Анализ опасных факторов

Основные параметры, характеризующие условия труда это: поражение электрическим током, работа с сжатым газом в баллонах и пожаровзрывобезопасность (ПВБ).

Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования [33].

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока. Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасные помещения) [33].

Лаборатория относится ко второму классу «Помещение с повышенной опасностью» ввиду большого количества металлического оборудования. Имеется угроза поражения электротоком при косвенном касании токоведущих элементов. В результате пробоя изоляции на кожухе станка присутствует опасное напряжение [33].

В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Работа со сжатым газом в баллонах

При работе на вакуумной установке в качестве газа-носителя используется особо чистый аргон. Газообразный и жидкий аргон получают из воздуха и остаточных газов аммиачных производств. Газообразный аргон не оказывает опасного воздействия на окружающую среду. Он тяжелее воздуха и может накапливаться в слабо проветриваемых помещениях у пола. При этом снижается содержание кислорода в воздухе, что вызывает кислородную недостаточность и удушье.

Необходимо знать и соблюдать правила пользования газовыми приборами. Проверить целостность газового баллона и прочность его закрепления, наличие видимых повреждений. Вентиль газового баллона и резьба должны находиться в исправленном состоянии, редуктор должен соответствовать газу в баллоне [35, 36].

Пожаровзрывобезопасность

Согласно [37] помещение, в котором производится работа с вакуумной установкой и прочими ее узлами относится к категории В4, т.е. к помещениям, в которых находятся (обрабатываются) горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть. Помещения категории В4 надлежит оборудовать системами автоматической противопожарной защиты, в соответствии с требованиями [38]. Согласно [39] класс зоны помещения №101 научного парка ТПУ – П Па. В таких помещениях обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

Для получения экспериментальных образцов требуются газ аргон (Ar), который находится под высоким давлением. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью. Разрушение баллонов может явиться причиной взрыва и пожара.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны в [35, 36].

В целях безопасности, необходимо выполнение общих правил эксплуатации баллонов:

- баллоны должны быть установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, цепью, тросом и так далее, а также защищены от падения на них сверху каких – либо предметов;

- баллоны с газом, устанавливаемые в помещениях, должны находиться 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;

- выпуск газов из баллона должен производиться через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет. Камера низкого давления редуктора должна иметь манометр и пружинный предохранительный клапан, отрегулированный на соответствующее давление в емкости;

- во всех случаях открывать и закрывать вентиль баллона необходимо медленно.

Для обеспечения пожарной безопасности необходимо выполнение требований, описанных в [40]:

- к работе в лаборатории допускаются лица, прошедшие инструктаж по противопожарной безопасности;

- ответственным за противопожарную безопасность является руководитель лаборатории;

- средства пожаротушения (огнетушители, находящиеся в каждой комнате лаборатории) должны быть в постоянной готовности и проходить своевременную техническую проверку;

- в лаборатории должен быть план эвакуации работников в случае пожара;

- в целях предупреждения ожогов запрещается курить, пользоваться открытым огнем, применять электронагреватели открытого исполнения и с несгораемым основанием;

- легко испаряющиеся горючие жидкости должны храниться в плотно закрытых сосудах, вдали от нагревательных приборов, в специально отведенных местах;

- уметь пользоваться средствами пожаротушения и своевременно применять их;

- уходя из лаборатории, отключать свет;

- в случае возникновения пожара звонить по телефону 01, сообщить о случившемся администрации университета, одновременно принять меры к

ликвидации пожара с помощью первичных средств огнетушения (огнетушители), находящихся в корпусе.

5.3. Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС)

При возникновении неисправностей в работе на вакуумной установке необходимо выполнить следующие действия:

- отключить питание компьютера;
- отключить действующие насосы;
- закрыть клапан подачи воды;
- закрыть вентиль подачи аргона;
- известить об этом вышестоящего руководителя.

В таблице 5.6 представлен перечень возможных чрезвычайных ситуаций, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС.

Таблица 5.6 – Чрезвычайные ситуации, меры предотвращения ЧС, меры по ликвидации последствий ЧС

Чрезвычайная ситуация	Меры предотвращения ЧС	Меры по ликвидации последствий ЧС
Утечка газа из баллона	<p>1.Проверка целостности газового баллона и прочности его закрепления</p> <p>2.Вентиль газового баллона и резьба должны находиться в исправленном состоянии</p> <p>3.Редуктор должен соответствовать газу в баллоне.</p>	<p>1.Прекратить подачу газа из баллона</p> <p>2.Сообщить об аварийной ситуации непосредственному руководителю</p>

Таблица 5.6 – Чрезвычайные ситуации, меры предотвращения ЧС, меры по ликвидации последствий ЧС (продолжение)

Чрезвычайная ситуация	Меры предотвращения ЧС	Меры по ликвидации последствий ЧС
Утечка газа из баллона	4. Проведение периодических инструктажей по безопасности, связанной с утечкой газа из баллона	
Возгорание	1.Использование только исправного оборудования 2.Проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности 3.Отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ.	1.Прекратить работу 2.Закрывать баллон с газом 3.Отключить электрооборудование 4.Позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 112 5. Сообщить о случившемся руководителю подразделения 6.Приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

Таблица 5.6 – Чрезвычайные ситуации, меры предотвращения ЧС, меры по ликвидации последствий ЧС (продолжение)

Чрезвычайная ситуация	Меры предотвращения ЧС	Меры по ликвидации последствий ЧС
<p style="text-align: center;">Поражение электрическим током</p>	<p>1.Использование только исправного оборудования</p> <p>2.Недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения</p> <p>3.Проведение периодических инструктажей по электробезопасности</p>	<p>1.Освободить пострадавшего от воздействия электрического тока</p> <p>2.Проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь</p> <p>3.Оказать пострадавшему необходимую первую помощь</p> <p>4.Позвонить в службу экстренного реагирования по телефону 112</p> <p>5.При необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение</p> <p>6.О произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя подразделения.</p>

Вывод по разделу «Социальная ответственность»

В разделе рассмотрены следующие вредные и опасные факторы:

- микроклимат [29, 34];
- шум [30];
- вибрация [31];
- освещенность [32];
- электробезопасность [33];
- работа со сжатым газом в баллонах [35, 36];
- пожаровзрывобезопасность [37, 40].

Помещение № 101 научного парка ТПУ относится:

- по электробезопасности ко второму классу «Помещение с повышенной опасностью»;
- по взрывопожарной безопасности к категории В4 [37]. Класс зоны помещения П-Па [39].

Также в разделе описан перечень возможных чрезвычайных ситуаций, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС. Возможные чрезвычайные ситуации:

- утечка газа из баллона;
- возгорание;
- поражение электрическим током.

Список литературы и информационных источников

1. Ковалев Д. Ю. и др. MAX фаза в системе Ti-Zr-Al-C: синтез и кристаллическая структура // Труды ежегодной научной конференции ИСМАН. – 2016. – С. 48-54.
2. Медведева Н.И., Еняшин А.Н., Ивановский А.Л. Моделирование электронного строения, химической связи и свойств тройного силикокарбида Ti_3SiC_2 // Журнал структурной химии. – 2011. – Т. 52, №4. – С. 806-822.
3. Sokol, Maxim, et al. On the chemical diversity of the MAX phases // Trends in Chemistry 1.2 (2019): 210-223.
4. Кайполдаев О.Е. Получение и структура двумерных материалов на основе соединений карбида титана: дис – Алматы, 2017. – 97 с.
5. Сметкин А.А., Майорова Ю.К. Свойства материалов на основе MAX-фаз // Научный центр порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, Россия.
6. Галышев С.Н. Структурообразование и формуемость материалов на основе max-фаз системы Ti-Al-C, полученных в режиме горения и высокотемпературного деформирования. // УГАТУ, Черноголовка – 2015.
7. Tzenov, Nikolay V., and Michel W. Barsoum. Synthesis and characterization of Ti_3AlC_2 // Journal of the American Ceramic Society 83.4. – 2000. – P.825-832.
8. Кошуро, Владимир Александрович и др. Структура и микротвёрдость упрочнённых слоёв, формируемых на титане при лазерной обработке в среде графита // Вестник Саратовского государственного технического университета - 2021 – С. 80-87.
9. Ahams, S. T., et al. Ab initio study of the structure, elastic, and electronic properties of $Ti_3 (Al_{1-n}Si_n) C_2$ layered ternary compounds // Scientific Reports 11.1 – 2021. – P. 1-8.
10. Zhang, Yanli, et al. Two-dimensional TiC nanocrystals produced by molten salt treatment of carbon black and Ti_2AlC // International Journal of Materials Research 112.11 – 2021. – P. 852-859.

11. Авраменко В. А. и др. Искровое плазменное спекание как инновационный подход в создании наноструктурированных керамик нового поколения // Наноматериалы и технологии - VI. – 2016. – С. 82-90.
12. Сиделев Д.В. Осаждение покрытий из хрома и никеля с помощью магнетронного диода с «горячей» мишенью / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» - 2018 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/52755/1/dis00287.pdf> (Дата обращения: 22.05.2022)
13. IZOVAC – Вакуумное напылительное оборудование [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://izovac.by/> (Дата обращения 23.05.2022).
14. Грудинин В.А., Сиделёв Д.В. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Лабораторный практикум» / НОЦ Б.П. Вейнберга – Томск 2021.
15. Рентгеновская дифрактометрия поликристаллов. Методические указания к лабораторным работам по диагностике материалов / ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при ФТИ им. А.Ф. Иоффе – Санкт-Петербург 2010 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.school.ioffe.ru/phys/files/XRD_v.n1.1.pdf (Дата обращения: 24.05.2022).
16. Авдонцева Е.Ю. Рентгенофазовый анализ. Часть 1 // Методика эколого-геологических исследований – Кафедра кристаллографии СПбГУ [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://crystal.geology.spbu.ru/files/courses/ecogeological_methodology/ecogeological_methodology_01.pdf (Дата обращения: 24.05.2022)
17. Shimadzu. Excellence in Science / Рентгеновский дифрактометр XRD – 7000 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.shimadzu.ru/xrd-7000> (Дата обращения: 24.05.2022)

18. В.Э. Кутырло и др. Использование энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в полевых условиях разведки месторождений калийных солей / Материалы Международной научной конференции, посвящённой 110-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашёва (1907–1987) Том. Часть 1. Геология и полезные ископаемые. Четвертичная геология. Инженерная геология – 2017, с 41 – 43.
19. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://sernia.ru/training/energodispersionnaya_rentgenovskaya_spektroskopiya_3/ (Дата обращения: 25.05.2022).
20. Лабораторные работы по теме «Сканирующая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ» / СПбГУ – Кафедра ядерно-физических методов исследования [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://nsp.phys.spbu.ru/Pdf/Лекции/Электронная%20микроскопия/Лабораторные%20работы%20-%20электронная%20микроскопия.pdf>
21. Нанотвердомеры NHT2 «CSM Instruments SA» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/56136-14-nht2-59914> (Дата обращения: 25.05.2022).
22. Ю.В. Василевич и др. Измерение твердости металлов: лабораторная работа по дисциплине «Неразрушающий контроль качества» для студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» – Минск: БНТУ, 2010. – 46 с.
23. Белоус В.А. и др. Защитные покрытия на основе МАХ-фазы Ti_2AlC / Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина.
24. Sekino, Tohru, and K. Niihara. Microstructural characteristics and mechanical properties for Al_2O_3 /metal nanocomposites // Nanostructured Materials 6.5-8 – 1995. – P. 663-666.
25. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 11 декабря 2020 г. № 887н «Об утверждении Правил по охране труда при обработке металлов».

- 26.ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
- 27.ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
- 28.ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 29.СанПиН 2.2.4/548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 30.СН 2.2.4/2.8.1.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
- 31.СН 2.2.4/2.1.8.566. Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
- 32.СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.
- 33.Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017.
- 34.СП 118.13330.2012*. Свод правил. Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06- 2009.
- 35.ПБ 10-115-96. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – 1996.
- 36.ГОСТ 12.2.085-82. ССБТ. Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности. – 1982.
- 37.СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок во взрывопожарной и пожарной опасности.
- 38.СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
- 39.Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

40.ГОСТ 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения