

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

Школа – Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки – 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ИОНАМИ МЕДИ

УДК 669.295.5.056.93

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ02	У Шаша		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Божко И.А.	К.ф.-М.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
с.н.с. ЛМПиН ИФПМ СО РАН	Федорищева М.В.	К.ф.-М.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП	Гасанов М.А.	д-р.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич О.А.	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Хасанов О.Л.	д-р.т.н, профессор		

Томск – 2022 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1.	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-3	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
ОПК(У)-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен реализовывать на производстве технологии сухого компактирования порошковых материалов, используя методы горячего и холодного прессования, ультразвукового и коллекторного компактирования
ПК(У)-2	Способен диагностировать и модернизировать эксплуатационные свойства материалов с учетом наноразмерной составляющей, используя традиционное и современное оборудование и программное обеспечение приборов
ПК(У)-3	Способен исследовать состав и структуру веществ, с учетом специфики наноразмерных материалов, используя современное оборудование и программное обеспечение приборов
ПК(У)-4	Способен прогнозировать влияние микро- и нано- масштаба на механические, физические, поверхностные и другие свойства материалов при выборе и реализации технологии получения объемных наноматериалов
ПК(У)-5	Способен реализовывать технологии получения наноматериалов с учетом ресурсоэффективности и экологической безопасности

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

Школа – Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки – 22.04.01. «Материаловедение и технологии материалов»
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ О.Л. Хасанов
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ02	У Шаша

Тема работы:

Изучение структурно-фазового состояния титановых сплавов после ионно-лучевой обработки ионами меди	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 33-33/С от 02.02.2022
Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.22

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Улучшение прочностных свойств, адгезии и термоциклической стойкости керамических покрытий на поверхности образцов титанового сплава VT1-0, подвергнутых имплантации ионами меди при различном времени обработки.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Задачи работы: 1. Анализ и систематизация литературных источников по теме исследования; 2. Исследование микроструктуры и фазового состава титанового сплава после ионно-лучевой обработки ионами меди методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии; 3. Изучение изменения параметров твердого раствора на основе α -Ti и величины остаточных напряжений в поверхностных слоях образцов титанового сплава VT1-0, подвергнутого ионно-лучевой обработке ионами меди; 4. Оценка механических характеристик титанового сплава VT1-0, подвергнутого ионно-лучевой обработке ионами меди; 5. Подготовка материалов для разделов «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».
Перечень графического материала	Электронно-микроскопические изображения подготовленных образцов титанового сплава и рентгенограммы РФА.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов М.А., Профессор ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Антоневич О.А., доцент ООД ШБИП
Приложение А (английская часть)	Демьяненко Н.В., ст. преп. ОИЯ ШБИП
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Литературный обзор,	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ02	У Шаша		

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

Школа – Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки – 22.04.01. «Материаловедение и технологии материалов»
 Уровень образования – магистратура
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение материаловедения
 Период выполнения весенний семестр 2022 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
---	--

Дата Контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.03.2021	Обзор Литературы	15
20.03.2021	Объекты и методы исследования	30
01.04.2021	Результаты и их обсуждение	15
30.04.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
30.04.2021	Социальная ответственность	15
27.05.2021	Подготовка приложения (А) на иностранном языке	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Хасанов О.Л.	д-р.техн.наук, профессор		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ02	У Шаша

Школа	ИШНПТ	Отделение	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение исследования влияния ионной имплантации ионами меди на структурно – фазовые состояния, физико-механические свойства титановых сплав.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. График проведения и бюджет НТИ 4. Расчёт денежного потока 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ02	У Шаша		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 4БМ02		ФИО У Шаша	
Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	магистратура	Направление/ специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Изучение структурно - фазового состояния титановых сплавов после ионно-лучевой обработки ионами меди	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> титановый сплав ВТ1_0, подвергнутого ионно-лучевой обработке ионами меди.</p> <p><i>Область применения:</i> в аэрокосмической промышленности в основном используются для изготовления деталей компрессоров авиационных двигателей, и конструкционных деталей ракет, реактивных снарядов и высокоскоростных самолетов и т. д.</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория.</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 6 м на 6 м, высота – 3,2 м, 2 окна.</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> электроимпульсное плазменное спекание на установке SPS-515S, верстаки и стеллажи, низкоскоростная пила IsoMet, ультразвуковой ванны, установки шлифования и 4 рабочего стол.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> резка блоков образцов, очистка образцов в ультразвуковой ванне, шлифовка и полировка образцов.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 12.2.033-78. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.</p> <p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ.</p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p><i>Вредные факторы:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Отклонение показателей микроклимата; 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны; 3. Превышение уровня шума; 4. Повышенный уровень вибрации; <p><i>Опасные факторы:</i></p>

<p>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</p>	<p>1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека. <i>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</i> тепловая изоляция трубопроводов, вентиляция, использование защитных костюмов, виброизолирующие рукавицы, перчатки, беруши, наушники, защитные ограждения. <i>Расчет:</i> расчет системы искусственного освещения.</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p><i>Воздействие на селитебную зону:</i> нет; <i>Воздействие на атмосферу:</i> выбросы из вентиляционных систем, содержащие низкие концентрации радиоактивных веществ; тепловое воздействие вследствие испарения части охлаждающей воды; <i>Воздействие на гидросферу:</i> сбросы охлаждающей воды при использовании в качестве охладителя рек, прудов; жидкие радиоактивные отходы; <i>Воздействие на литосферу:</i> твердые отходы образцов и шлифовальных бумаг.</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</p>	<p><i>Возможные ЧС:</i> пожарная опасность, взрывы, мороз, землетрясение. <i>Наиболее типичная ЧС – пожар.</i></p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ02	У Шаша		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа «Изучение структурно-фазового состояния титановых сплавов после ионнолучевой обработки ионами меди» состоит из 104 страниц печатного текста, содержит 18 рисунков, 30 таблиц и 53 источника использованной литературы.

Ключевые слова: титановый сплав VT1-0, ионно-лучевая обработка, структурно-фазовое состояние, рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, остаточное напряжение.

Объектом исследования является титановый сплав VT1-0, подвергнутого ионно-лучевой обработке ионами меди.

Работа направлена на улучшения прочностных свойств, адгезии и термоциклической стойкости керамических покрытий на поверхности образцов титанового сплава VT1-0, подвергнутых имплантации ионами. Цель данной работы заключается в исследовании закономерности формирования, особенности структуры и свойства титанового сплава VT1-0, подвергнутого имплантации ионами меди при различном времени обработки.

В процессе исследования проводились обзор литературы, исследование структурно-фазового состояния, оценку механические характеристики обработанного ионным пучком титанового сплава, и исследование влияния предварительной ионной обработки титановой подложки на адгезионную прочность сформированных на ней покрытий.

В результате исследования установлено, что в зависимости от продолжительности ионной обработки титановый сплав может существенно модифицировать структурно-фазовое состояние титановой подложки. При небольших продолжительности обработки на поверхности подложки уже начинается ионное травление, четко прослеживаются слои, имеющие различный контраст. С увеличением времени обработки образуются ямки травления, которые углубляются. Между ямками травления видны горизонтальные перемычки, т.е. в материале поверхностного слоя подложки

образуются поры сложной формы. Результаты фазового анализа показали, что титановый сплав ВТ1-0 без ионной модифицирующей обработки представляет собой фазу α -Ti. В образцах титановых сплавов, подвергнутых имплантации ионами меди, интерметаллические соединения системы Cu-Ti образовались за счет динамического перемешивания имплантации ионов меди и ионов титана. После обработки образцов титана ионами меди в течение 6 минут было обнаружено формирование фаз, обогащенных титаном: CuTi_2 и CuTi_3 . При увеличении продолжительности обработки до 7,5 мин интенсивность дифракционного пика Ti ослабевать и появлялись более богатые медью фазы, такие как Cu_2Ti . В конечном итоге, практически вся поверхность состоит из медно-титановых интерметаллических соединений. Одновременно с появлением фаз диаграммы Cu-Ti при увеличении длительности обработки имеет место возрастание микротвердости примерно в 4 раза, модуль упругости и коэффициент восстановления также увеличиваются.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ПЭМ – Просвечивающий электронный микроскоп;
- РЭМ – Растровый электронный микроскоп;
- РФА – Рентгенофазовый анализ;
- СЭМ – Сканирующая электронная микроскопия;
- РСА – Микрорентгеноспектральный анализ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	14
1. Обзор литературы.....	16
1.1 Титан и титановые сплавы	16
1.2 Диаграмма состояния системы Ti - Cu	16
1.3 Ионная имплантация	18
1.4 Типы напряжений.....	21
2. Объекты и методы исследования.....	24
2.1 Объекты исследования	24
2.2 Методы исследования	25
2.2.1 Методы качественного фазового анализа.....	25
2.2.2 Графические методы определения параметров кристаллической решетки методом экстраполяции.....	26
2.2.3 Метод определения микронапряжений по уширению дифракционных линий .	27
2.2.4 Метод определения макронапряжения при асимметричной рентгеновской съемке (метод $\sin^2\psi$)	28
2.2.5 Метод оценки среднеквадратичных смещений атомов.....	29
2.2.6 Методика просвечивающей электронной микроскопии	29
2.2.7 Методика сканирующей (растровой) электронной микроскопии	34
2.2.8 Методика микрорентгеноспектрального анализа.....	35
2.2.9 Методика оценки параметров механических свойств.....	36
3. Результаты и их обсуждения.....	37
3.1 Структурно-фазовое состояние VT1-0 после обработки сильноточным потоком ионов меди.....	37
3.1.1 Рентгенодифракционные исследования. Параметр кристаллической решетки α - титана после обработки ионами меди.....	37
3.1.2 Исследование морфологии поверхности методом растровой электронной микроскопии	43
3.1.3 Исследование структурно-фазового состояния титана, модифицированного ионами меди, методом просвечивающей электронной микроскопии	43
3.2 Механические свойства титановой подложки после обработки сильноточным потоком ионов меди	51
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	52

4.1	Предпроектный анализ.....	52
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования.....	52
4.1.2	Анализ конкурентных решений	53
4.1.3	SWOT-анализ	54
4.2	Инициация проекта	56
4.3	Планирование научно-исследовательских работ	58
4.3.1	Структура работ в рамках научного исследования	58
4.3.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	58
4.3.3	Разработка графика проведения исследования	59
4.3.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	63
4.4	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	68
5.	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	73
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	73
5.2	Производственная безопасность	74
5.2.1	Отклонение показателей микроклимата	75
5.2.2	Недостаточная освещенность рабочей зоны	76
5.2.3	Превышение уровня шума.....	78
5.2.4	Повышенный уровень вибрации	79
5.2.5	Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	80
5.3	Экологическая безопасность.....	81
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	82
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	87
	Приложение А.....	93

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка новых оптимальных защитных покрытий и улучшение их характеристики является одной из актуальных задач. Это связано с возможностью широкого применения таких покрытий для защиты различных конструкций от химических и механических повреждений и продления их срока службы. Чтобы улучшить прочностные свойства, адгезию и термоциклическую стойкость керамических покрытий на поверхности образцов, можно не только обработать покрытия, но и выполнять предварительную обработку поверхностного слоя металлической подложки. Известно, что покрытия наносятся на подложку, на их границе претерпевают резкие изменения структурно-фазового состояния и физико-механических свойств. Состояние поверхности подложки может существенно влиять на формирование структуры и свойства самого покрытия. Следовательно, предварительная обработка подложки также является эффективным методом улучшения характеристик покрытия.

Для достижения этой цели, применяется ионно-лучевая технология, основанная на контролируемом потоке высокоэнергетических ионов, взаимодействующих с твердой поверхностью для направленного изменения характеристик, связанных с атомной и дефектной структурами.

Уникальные свойства титанового сплава позволяют использовать его в качестве основы для нанесения керамических покрытий. Для эффективного наноструктурирования поверхностного слоя титанового сплава высокоэнергетическими ионными пучками необходимо выбирать ионы элемента замещения с меньшим атомным радиусом и большей массой, чем у титана, способные проникать на относительно большую глубину и вызывать значительную упругую деформацию решетки. Для этого выбирают ионы меди, обладающие наиболее подходящими характеристиками [1]. Было показано в работе [2], что, облучение титановой подложки тяжелыми ионами меди приводит к изменению фазового состава и морфологии поверхности титанового

сплава. Образование многочисленных радиационных дефектов и высокое внутреннее напряжение в имплантированном слое – одна из особенностей ионно-лучевой обработки, отличающейся от традиционных методов введения примеси. В процессе ионной имплантации на поверхности образца происходят как статические явления (фазы, дефекты), так и динамические явления (образование и диссоциация новых фаз, распыление мишени). Следовательно, могут возникать статические (остаточные после имплантации) и динамические (существующие при имплантации) внутренние напряжения [3]. При высокоинтенсивной ионной имплантации в поверхностном слое накапливаются примесные дефекты и структурно-фазовые компоненты, во многом определяют физико-механические свойства и, в конечном счете, эксплуатационные свойства материала. Поэтому в данной работе исследуется структурно-фазовое состояние, изменение остаточных напряжений поверхностного слоя титановой подложки, и рассматривается влияние предварительной ионной обработки подложки на свойства сформированных на ней покрытий.

1. Обзор литературы

1.1 Титан и титановые сплавы

Титан – серебристо-белый переходный металл, характеризующийся малым весом, высокой прочностью, металлическим блеском и хорошей коррозионной стойкостью (включая морскую воду и хлор). Благодаря своим стабильным химическим свойствам, хорошей стойкости к высоким и низким температурам, сильной кислотостойкости, а также высокой прочности и низкой плотности, часто используется в производстве ракет и космических аппаратов, известен как «космический металл» [4].

Титановый сплав обладает высокой прочностью, коррозионной стойкостью и хорошей термоциклической стойкости, используется для изготовления различных деталей космического корабля, в том числе внешней оболочки топливного бака и крыльев. К тому же, что он сочетает легкий вес с высокой прочностью, что помогает усилить планеры и повысить производительность реактивных двигателей.

1.2 Диаграмма состояния системы Ti - Cu

При взаимодействии титана и меди образуются различные химические интерметаллические соединения, такие как Ti_2Cu , $TiCu$, Ti_3Cu_4 , $TiCu_4$, Ti_2Cu_3 , и $TiCu_2$.

В системе титана - меди два конгруэнтно плавящихся $TiCu$ и Ti_2Cu образуются при температуре 982 °С и 1005 °С, соответственно. Остальные соединения Ti_3Cu_4 , Ti_2Cu_3 , $TiCu_2$ и $TiCu_4$ образуются по перитетическим реакциям. Соединение Ti_3Cu_4 образуется при взаимодействии жидкой фазы с $TiCu$ при 929 ± 4 °С. При температуре 890 ± 4 °С соединение Ti_3Cu_4 взаимодействует с жидкой фазой с образованием соединения Ti_2Cu_3 . Образование соединения $TiCu_2$ относится к результатам взаимодействия жидкой фазы с фазой Ti_2Cu_3 при 870 °С. При взаимодействии фазы $TiCu_2$ и жидкой фазы происходит образование фазы $TiCu_4$ при температуре 875 °С.

Помимо перечисленных шести соединений, в системе титан-медь также имеют место три эвтектических превращения [5, 6]. На рисунке 1.1 показана диаграмма состояния Ti – Cu [7].

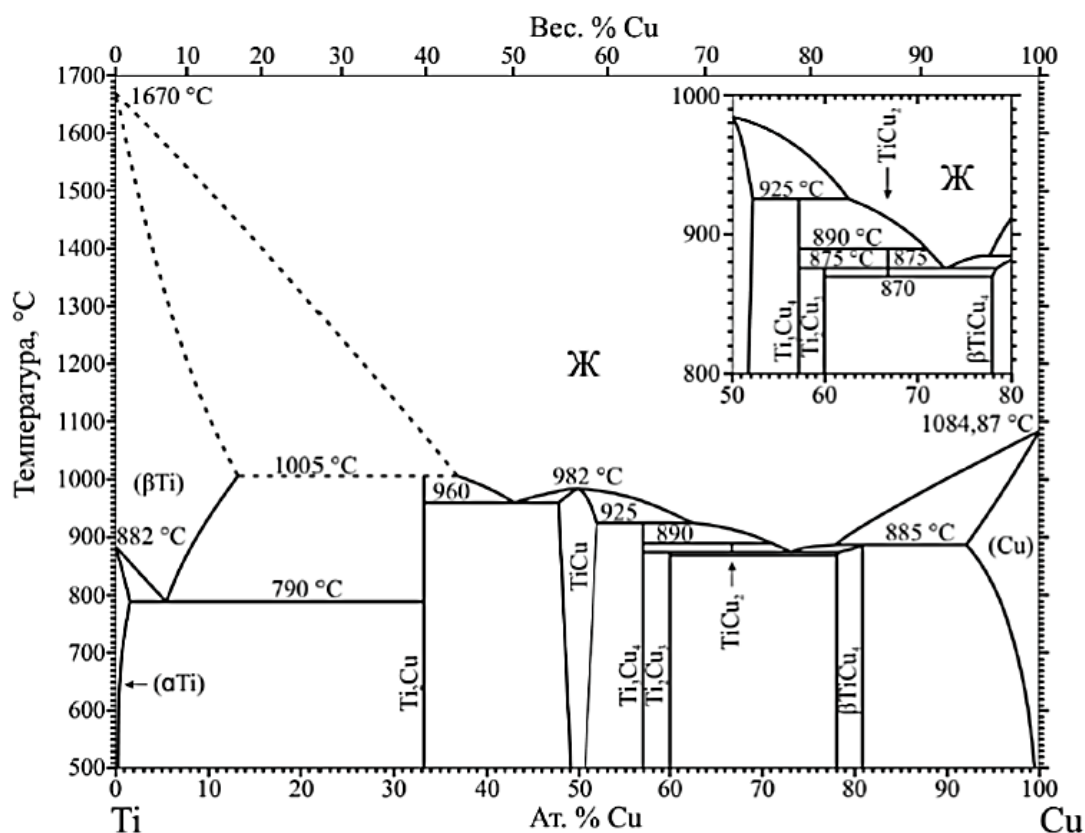


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния титан-медь

Согласно диаграмме состояния титан-медь, в таблице 1.1 представлены все возможные типы соединений, их типы и параметры кристаллической решетки.

Таблица 1.1 – Возможные фазы в системе титан-медь

Фазы	Тип кристаллической решетки	Параметр кристаллической решетки (Å)
α -Ti	Гексагональная плотноупакованная	$a = 2,9505, c = 4,6826$
β -Ti	Объемно-центрированная	$a = 3,3065$
CuTi	Тетрагональная	$a = 3,108, c = 5,887$
CuTi ₂	Тетрагональная	$a = 2,9438, c = 10,786$
Cu ₂ Ti	Орторомбическая	$a = 4,363, b = 7,977, c = 4,478$
CuTi ₃	Тетрагональная	$a = 4,158, c = 3,594$
Cu ₃ Ti	Орторомбическая	$a = 5,45, b = 4,42, c = 4,3$
Cu ₄ Ti	Орторомбическая	$a = 4,53, b = 4,342, c = 12,93$
Cu ₃ Ti ₂	Тетрагональная	$a = 3,13, c = 13,95$
Cu ₄ Ti ₃	Тетрагональная	$a = 3,13, c = 19,94$

1.3 Ионная имплантация

Ионная имплантация – высокоэффективная технология модификации поверхности материала. В процессе ионной имплантации ионизированные ионы ускоряются под действием электрического поля и за счет кинетической энергии проникают на поверхность подложки, взаимодействуют с атомами подложки, теряют энергию и остаются в определенном положении твердого материала, изменяя химический состав и фазовую структуру, тем самым изменяя физические, химические и механические свойства поверхности материала. Имплантация определенных ионов на поверхность металла позволяет получить фазы поверхностного сплава, которые трудно получить в обычных металлургических процессах, тем самым улучшая твердость, износостойкость, коррозионную стойкость и другие свойства поверхности металла. Технология ионной имплантации уже широко использовалась в военной промышленности, машиностроении, легкой промышленности, текстильной, медицинской и авиационной промышленности [8].

С помощью ускоренных ионов можно ввести практически любые легирующие элементы в любую твердую поверхность и получить желаемую концентрацию введенного легирующего элемента и его распределение по глубине в облучаемой подложки. На поверхности подложки, бомбардируемой высокоэнергетичными ионами, образуются два области [8]. Первая область –

это область ионной имплантации. Имплантированные ионы остаются в этой области и химически связываются с атомами матрицы, образуя имплантированный слой, который отличается от химического состава и структуры матрицы. Толщина слоя составляет около 0,1 мкм, и именно этот тонкий слой играет определенную роль в улучшении поверхностных свойств материала. Область ниже – это область влияния, вызванная механическим воздействием ионной бомбардировки, в которой генерируются многие дислокационные структуры, глубина этого слоя составляет около 100 мкм.

Преимущества имплантации высокоэнергетических ионов:

1. Разнообразие: в принципе, в качестве ионов имплантации можно использовать любой элемент; сформированная структура не может быть ограничена термодинамическими параметрами (диффузия, растворимость и т. д.);

2. Без изменений: исходный размер и шероховатость заготовки не меняются, подходит для последнего процесса изготовления деталей различной точности;

3. Прочность: введенные ионы напрямую соединяются с атомами или молекулами на поверхности материала, образуя модифицированный слой. Нет четкой границы раздела между модифицированным слоем и основным материалом, комбинация прочная;

4. Без ограничений: процесс введения может осуществляться при температуре материала ниже нуля, до сотен тысяч градусов; поверхность может быть усилена для тех материалов, которые не могут быть обработаны обычными методами, таких как пластмассы, сталь с низким температура отпуска и др.

Рассмотрим несколько примеров применения методов ионной имплантации для повышения характеристики образцов.

В работе [9] провели изучение влияния обработки на структуру и триботехнические свойства ВТ1-00, включая интенсивную пластическую

деформацию и имплантацию ионов меди. Образец имплантируют при температуре нагрева 120 °С с энергией 40 кэВ в течение 80–150 мин. Дозой облучения является $2,5 \times 10^{17}$, 5×10^{17} и 8×10^{17} ион/см². Установлено, что ионная имплантация эффективно увеличивает износостойкость титана ВТ1-00 в 5-6 раз. С увеличением дозы имплантата величина остаточного напряжения увеличивается, а затем резко снижается. Это может быть связано с образованием новых фаз в модифицированном слое.

В [10] в алюминиевые сплава были имплантированы ионы азота с дозами 2×10^{17} , 4×10^{17} и 8×10^{17} ион/см² и энергией 150 кэВ. Доказано, что имплантация азота значительно улучшает трибологические свойства алюминиевого сплава, и микротвердость увеличена на 30-60% в зависимости от дозы ионного тока.

Также в работе [11] сообщается, что имплантация ионов азота дозами 5×10^{16} , 1×10^{17} и 6×10^{17} ион/см² с энергией 180 кэВ улучшила триботехнические и механические свойства алюминия, особенно твердость и износостойкость. Установлено, что твердость поверхностного слоя алюминия увеличилась в 6 раз при максимальной дозе имплантата. Благодаря образованию новых фаз и упрочнения твердого раствора в ионно-имплантированном подслое и образованию в нем дефектных структур микротвердость увеличивается, и, таким образом, увеличивается износостойкость материала.

Титановые сплава ВТ-23 обрабатывали непрерывным пучком ионов меди с энергией ~ 2 кэВ и дозами $0,9 \times 10^{16}$, $1,8 \times 10^{17}$ и $2,25 \times 10^{17}$ ион/см². Определена зависимость микротвердости поверхностного слоя ВТ-23 от времени обработки ионами меди. Повышение микротвердости поверхностного слоя может быть связано с образованием в ионно-модифицированном поверхностном слое интерметаллидных фаз Cu_xTi . По мере увеличения времени ионной обработки, твердость увеличивается с увеличением толщиной ионно-легированного слоя [12].

В работе [8] ионы азота были имплантированы в поверхности титановых сплавов Ti-4Al-2V и Ti-2Al-2,5Zr и исследованы изменения состава и структуры поверхности. Включая неимплантированные образцы, образцы с дозой имплантации ионов азота 3×10^{17} и 8×10^{17} ион/см². Энергия ионов составляла 75 кэВ. Результаты РФА показывает, что после ионной имплантации образуются новые фазы TiN и TiO₂. Испытание на микротвердость Ti-2Al-2,5Zr показывает, что имплантация ионов N может эффективно улучшить твердость поверхности, увеличение твердости с увеличением дозы имплантации.

1.4 Типы напряжений

Реальная структура кристаллических материалов отличается от идеальной наличием дефектов различного рода, которые в свою очередь приводят к увеличению микродеформаций кристаллической решетки и связанных с ними упругих внутренних напряжений. Различают три основных типа напряжений [13]:

1. Напряжения I рода (макронапряжения) характеризуется упругой деформацией и уравнивается по всему объему или большей части образца. При наличии макронапряжений удаление любой части детали приведет к нарушению равновесия между другими частями, что приведет к деформации (растрескивание и коробление) изделия. Контроль макронапряжений очень важен, поскольку он может значительно повысить надежность изделия в эксплуатации [14].

2. Напряжения II рода (микронапряжения) – это напряжение, которое уравнивается в объеме отдельных зерен или субзерен, что приводит к появлению неоднородного поля упругой деформации.

3. Напряжения III рода (статическое искажение решетки) относятся к напряжениям, которые уравниваются в объеме элементарной ячейки кристаллической решетки и вызывают уменьшение интенсивности отражения рентгеновских лучей. В деформированных металлах статическое искажение

уравновешивается в атомной группе, расположенной вблизи пределов зерен, поверхностей скольжения и так далее. Такое искажение может быть связано с дислокацией.

В кристаллах твердого раствора могут происходить смещения атомов в идеальном положении узла решетки, поскольку различия в размере атомов и химическом взаимодействии между одинаковым и разным атомом, образующим твердый раствор. Если возникают микронапряжения и статические искажения, удаление частей тела не приведет к перераспределению.

Рентгеновский метод позволяет проводить анализ внутренних напряжений, так как разные виды напряжений приводят к разным изменениям рентгенограммы [15]. Макроскопическое напряжение может привести к смещению дифракционной линии (рисунок 1.2, б), что особенно очевидно при больших углах Брэгга. Микронапряжение вызывает уширение линий (рисунок 1.2, в). Наибольшие изменения в ширине интерференциальной линии наблюдаются при большом угле Брэгг. Ориентированный микронапряжений также может привести к смещению линии. Если наблюдаются статические искажения, связанные с смещениями атомов в идеальных положениях, то уменьшаются интенсивности интерференциальных линий (рисунок 1.2, в) и фон диффузного отражения увеличивается. Для линий с большими индексами снижение интенсивности особенно очевидно [16].

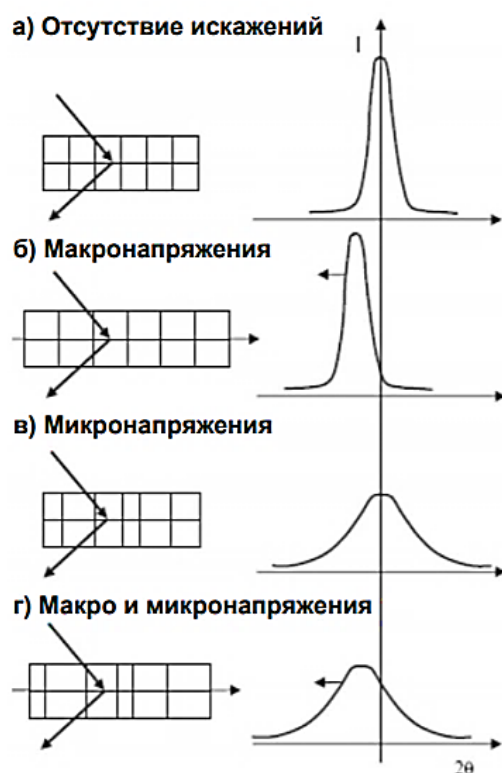


Рисунок 1.2 – Напряжения разных типов

Остаточные напряжения, создаваемые структурными механизмами, могут быть растягивающими или сжимающими. Обработка титанового сплава ионными пучками приводит к изменению напряженного состояния приповерхностного слоя, в большинстве случаев – сжимающего напряжения [17 , 18]. При ионной имплантации по мере увеличения концентрации легирующих элементов в образце увеличивается величина смещения атомов и возрастает статическая составляющая среднеквадратичного смещения [19].

Прогнозировать возможные фазовые превращения при различных процессах обработки сплавов можно путем анализа изменения параметров кристаллической решетки сплавов и среднеквадратичных смещений атомов [20]. Представляет научный интерес исследование статического смещения атомов кристаллической решетки, вызывающих микронапряжения III рода.

2. Объекты и методы исследования

2.1 Объекты исследования

Объектом исследования в данной работе выступали Ti_VT1-0. В составе титана технического содержатся такие элементы как: Ti, Fe, Si, C, N, O и H [21], химические элементы титана марки VT1-0 в % согласно ГОСТ 19807-91:

Таблица 2.1 – Химические элементы VT1-0

Химические элементы VT1-0 (Вес. %)						
Ti	Fe	Si	N	C	O	H
99,24 – 99,7	до 0,25	до 0.1	до 0,04	до 0,07	до 0,2	прочих 0,3
Где Ti - основа; процентное содержание дано приблизительно						

Титан марки VT1-0 – технический титан, обладающий высокой прочностью и антикоррозионными свойствами. Цифры после буквы указывают на чистоту сплава, подразумевающую 0,3% примесей. Титан VT1-0 обладает достаточной пластичностью, ударной вязкостью, пластичностью и малой ползучестью. Он имеет малый удельный вес и сохраняет свои полезные свойства при низких и высоких температурах. Благодаря своим уникальным свойствам титан марки VT1-0 подходит для широкого применения: в машиностроении; изготовлении вентиляторов; в приборостроении и в аэрокосмической промышленности в основном используются для изготовления деталей компрессоров авиационных двигателей, и конструкционных деталей ракет, реактивных снарядов и высокоскоростных самолетов.

Для эффективного наноструктурирования поверхностного слоя титанового сплава с помощью высокоэнергетических ионных пучков рекомендуется выбирать ионы с атомным радиусом меньше, а массой больше, чем у титана, которые могут проникать на относительно большие глубины и вызывать значительную упругую деформацию решетки подложки. По этой причине в качестве материала для ионной бомбардировки использовали медь с наиболее подходящими свойствами.

Образец Ti_VT1-0 обрабатывается вакуумной установкой с использованием ионного металлического источника дуги вакуума с энергией 0,5 ... 2,5 кэВ и плотностью тока 2 ... 20 мА / см² на УВН-05МД «Квант». Температура 900-1000К. Образцы помещались в камеру на предметный стол напротив ионного источника для ионной имплантации. Для экспериментов были использованы три образца, которые различались временем обработки ионным пучком и дозой облучения соответственно, как видно из таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры обработки титанового сплава VT1-0 ионами меди

Образцы	Bias, V	Время обработки, мин	Флюенс, ион/см ²
Исходный VT1-0	-	-	-
Обработанный VT1-0	-900	6	1,8×10 ¹⁸
Обработанный VT1-0	-900	7,5	2,1×10 ¹⁸

2.2 Методы исследования

2.2.1 Методы качественного фазового анализа

Для рентгеновских лучей кристаллическая решетка является дифракционной, что является основой для рентгеновского метода. Типичная дифрактограмма поликристалла относится к серии узких и высоких дифракционных пиков на плавной фоновой линии [22]. Каждая твердокристаллическая фаза имеет собственную кристаллическую решетку. С помощью качественного фазового анализа можно определить, какие фазы существуют в образце [23]. Фазовый состав образцов исследовали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия) [22]. Спектры дифракции записывали в режиме непрерывного 2θ-сканирования с фокусировкой по Брэггу-Брентано в излучении кобальтового анода. Профильный анализ и количественную обработку дифрактограмм проводили с использованием программного пакета «Renex».

Качественный рентгенофазовый анализ включает идентификацию кристаллической фазы на основе межплоскостного расстояния d_{hkl} и

соответствующей интенсивностей линии I_{hkl} рентгеновского спектра. Начинают фазовый анализ с определения наличия одной из наиболее вероятных фаз. Идентификация кристаллических фаз проводилась с использованием международных баз дифракционных данных PDF.

Условием дифракции рентгеновских лучей на решетке является уравнение Вульфа-Брэгга:

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

где d – расстояние между соседними кристаллографическими плоскостями;

θ – угол отражения рентгеновского луча, град.;

n – порядок отражения;

λ – длина волны монохроматических рентгеновского излучения, падающего на кристалл.

2.2.2 Графические методы определения параметров кристаллической решетки методом экстраполяции

Метод графической экстраполяции заключается в изучение зависимости систематических погрешностей от угла θ при определении межплоскостных расстояний d и подборе этой зависимости как функция линейной экстраполяции [24]. Функция $\cos^2\theta$ использует дифрактометра для определения периода решетки, большинство погрешностей прибора пропорциональны этой функции и является наиболее распространенным методом экстраполяции. Для экстраполяции удобно с помощью функции Нельсона-Райли (уравнение 2.2), если рентгенограмма имеет достаточное количество линий с углом $\theta > 30^\circ$, при этом можно проводить более точную экстраполяцию, чем $\cos^2\theta$, функция также доступна для некубических кристаллов [25]:

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \theta}{\theta} + \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} \right) \quad (2.2)$$

Вычисления выполняются в следующем порядке:

1. Определение периода решетки «а» по ряду линий на рентгенограмме;
2. Построение зависимости между значениями периода решетки «а» от функции $f(\theta)$;
3. Полученный график аппроксимируется прямой линией и экстраполируется на $f(\theta)=90^\circ$, при этом получит значение является периода решетки.

В случае некубических сингонии были построены два отдельных графика для определения типа отражения (НК0) и (00L) для определения значений параметров «а» и «с».

2.2.3 Метод определения микронапряжений по уширению дифракционных линий

Метод Вильямсона-Холла основан на сочетании формул Шеррера и Стокса-Уилсона, учитывает уширения рефлексов, вызванное как размерами частиц, так и микронапряжениями в кристалле. В соответствии с типом аппроксимационной функции может быть получена зависимость между полушириной β пика и размером D , микродеформацией решетки ε и углом Брэгга θ . Если функция Лоренца используется для описания функции вклада эффектов размера и деформации в рассеяние рентгеновского излучения, выполняется следующая формула:

$$\frac{\beta \cdot \cos \theta}{\lambda} = \frac{1}{D} + \varepsilon \cdot \frac{4 \cdot \sin \theta}{\lambda} \quad (2.3)$$

где β – полуширина пика (FWHM), радиан; D – размер ОКР, А; $\varepsilon=(\Delta d/d)$ – относительная деформация кристаллической решетки в направлении $[hkl]$.

Выражение является уравнением прямого $y = a + bx$ от $4\sin\theta/\lambda$. Если провести линию со значением $\beta\cos\theta/\lambda$, определенным в результате серии экспериментов, то угол наклона прямой будет пропорционален значению ε , а пересечение графика с осью ординат даст значение, обратно пропорциональное D [26].

Зная относительную деформацию (микрдеформацию), можно вычислить величину микронапряжений σ по формуле:

$$\sigma = E \frac{\Delta d}{d} = E \varepsilon \quad (2.4)$$

E – модуль упругости.

2.2.4 Метод определения макронапряжений при асимметричной рентгеновской съемке (метод $\sin^2\psi$)

Макрдеформация поверхностного слоя образцов определилась с помощью метода асимметричной рентгеновской съемке (метод $\sin^2\psi$) при угле скольжения луча 3° . С помощью угла скольжения α (где α – угол между падающим рентгеновским лучом и поверхностью образца) и угла ψ (угол между нормалью к плоскости образца и нормалью к отражающей поверхности кристалла) определяется выражением: $\psi = \theta - \alpha$, где θ - угол дифракции, т. е. угол между падающим рентгеновским лучом и поверхностью кристалла.

При экстраполяции графика зависимости параметры решетки «а» от $\sin^2\psi$ для ряда отражений находится значения параметра решетки при $\sin^2\psi = 0$ ($\psi = 0^\circ$, когда отражающая кристаллографическая плоскость параллельна поверхности образца) и при $\sin^2\psi = 1$ ($\psi = 90^\circ$, когда отражающая плоскость близка к перпендикулярному положению относительно поверхности образца). Величина деформации кристаллической решетки рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_\psi = \frac{a_{\psi = 0^\circ} - a_{\psi = 90^\circ}}{a_{sym}} \quad (2.5)$$

где a_ψ – параметра кристаллической решетки α -Ti при $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 90^\circ$ при асимметричной съемке, a_{sym} – параметр решетки при симметричной съемке.

Напряжение в образцах титанового сплава рассчитывали по значениям параметра кристаллической решетки:

$$\sigma = \frac{E}{(1 + \nu)\alpha_\perp} \frac{a_{\psi_{min}} - a_{\psi_{max}}}{\sin^2 \psi_{min} - \sin^2 \psi_{max}} \quad (2.6)$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона.

2.2.5 Метод оценки среднеквадратичных смещений атомов

Изменение среднеквадратичного смещения атомов за счет изменения статической составляющей [27]. Полное среднеквадратичное смещение атомов $\langle u^2 \rangle$ оценивается с помощью уравнения (2.7) и делится на число атомов на ячейку Браве, в [28] показано, что величина смещения, то есть корень квадратный из полного среднеквадратичного смещения $\langle u^2 \rangle$ пропорциональна количеству атомов элементарную ячейку Браве.

$$u^2 = \frac{3\lambda}{16\pi^2} \left[\ln \left(\frac{I(\theta_2)I_m(1)}{I(\theta_1)I_m(2)} \right) \right] \frac{1}{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2} \quad (2.7)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, θ_1 и θ_2 – углы дифракции линий 004 и 002 соответственно. Теоретическая интенсивность линии рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{т.}} = PLG P F^2 \quad (2.8)$$

где PLG – поляризационный множитель, P – фактор повторяемости, F – структурный фактор.

$$PLG = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \quad (2.9)$$

2.2.6 Методика просвечивающей электронной микроскопии

В данной работе методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследованы микроструктуры и фазовые состава образцов [29]. Данный метод заключается в анализе специально приготовленных тонких фольг с помощью проходящих электронных пучков, которые генерируются в колонне просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжением 200 кВ. Данные исследования проводились на базе центра коллективного пользования «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН.

На рисунке 2.1 показана принципиальная схема ПЭМ. Электронные пучки испускаются раскаленной вольфрамовой нитью в электронной пушке 1 катод в условиях высокого вакуума, и ускоряется к аноду под действием сильного электрического поля, проходя через анодное отверстие. Пучки проходят через электромагнитные линзы осветителя и попадают на поверхность исследуемого образца. В зависимости от толщины и состава объекта, электронные пучки ослабляются за счет рассеяния или поглощения различными частями образца. После прохождения электронов через образец в объективной линзовой системе формируются изображения. 5

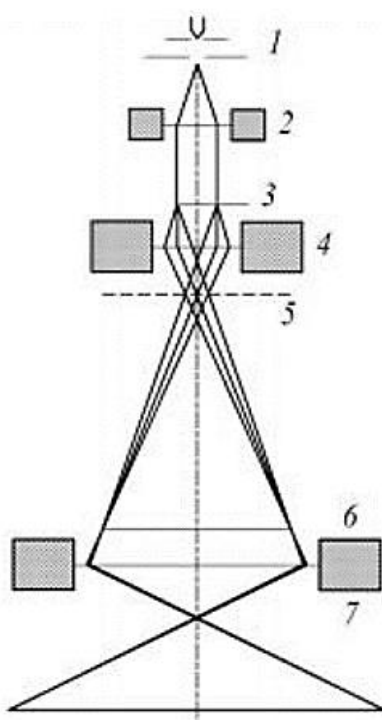


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема ПЭМ: 1 – катод; 2 – конденсор; 3 – объект; 4 – объективная линза; 5 – первичное промежуточное изображение; 6 – вторичное промежуточное изображение; 7 – проекционная линза

По форме дифрактограммы можно качественно судить о структурном состоянии твердого тела. Размер микро дифракционной области определяется размером селекторной диафрагмы и оптической силой объективной линзы и составляет приблизительно 1 мкм. Если размер зерен поликристаллических образцов составляет несколько микрон, электронограмма имеет вид точечный и

представляет собой сечение обратной решетки сферой отражения (сферой Эвальда), причем центральное пятно соответствует нулевому узлу обратной решетки (рисунок 2.2 а, б). При взгляде на дифракцию от субзерна возникает похожее изображение, то есть оно фактически исходит от монокристалла.

Чтобы наблюдать макроскопические дифракционные картины, расфокусируют конденсор и выключают все остальные линзы, при этом электронный микроскоп работает как обычный традиционный электронный дифрактометр. В создании дифракционной картины участвует множество зерен, с перекрывающимися десятками и сотнями дифракционных конусов, сечение которых плоскостью экрана даст кольцевую электронную дифракционную картину.

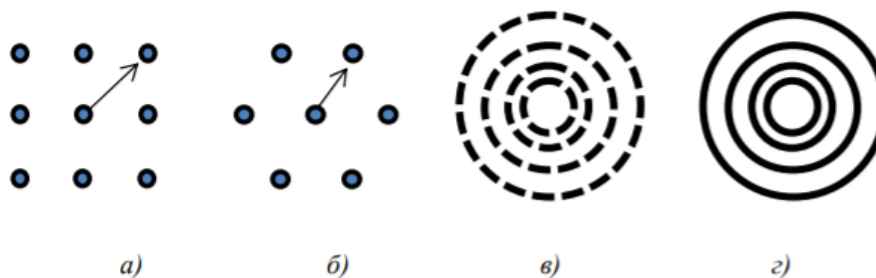


Рисунок 2.2 – Вид точечных электронограмм (а, б) и картина макродифракции (в, г)

Поскольку в нашем случае имеем дело с точечными микродифракционными картинами, то далее остановимся на рассмотрении методики индирования точечных электронограмм.

По точечной электронограмме можно судить о симметрии решетки и ориентации кристалла. Изучение геометрии рефлексов позволяет определить форму узлов обратной решетки, отражающих многие структурные особенности кристалла. Анализ микродифракционных картин проводится по следующим этапам:

1. На рисунке 2.3 представлена типичная исходная электронограмма от образца титанового сплава, модифицированного ионами меди.

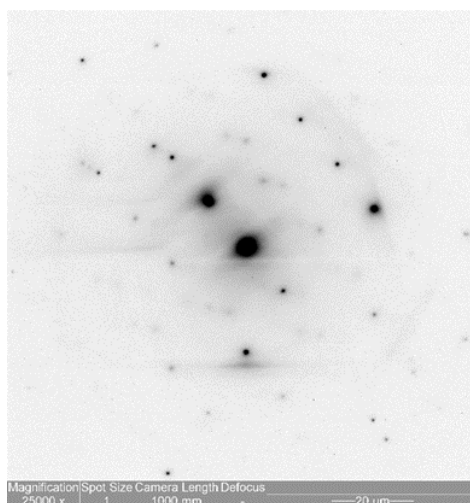


Рисунок 2.3 – Типичная электронограмма титанового сплава, модифицированного ионами меди

2. Определение положения нулевого рефлекса – узел (000). Выделение на электронограмме рефлексов, принадлежащих одной кристаллографической зоне. Измерение длины двух векторов r_1 и r_2 , построенных для рефлексов, не лежащих на одной прямой и проходящих через центр электронограммы.

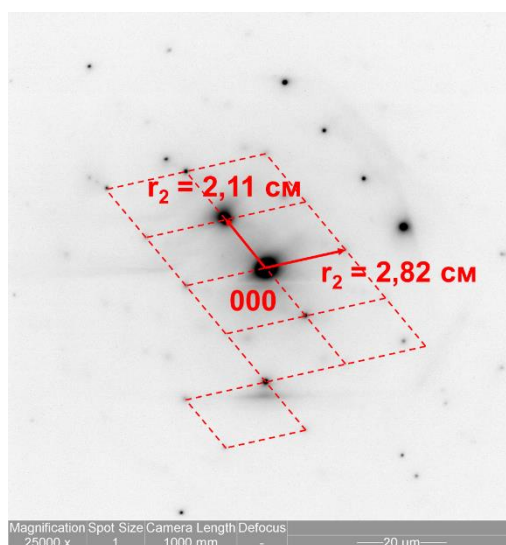


Рисунок 2.4

4. Сравнение полученных значений r_1 и r_2 с табличными данными предполагаемой фазы CuTi_2 (международная база данных PDF № 15-0717), рассчитанными из величины межплоскостных расстояний по формуле:

$$R = \frac{\lambda L}{d_{HKL}} \quad (2.10)$$

Присваивать соответствующим точечным рефлексам 1 и 2 пробные индексы плоскостей (105) и (211).

5. Определение углов между дифракционными векторами. Измерить угол φ между линией от центрального отражения (000) до двух произвольных мест отражения в узлах сетки. В нашем случае угол между векторами r_1 и r_2 , равный 115° . Сравнить измеренное значение угла с расчетным значением угла между плоскостями (105) и (211). Для тетрагональной решетки используем формулу:

$$\cos \psi = \frac{(h_1 h_2 + k_1 k_2) / a^2 + l_1 l_2 / c^2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2) / a^2 + l_1^2 / c^2} \cdot \sqrt{(h_2^2 + k_2^2) / a^2 + l_2^2 / c^2}} \quad (2.11)$$

Расчетный результат $\varphi=51,5^\circ$, что не соответствует измеренному значению. Следовательно, неправомерно приписать рефлексам 1 и 2 соответственно индексы (105) и (211). Предположено, что может быть связано с неправильно определением знака (положительный и отрицательный) индекса. Среди ряда возможных целочисленных выбрать те, которые дают такие величины расстояний и углов, которые в пределах точности метода совпадут с измеренными значениями r_1 , r_2 , и φ . Для отражения 1 брать индексы $(0\bar{1}\bar{5})$, а отражению 2 – индексы $(\bar{1}2\bar{1})$. Индексы для рефлекса 3 находим по правилу векторного сложения:

$$h_3 = h_1 + h_2, \quad k_3 = k_1 + k_2, \quad l_3 = l_1 + l_2$$

В результате для рефлекса 3 получаем индексы $(\bar{1}\bar{1}\bar{6})$.

6. Определение индекса оси зоны плоскостей. Индекс оси зоны плоскостей определяется векторным произведением двух векторов. Для определения индекса направления, по которому пересекаются две плоскости $(h_1 k_1 l_1)$ и $(h_2 k_2 l_2)$, воспользуемся следующей схемой:

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{cc} h_1 k_1 l_1 & h_1 k_1 l_1 \\ h_2 k_2 l_2 & h_2 k_2 l_2 \end{array} & \rightarrow & \begin{array}{cc} h_1 \left| \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right. l_1 & h_1 \left. \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right| l_1 \\ h_2 \left| \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right. l_2 & h_2 \left. \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right| l_2 \end{array} \\
 \\
 \rightarrow & & \frac{\begin{array}{c} h_1 \left| \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right. l_1 \times l_1 \times h_1 \times \left. \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right| l_1 \\ h_2 \left| \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right. l_2 \times l_2 \times h_2 \times \left. \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right| l_2 \end{array}}{(k_1 \cdot l_2 - l_1 \cdot k_2) \quad (l_1 \cdot h_2 - h_1 \cdot l_2) \quad (h_1 \cdot k_2 - k_1 \cdot h_2)} \\
 \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \quad \quad \quad \downarrow & & \\
 u \quad \quad \quad v \quad \quad \quad w & &
 \end{array}$$

Подставив значения индексов $(\bar{1}1\bar{6})$ и $(0\bar{1}\bar{5})$ в схему, получены индексы направления оси зоны $[u \ v \ w] = [1 \ \bar{5} \ 1]$, приписать индексы оставшимся рефлексам, результат индицирования представлен на рисунке 2.5.

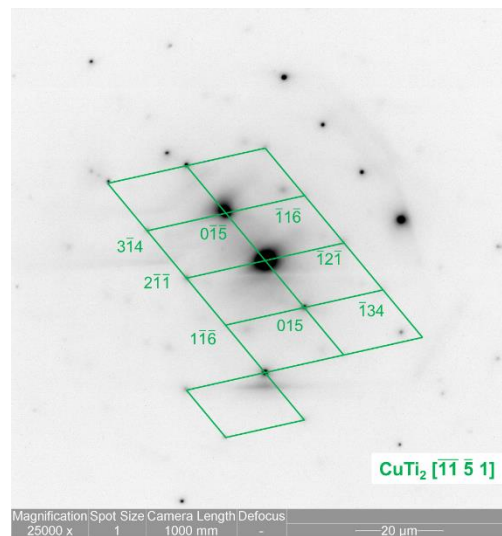


Рисунок 2.5 – Результат индицирования точечных электронограмм

2.2.7 Методика сканирующей (растровой) электронной микроскопии

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) представляет собой средство наблюдения между просвечивающей электронной микроскопией и оптической микроскопией. Он использует узко сфокусированный высокоэнергетический электронный пучок для сканирования образца, возбуждает различную физическую информацию за счет взаимодействия между пучком и материалом, а также собирает, усиливает и повторно отображает эту информацию для достижения цели характеристики микроскопической морфологии образца. К основным преимуществам сканирующей (растровой)

электронной микроскопии относится высокая информативность, обусловленная возможностью наблюдать изображение с помощью сигналов от различных детекторов [30]. В данной работе морфологию поверхности исследовали методом растровой (сканирующей) электронной микроскопии на приборе LEO EVO-50 XVP (РЭМ). Основан на принципе взаимодействия электронного пучка с объектом исследования.



Рисунок 2.6 – Растровый электронный микроскоп

2.2.8 Методика микрорентгеноспектрального анализа

Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия – это метод элементного анализа твердых тел, основанный на анализе энергии излучения рентгеновской спектроскопии. Используя электронный луч в электронном микроскопе или рентгеновский луч в рентгено-флуоресцентном анализаторе, атомы исследуемого образца возбуждаются и испускают рентгеновские излучения.

По энергетическому спектру этого излучения можно сделать выводы о качественном и количественном составе пробы [31]. Рентгеновский микроанализ может предоставить информацию о составе элементов образца, включая информацию о концентрации элементов и их распределении. Основой анализа рентгеновской спектроскопии является то, что, если можно определить

энергию или длину волны спектра излучения, позволяет сделать выводы об элементах, содержащихся в образце.

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализатор (EDX) INCA-Energy (Oxford Instruments), встроенный в сканирующий электронный микроскоп, используется для определения химического состава образца. Система энергодисперсионного микроанализа INCA-Energy имеет встроенную базу данных, которая содержит готовые данные по всем эталонам элементов, что позволяет повысить точность анализа.

2.2.9 Методика оценки параметров механических свойств

Для оценки механических свойств образцов используется метод микроиндентирования, используя прибор ПМТ-3 с индентором правильной пирамиды с прилежащим углом между противоположными гранями 136 градусов, вдавливаясь в поверхность испытуемого образца под действием заданной нагрузки F , снимать нагрузку после выдержки в течение фиксированного времени, затем измерить длину диагонали отпечатка. Чтобы получить надежные результаты, для каждого образца было сделано не менее 10 отпечатков, и принято среднее значение в качестве окончательного результата, Микротвердость рассчитать по следующей формуле [32]:

$$H_v = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (2.12)$$

где H_v – микротвердость по Виккерсу, F – нагрузка на индентор, d – средняя длина диагонали формируемого отпечатка.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Тема: «Изучение структурно - фазового состояния титановых сплавов после ионно-лучевой обработки ионами меди»

В современное время, когда ученые проводят научные исследования, им необходимо учитывать не только масштаб открытия, но и коммерческую ценность разработки. Оценка коммерческой ценности разработки считается важным условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Благодаря своим высококачественным свойствам титан и его сплавы широко применяются в авиационной, космической и других областях современного производства. Однако с активным развитием науки и техники к служебным характеристикам титановых сплавов выдвигаются более высокие требования, направленные на поиск путей повышения эксплуатационных характеристик и создание новых технических решений по упрочнению титана и его сплавов. Среди них модификация поверхностного слоя ионами является перспективным направлением для улучшения свойств материалов.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, и ресурсосбережение» было модификация поверхностного слоя титанового сплава методом ионно-лучевой обработки, отвечающей современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В условиях постоянного развития рынка необходимо систематически анализировать конкурирующие разработки, которые существуют на рынке. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности

научной разработки и определить направления их дальнейшего совершенствования.

Технология ионно-лучевой синтеза пленок довольно дорогая и доступна не всем. Потенциальными потребителями данной технологии можно считать оборонные комплексы и организации, чей задачей является получать покрытия и модификации поверхностей с хорошей адгезией, твердостью и др., такие как космическая промышленность и авиастроение, где необходимо получить прочные материалы, также могут быть исследовательские центры, где проводятся научно-исследовательские работы.

4.1.2 Анализ конкурентных решений

В данной выпускной квалификационной работе изучается улучшение характеристики поверхностного слоя титанового сплава с помощью ионно-лучевой обработки (ф). В настоящее время применение технологии модификации поверхности титанового сплава для улучшения свойства привлекло большое внимание, практически все методы обработки поверхности металлов применяются для обработки поверхности титанового сплава. Поэтому у данной технологии много конкурентов. В данной работе рассматривались две конкурирующие разработки:

1. метод химического осаждения из паровой фазы (к1);
2. метод нанесения тонких пленок катодным распылением (к2).

Проведем анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения расходуемых материалов для процесса ионно-лучевой обработки, данный анализ выполним с помощью оценочной карты, приведённой в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

	Критерии оценки	Вес критерия V_i	Баллы			Конкурентоспособность		
			B_f	B_{k1}	B_{k2}	K_f	K_{k1}	K_{k2}
	1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности								

1	Повышение производительности труда пользователя	0,2	4	3	3	0,80	0,60	0,60
2	Простота технологии нанесения пленки	0,15	3	3	3	0,45	0,45	0,45
3	Энергоэкономичность	0,05	4	2	3	0,20	0,10	0,15
4	Надежность (Адгезионная прочность и долговечность и др.)	0,15	5	4	3	0,75	0,60	0,45
5	Экологичность технологии и материала	0,1	4	3	3	0,40	0,30	0,30
6	Широта области применения покрытия	0,15	5	5	4	0,75	0,75	0,60
Экономические критерии оценки эффективности								
1	Стоимость	0,15	4	3	4	0,60	0,45	0,60
2	Финансирование научной разработки	0,05	4	4	4	0,20	0,20	0,20
	Итого	1	33	29	25	4,15	3,45	3,35

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что по сравнению с другими технологиями обработки ионно-лучевая обработка позволяет получить поверхностный слой с высокой надежностью, полученная пленка обладает высокими физико-механическими свойствами. Хорошая воспроизводимость процесса позволяет повысить производительность труда пользователя. Таким образом, данная научно-исследовательская технология успешно конкурировать с популярными на сегодняшний день.

4.1.3 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта проведен SWOT-анализ, где детально продуманы сильные и слабые стороны, возможности и угрозы научно-технической разработки. Результаты SWOT-анализ представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С₁. Малое время процесса введения примесей, чистота технологии;</p> <p>С₂. Процесс протекает при относительно низкой температуре, подложка не перегревается, что позволяет сохранить геометрическую точность изделия;</p> <p>С₃. Пленка хорошо сочетается с подложкой, обладает высокой устойчивостью к механическим и химическим воздействиям, не отслаивается;</p> <p>С₄. Распыление с холодным катодом позволяют автоматизировать процесс осаждения пленок диэлектрических и композиционных материалов с заданными свойствами.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл₁. Сложное и дорогостоящее оборудование.</p> <p>Сл₂. Только субмикронная толщина пленок.</p>
<p>Возможности</p> <p>В₁. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ (т. е. использование научного оборудования);</p> <p>В₂. Возможность внедрения технологии в производство.</p>	<p>В₂С₁С₃С₄. Разработка технологии ионно-лучевой модификации поверхностного слоя титанового сплава. Применяется к реальному производству с конкурентными преимуществами и высоким качеством;</p> <p>В₁С₂. Улучшение технологии в производство за счет изменения параметров и режимов обработки.</p>	<p>В₂Сл₁. Многофункциональное оборудование может реализовать общее использование таких методов, как ионная имплантация и магнетронное напыление;</p> <p>В₁Сл₁. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ для тестирования технологии в реальных рабочих условиях;</p> <p>В₂Сл₂. Применение ионно-лучевой обработки только тогда, когда требуется определенная толщина покрытия.</p>
<p>Угрозы</p> <p>У₁. Вероятность появления более выгодных предложений на рынке, так как в данном направлении ведется большое количество исследований;</p> <p>У₂. Разработка новых технологий конкурентами и снижение цен.</p>	<p>У₁С₄. Возможность изменения параметров и режимов процесса обработки, что позволит создавать новые и более качественные конкурентноспособные изделия.</p>	<p>У₁У₂Сл₁. Разработка более эффективных и доступных оборудования с использованием метода ионно-лучевой имплантации.</p>

Второй этап заключается в определении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. На данном этапе необходимо построить интерактивную матрицу проекта, чтобы лучше разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Знак «+» означает сильное соответствие сильных сторон возможностям, знак «-» – слабое соответствие, если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-», то «0». Соотношения параметров представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
Возможности проекта	B ₁	-	+	-	-
	B ₂	+	+	+	+
Угрозы проекта	У ₁	-	-	-	+
	У ₂	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
		СЛ ₁		СЛ ₂	
Возможности проекта	B ₁	+		-	
	B ₂	+		+	
Угрозы проекта	У ₁	+		-	
	У ₂	+		-	

С помощью SWOT анализа можно сделать вывод, что на данный момент преимущества используемого метода преобладает над его недостатками по сравнению с другими методами.

4.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

В получении результата заинтересованы следующие стороны, представленные в таблице 4.4:

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Томский политехнический Университет	Исследовать влияние имплантации меди на структурно – фазового состояния, физико-механические свойства титановых сплав
Разработчик	Получение прибыли со своего продукта
Студент	Выполненная выпускная квалификационная работа. Получение высшего образования

Цели и результат проекта представлены в таблице 4.5:

Таблица 4.5 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Провести исследование влияния ионной имплантации ионами меди на структурно – фазовые состояния, физико-механические свойства титановых сплав
Ожидаемые результаты проекта:	При модификации титанового сплава ионами меди на его поверхности образуется медно-титановая фаза с лучшими свойствами, характеристики поверхностного слоя материалов улучшились.
Критерии приемки результата проекта:	Представление результатов структурно-фазового состояния, физико-механических свойств материала при различном времени ионной имплантации
Требования к результату проекта:	Требование:
	<ul style="list-style-type: none"> • Представления результатов на конференциях. • Согласованность научных данных с рядом другими научными исследованиями

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Эту информацию представить в табличной форме (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
Бюджет проекта	300 000 рублей
Источник финансирования	НИТПУ
Сроки проекта	15.02.2022 – 05.06.2022
Фактическая дата утверждения плана управления проектом	15.02.2022
Дата завершения проекта	05.06.2022

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ в порядке:

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

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ.

В таблице 4.7 приведены порядки производимых задач и работ, а также распределение исполнителей по данным работам

Таблица 4.7 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ Раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Подготовка установки к работе	Руководитель
	5	Подготовка образцов	Руководитель, Инженер
	6	Подбор режимов ионной обработки	Руководитель, инженер
	7	Получение готовых образцов	Руководитель, Инженер
	8	Исследование закономерности формирования, особенности структуры поверхностного слоя образцов	Инженер
	9	Исследования механических свойств образцов	Инженер
Оформление отчета	10	Составление пояснительной записки	Инженер

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, потому что он зависит от трудно учитываемых параметров. Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости рассчитывается по следующей формуле:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5} \quad (4.1)$$

Где $t_{\text{min}i}$ – минимально возможное время выполнения задачи (оптимистичная оценка: самых благоприятных обстоятельствах), чел.-дн.; $t_{\text{max}i}$ – максимально возможное время выполнения задачи (пессимистичная оценка: самых неблагоприятных обстоятельствах), чел.-дн.

Определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , в соответствии с расчетом сложности ожидаемой работы:

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{C_i} \quad (4.2)$$

Где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни; C_i – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

4.3.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. В связи с этим необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (4.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4.4)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году ($T_{кал} = 365$);

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году ($T_{вых} = 104$);

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году ($T_{пр} = 14$).

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Все полученные результаты представлены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в Рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни			
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания	2		5		3,2		3,2	4,7
2. Подбор и изучение материалов по теме		10		20		14	14	20,7
3. Календарное планирование работ по теме	3	3	5	5	3,8	3,8	1,9	2,8
4. Подготовка установки к работе	3		5		3,8		3,8	5,6
5. Подготовка образцов	3	3	4	4	3,4	3,4	1,7	2,5
6. Подбор режимов ионной обработки	2	2	5	5	3,2	3,2	1,6	2,4
7. Получение готовых образцов	3	3	5	5	3,8	3,8	1,9	2,8
8. Исследование закономерности формирования, особенности структуры поверхностного слоя образцов		15		20		17	17	25,1
9. Исследования механических свойств покрытий	-	10	-	15	-	12	12	17,7
10. Составление пояснительной записки	-	10	-	20	-	14	14	20,7
Итого	16	56	29	94	21,2	71,2	71,1	105,1

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

	Вид работ	Исполнители	T_{ki} кал. дн	Продолжительность выполнения работ															
				Февр.		Март			Апр.			Май.			Июнь				
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4,7	▨															
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	20,7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер	2,8			▨	■												
4	Подготовка установки к работе	Руководитель	5,6				▨												
5	Подготовка образцов	Руководитель, Инженер	2,5					▨	■										
6	Подбор режимов ионной обработки	Руководитель, инженер	2,4					▨	■										
7	Получение готовых образцов	Руководитель, инженер	2,8					▨	■										
8	Исследование закономерности формирования, особенности структуры поверхностного слоя образцов	инженер	25,1							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
9	Исследования механических свойств покрытий	Инженер	17,7										■	■	■	■	■	■	■
10	Составление пояснительной записки	Инженер	20,7														■	■	■

Где ▨ – научный руководитель; ■ – инженер.

4.3.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов. Для формирования бюджета научного исследования необходимо представить затраты по статьям расходов:

1. материальные затраты НТИ;
2. затраты на специальное оборудование для научных работ;
3. основная заработная плата исполнителей темы;
4. дополнительная заработная плата исполнителей темы;
5. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
6. накладные расходы;
7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.

4.3.4.1 Материальные затраты НТИ

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. Результаты показаны в таблицу 1.10

Таблица 4.10 – Материальные затраты

№	Наименование	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
1	Баллон Ar, 99.999%	10 л	100	1000
2	Баллон N ₂ 99.999%	10 л	30	300
3	Титановый сплав BT1-0	1 шт.	1008	1008
4	Наждачная бумага	5 шт.	45	225
Итого				2533

4.3.4.2 Затраты на специальное оборудование для научных работ

При приобретении специальное оборудование необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в

калькуляции в виде амортизационных отчислений. Расчет затрат по данной статье заносится в таблице 4.11.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где n – срок полезного использования.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot t, \quad (4.6)$$

где I – итоговая сумма, руб.; t – время использования.

Таблица 4.11 – Специальное оборудование для экспериментальных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	H_A , %	Амортизация, руб.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вакуумная установка УВН-05МД «КВАНТ»	1300000	1	15	0,3	0,07	2275
2	Дифрактометр ДРОН-7 (Буревестник, Россия)	1400000	1	15	0,27	0,07	2205
3	Нанотвердомер «NanoTest 600»	250000	1	10	0,16	0,1	333,3
Итого							4813,3

4.3.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Статья включает основную заработную плату работников,

непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.7)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.8)$$

Где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.9)$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб. дн.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени:	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}$$

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}$$

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_p \quad (4.10)$$

Где $Z_{\text{ТС}}$ - заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ - премиальный коэффициент, равен 0,3; $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 1.13.

Таблица 4.13 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{мс}}, \text{руб}$	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	k_p	$Z_m, \text{руб}$	$Z_{\text{дн}}, \text{руб}$	$T_p, \text{раб.дн.}$	$Z_{\text{осн}}, \text{руб}$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	14	30062,2
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	64	111558,4
Итого:								141620,6

4.3.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 15% от основной заработной платы, работников, участвующих в выполнении работы.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (4.11)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы.

для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 30062,2 = 4509,33 \text{ руб.}$$

для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 111558,4 = 16733,76 \text{ руб.}$$

4.3.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (4.12)$$

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

Для руководителя:

$$Z_{внед} = k_{внед} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (30062,2 + 4509,33) = 10371,46 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_{внед} = k_{внед} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (111558,4 + 16733,76) = 38487,65 \text{ руб.}$$

4.3.4.6 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, например: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} Z_{накл} &= (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} \\ &= (2533 + 4813,3 + 141620,6 + 21243,09 + 48859,11) \cdot 0,2 = 43813,82 \text{ руб.} \end{aligned}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

4.3.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ (Изучение структурно - фазового состояния титановых сплавов после ионно-лучевой обработки ионами меди) по форме, приведенной в таблице 4.14. В качестве аналогов данной НТР рассмотрены:

1. метод химического осаждения из паровой фазы (Аналог 1);
2. метод нанесения тонких пленок катодным распылением (Аналог 2).

Таблица 4.14 – Расчет бюджета затрат НТИ.

Наименование статьи	Сумма, руб.		
	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Материальные затраты НТИ	2533	2565	3052
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	4813,3	5006	5188
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	141620,6	141620,6	141620,6
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	21243,09	21243,09	21243,09
5. Отчисления во внебюджетные фонды	48859,11	48859,11	48859,11
6. Накладные расходы	43813,82	43858,76	43992,56
7. Итого бюджетная стоимость	262882,92	263142,56	263955,36

4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех 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 по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (4.13)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Таблица 4.15 – Расчет Интегрального финансового показателя.

№ исполнения	Стоимость исполнения	Максимальная стоимость исполнения	Интегральный финансовый показатель
1. Текущий проект	262882,92	263955,36	0,996
2. Аналог 1	263142,56		0,997
3. Аналог 2	263955,36		1

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.14)$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент проекта; b_i – балльная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 4.16).

Таблица 4.16 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Повышение производительности труда пользователя	0,2	4	3	3
2. Простота технологии нанесения пленки	0,15	3	3	3
3. Энергоэкономичность	0,2	4	3	3
4. Надежность (Адгезионная прочность и долговечность и др.)	0,3	5	4	4
5. Широта области применения покрытия	0,15	5	5	4
Итого:	1	4,3	3,6	3,45

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p-m.n} = 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,3$$

$$I_{p-a1} = 0,2 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 3,6$$

$$I_{p-a2} = 0,2 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,45$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}} \quad (4.15)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (таблица 4.17). Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (4.16)$$

Таблица 4.17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,996	0,997	1

2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,30	3,60	3,45
3	Интегральный показатель эффективности	4,32	3,61	3,45
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,93	0,82

Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,996, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами; Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР и значение интегрального показателя эффективности ИР является наиболее высоким, что позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Вывод к разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 105 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 94 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 20 дней;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, который составляет 262882,92 руб. Сравнение значений

интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Приложение А

(справочное)

Study of the structural-phase state of titanium alloys after ion-beam treatment with copper ions

Студент:

Группа	ФИО.	Подпись	Дата
4БМ02	У Шаша		

Консультант школы ИШНПТ:

Должность	ФИО.	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

Консультант школы ШБИП:

Должность	ФИО.	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Демьяненко Н.В.			

INTRODUCTION

Currently, the development of new optimal protective coatings and improvement of their characteristics is one of the urgent tasks. This is due to the possibility of wide application of such coatings to protect various structures of chemical and mechanical damage and extend their service life. In order to improve the strength properties, adhesion, and thermal cycling resistance of ceramic coatings on the surface of samples, it is possible not only to treat the coatings, but also to pretreat the surface layer of the metal substrate. It is known that coatings are deposited on a substrate; at their boundary, they undergo sharp changes in the structural-phase state and physico-mechanical properties. The state of the substrate surface can significantly affect the formation of the structure and properties of the coating itself. Therefore, pretreatment of the substrate is also an effective method for improving coating performance.

To achieve this goal, ion-beam technology is applied, based on a controlled flow of high-energy ions interacting with a solid surface to directional change the characteristics associated with atomic and defective structures.

The unique properties of the titanium alloy make it possible to use it as a base for applying ceramic coatings. For effective nanostructure of the surface layer of a titanium alloy by high-energy ion beams, it is necessary to choose ions of a substitution element with a smaller atomic radius and a larger mass than that of titanium, capable of penetrating to a relatively large depth and causing a significant elastic deformation of the lattice. For this purpose, copper ions with the most suitable characteristics are selected [1]. It was shown in [2] that irradiation of a titanium substrate with heavy copper ions leads to a change in the phase composition and surface morphology of the titanium alloy. The formation of numerous radiation defects and high internal stress in the implanted layer is one of the features of ion-beam treatment, which differs from traditional methods of impurity introduction. During ion implantation, both static phenomena (phases, defects) and dynamic phenomena (formation and dissociation of new phases, target sputtering) occur on the

sample surface. Therefore, static (residual after implantation) and dynamic (existing during implantation) internal stresses may occur [3]. During high-intensity ion implantation, impurity defects and structural-phase components accumulate in the surface layer, which largely determine the physical and mechanical properties and, ultimately, the operational properties of the material. Therefore, in this paper, we study the structural-phase state, the change in the residual stresses of the surface layer of the titanium substrate, and consider the effect of preliminary ion treatment of the substrate on the properties of the coatings formed on it.

1.1 Titanium and titanium alloys

Titanium is a silvery white transition metal characterized by low weight, high strength, metallic luster and good corrosion resistance (including sea water and chlorine). Due to its stable chemical properties, good resistance to high and low temperatures, strong acid resistance, as well as high strength and low density, it is often used in the manufacture of rockets and spacecraft, known as "space metal" [4].

Titanium alloy has high strength, corrosion resistance and good thermal cycling resistance, is used to make various spacecraft parts, including the outer shell of the fuel tank and wings. Additionally, it combines light weight with high strength to help strengthen airframes and boost jet engine performance. In addition, due to its non-toxicity and ability to effectively resist corrosion from body fluids, it has become the main implant metal in the medical field with a service life of more than 20 years.

1.2 Cu-Ti phase diagram

When titanium and copper interact, various chemical intermetallic compounds are formed, such as Ti_2Cu , TiCu , Ti_3Cu_4 , TiCu_4 , Ti_2Cu_3 , and TiCu_2 .

In the titanium-copper system, two congruently melting TiCu and Ti_2Cu are formed at temperatures of 982 °C and 1005°C, respectively. The remaining Ti_3Cu_4 , Ti_2Cu_3 , TiCu_2 , and TiCu_4 compounds are formed by peritectic reactions. The compound Ti_3Cu_4 is formed by the interaction of the liquid phase with TiCu at $929 \pm$

4 °C. At a temperature of 890 ± 4 °C, the Ti_3Cu_4 compound interacts with the liquid phase to form the Ti_2Cu_3 compound.

The formation of the $TiCu_2$ compound refers to the results of the interaction of the liquid phase with the Ti_2Cu_3 phase at 870 °C. When the $TiCu_2$ phase interacts with the liquid phase, the $TiCu_4$ phase is formed at a temperature of 875 °C. In addition to the listed six compounds, three eutectic transformations also take place in the titanium-copper system [5, 6]. Figure 1.1 shows the state diagram of Ti – Cu [7].

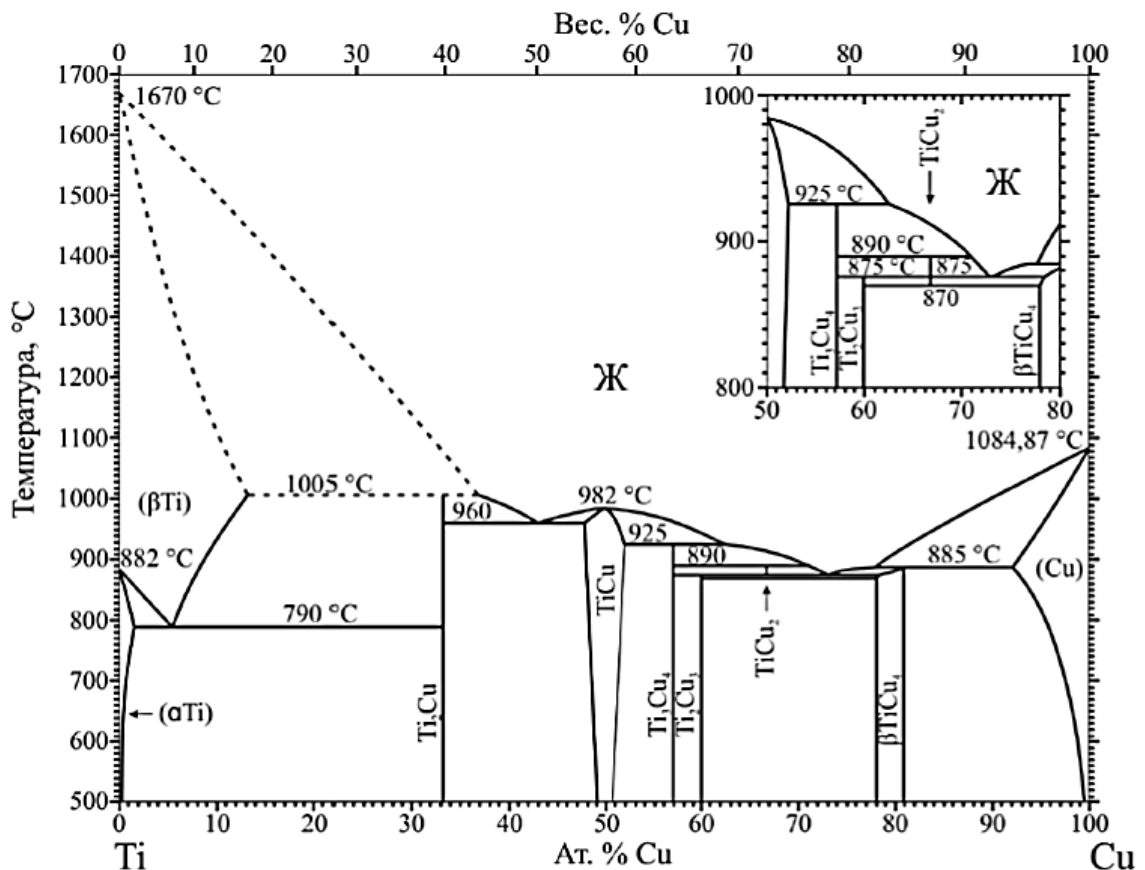


Figure 1.1 – Titanium-copper Phase diagram

According to the titanium-copper Phase diagram, Table 1.1 lists all possible types of compounds, their types and crystal lattice parameters.

Table 1.1 – Possible phases in the titanium-copper system

Phase	Type of crystal lattice	Crystal lattice parameter (Å)
α-Ti	Hexagonal	a = 2,9505, c = 4,6826

β -Ti	Cubic	$a = 3,3065$
CuTi	Tetragonal	$a = 3,108, c = 5,887$
CuTi ₂	Tetragonal	$a = 2,9438, c = 10,786$
Cu ₂ Ti	Orthorhombic	$a = 4,363, b = 7,977, c = 4,478$
CuTi ₃	Tetragonal	$a = 4,158, c = 3,594$
Cu ₃ Ti	Orthorhombic	$a = 5,45, b = 4,42, c = 4,3$
Cu ₄ Ti	Orthorhombic	$a = 4,53, b = 4,342, c = 12,93$
Cu ₃ Ti ₂	Tetragonal	$a = 3,13, c = 13,95$
Cu ₄ Ti ₃	Tetragonal	$a = 3,13, c = 19,94$

1.3 Ion implantation

Ion implantation is a highly efficient technology for modifying the surface of a material. In the process of ion implantation, ionized ions are accelerated under the action of an electric field and, due to kinetic energy, penetrate the surface of the substrate, interact with the atoms of the substrate, lose energy and remain in a certain position of the solid material, changing the chemical composition and phase structure, thereby changing the physical, chemical and mechanical properties of the material surface. Implantation of certain ions onto a metal surface make it possible to obtain surface alloy phases that are difficult to obtain in conventional metallurgical processes, thereby improving the hardness, wear resistance, corrosion resistance and other properties of the metal surface. Ion implantation technology has already been widely used in the military industry, mechanical engineering, light industry, textile, medical and aviation industries [8].

The use of accelerated ions makes it possible to introduce practically any alloy elements into any solid surface and makes it possible to obtain the required concentration of the introduced alloy element and its depth distribution of the irradiated substrate. Two regions are formed into the substrate surface bombarded by high-energy ions [9]. The first area is the area of "ion implantation. The implanted ions remain in this region and chemically bind to the matrix atoms, forming an implanted layer that differs from the chemical composition and structure of the matrix. The layer thickness is about 0.1 μm , and it is this thin layer that plays a role in improving the surface properties of the material. The area below is the area of

"influence caused by the mechanical action of ion bombardment, in which many dislocation structures are generated, the depth of this layer is about 100 μm .

Advantages of high-energy ion implantation:

1. Diversity: in principle, any element can be used as implanted ions; the structure formed cannot be limited by thermodynamic parameters (diffusion, solubility, etc.);

2. Unchanged: the original size and roughness of the workpiece remain unchanged, suitable for the last process for manufacturing parts of varying accuracy;

3. Strength: Introduced ions directly bonded with atoms or molecules on the surface of the material, forming a modified layer. There is a no clear interface between the modified layer and the base material, the combination is strong;

4. No limitation: The introduction process can be carried out at material temperatures below zero, up to hundreds of thousands of degrees; the surface can be reinforced for those materials that cannot be processed by conventional methods such as plastics, low tempering point steel, etc.

Let us consider several examples of the application of ion implantation techniques to improve the performance of samples.

In work [9] the effect of treatment for structure and tribotechnical properties of VT1-00 including severe plastic deformation and implantation of copper ions was studied. The sample was implanted into a heating temperature of 120 $^{\circ}\text{C}$ with an energy of 40 keV for 80-150 min. The irradiation dose is $2,5 \times 10^{17}$, 5×10^{17} and 8×10^{17} ions/ cm^2 . It is established, that ion implantation effectively increases the wear resistance of titanium VT1-00 by 5-6 times. With the increase in the implant dose the absolute value of the residual stress firstly increases and then sharply decreases. This effect can be connected with the formation of new phases in the implanted layer.

In [10] nitrogen ions with doses of 2×10^{17} , 4×10^{17} and 8×10^{17} ions/ cm^2 and energy of 150 keV were implanted into aluminium alloys. It is proved that nitrogen implantation significantly improves the tribological properties of the aluminium alloy and the microhardness can be increased by 30-60% depending on the ion current dose.

It is also reported on [11] that the implantation of nitrogen ions at the doses of 5×10^{16} , 1×10^{17} and 6×10^{17} ions/cm² with an energy of 180 keV improved the tribotechnical and mechanical properties of aluminium, especially hardness and wear resistance. It was found that the hardness of the aluminium surface layer increased 6 times at the maximum implant dose. Due to the formation of new phases and hardening of the solid solution in the ion-implanted sublayer and the formation of defect structures in it, the microhardness is increased and thus the wear resistance of the material is increased.

The titanium alloy VT-23 was treated by a continuous beam of copper ions with the energy ~ 2 keV and the doses $0,9 \times 10^{16}$, $1,8 \times 10^{17}$ and $2,25 \times 10^{17}$ ions/cm². The dependence of the microhardness of the surface layer of VT-23 on time of treatment with copper ions has been determined. An increase in the microhardness of the surface layer can be associated with the formation of Cu_xTi intermetallic phases in the ion-modified surface layer. As the ion treatment time increases, the hardness increases with the thickness of the ion-doped layer [12].

In [9], nitrogen ions were implanted into the surfaces of titanium alloys Ti-4Al-2V and Ti-2Al-2.5Zr and changes in surface composition and structure have been investigated. Including non-implanted specimens, specimens with nitrogen ion implantation dose of 3×10^{17} and 8×10^{17} ion/cm². The ion energy was 75 keV. The ion energy was 75 keV. XRD results show that new phases TiN and TiO₂ are formed after ion implantation. The microhardness test of Ti-2Al-2,5Zr shows that N ion implantation can effectively improve the surface hardness, increasing hardness with increasing implantation dose.

1.4 Types of stress

The real structure of crystalline materials differs from the ideal one by the presence of various kinds of defects, which in turn lead to an increase in the micro deformations of the crystal lattice and the associated elastic internal stresses. Three basic types of stresses are distinguished [13]:

1. Stresses of the first kind (macrostresses) are characterized by elastic deformation and are balanced over the entire volume or a large part of the sample. In the presence of macrostresses, the removal of any part of the part will lead to an imbalance between other parts, which will lead to deformation (cracking and warping) of the product. Macrostress control is very important as it can significantly improve the reliability of the product in service [14].

2. Stresses of the second kind (microstresses) are stresses that are balanced in the volume of individual grains or subgrains, which leads to the appearance of an inhomogeneous elastic deformation field.

3. Stresses of the third kind (static lattice distortion) refer to stresses that are balanced in the volume of the unit cell of the crystal lattice and cause a decrease in the intensity of X-ray reflection. In deformed metals, the static distortions are balanced in atomic groups located near grain boundaries, sliding surfaces, etc. Such distortions can be associated with dislocations. Displacements of atoms from ideal positions (lattice sites) can also occur in crystals of solid solutions due to differences in the size of atoms and chemical interactions between the same and different atoms forming a solid solution. In the presence of microstresses and static distortions, the removal of a body does not lead to their redistribution.

The X-ray method allows for the analysis of internal stresses, since different types of stresses lead to different changes in the X-ray diagram [15]. Macroscopic stress can lead to a displacement on the diffraction line (Figure 1.2, b), which is especially evident at large Bragg angles. Microstress causes line broadening (Figure 1.2, c). The greatest change in the width of the interference line is observed at large Bragg angles. Oriented microstresses can also lead to line displacement. In the presence of static distortions associated with the displacement of atoms from ideal positions, the intensity of the interference lines decreases (Figure 1.2, c) and the background of diffuse reflection increases. For lines with large indices, the decrease in intensity is especially evident [16].

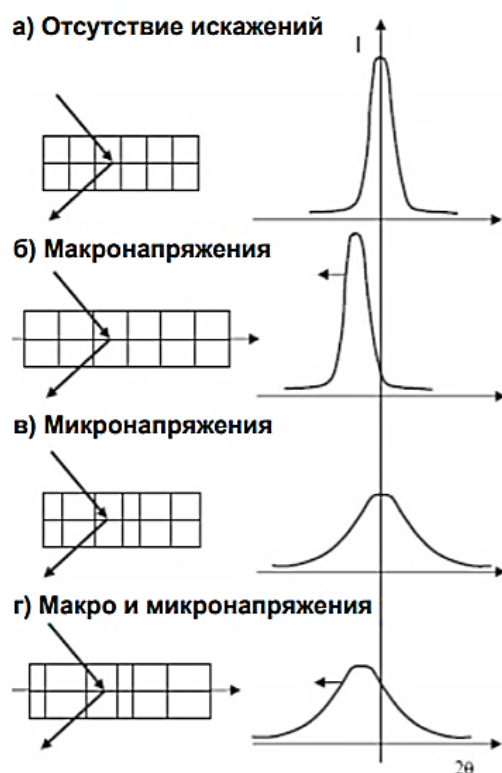


Figure 1.2 – Different types of stress

Residual stresses created by structural mechanisms can be tensile or compressive. Treatment of a titanium alloy with ion beams leads to a change in the stress state of the near-surface layer, in most cases, the compressive stress [17, 18]. During ion implantation, as the concentration of alloying elements in the sample increases, the rms displacement of atoms increases and the static component of the root-mean-square displacement increases [19]. The analysis of the crystal lattice parameters of alloys and the mean square displacement of atoms is very useful for predicting possible phase transformations that can occur during various alloy processing [20]. Of scientific interest is the study of the static displacement of atoms of the crystal lattice, causing microstresses of the third kind.

2. Objects and methods of study

2.1 Objects of study

The object of study in this work was Ti_VT1-0. The composition of technical titanium contains such elements as: Ti, Fe, Si, C, N, O and H [21], the chemical

composition of the VT1-0 grades in % according to GOST 19807-91:

Table 2.1 – The chemical composition of the VT1-0 alloys

The chemical composition of titanium VT1-0 (wt.%)						
Ti	Fe	Si	N	C	O	H
99,24 – 99,7	0,25	0.1	0,04	0,07	0,2	0,3
Where Ti is the basis; percentage is given approximately						

Titanium grade VT1-0 is technical titanium with high strength and anti-corrosion properties. The numbers after the letter indicate the purity of the alloy, implying 0.3% impurities. Titanium VT1-0 has sufficient ductility, impact strength, ductility and low creep. It has a low specific gravity and retains its useful properties at low and high temperatures. Due to its unique properties, VT1-0 titanium is suitable for a wide range of applications: in mechanical engineering; production of fans; in the instrument and aerospace industries, they are mainly used for the manufacture of compressor parts for aircraft engines, and structural parts for rockets, rockets and high-speed aircraft.

For effective nanostructuring of the surface layer of a titanium alloy using high-energy ion beams, it is recommended to choose ions with an atomic radius smaller and a mass larger than that of titanium, which can penetrate to relatively large depths and cause significant elastic deformation of the substrate lattice. For this reason, copper with the most suitable properties was used as the material for ion bombardment. Copper is a ductile metal that has a golden-pink color. Copper in air is quickly covered with an oxide film, which gives copper a characteristic intense yellowish-red colour.

The Ti_VT1-0 sample is treated in a vacuum system using a vacuum metal ion source with an energy of 0.5 ... 2.5 keV and the current density of 2 ... 20 mA/cm² on UVN-05MD "KVANT". The samples were placed in the camera on the object

table in front of the ion source for ion bombardment. During the ion bombardment the temperature of the sample is increased to 900-1000K.

Three samples were selected for the experiments, which differed in the time of ion beam treatment and the radiation dose, respectively, as can be seen from Table 2.2.

Table 2.2 – Parameters of treatment of titanium alloy VT1-0 by copper ions

Samples	Bias, V	Treatment Time, min	Fluence, Ion/cm²
Initial alloy BT1-0	-	-	-
Treated BT1-0	-900	6	$1,8 \times 10^{18}$
Treated BT1-0	-900	7,5	$2,1 \times 10^{18}$

2.2 Methods of study

2.2.1 Qualitative Phase Analysis

The X-ray method of phase analysis is based on the fact that for X-rays the crystal lattice is diffractive. A typical diffractogram of a polycrystal refers to a series of narrow and high diffraction peaks on a smooth background line [22]. Each solid-crystal phase has its own crystal lattice. A qualitative phase analysis can be used to determine which phases exist in a sample [23]. The phase composition of the studied samples was studied by X-ray diffraction on a DRON-7 diffractometer (Burevestnik, Russia) [22]. The diffraction spectrum was recorded using continuous 2θ scanning with Bragg-Brentano focusing in cobalt anode radiation. Profile analysis and quantitative processing of diffraction patterns were performed using the Renex software package.

Qualitative X-ray phase analysis includes the identification of the crystalline phase based on the interplanar spacing d_{hkl} and the corresponding line intensities I_{hkl} of the X-ray spectrum. The phase analysis begins by determining the presence of one of the most probable phases. The identification of crystalline phases was carried out using the international databases of diffraction data PDF.

The condition for the diffraction of X-rays on a crystal lattice includes the Wulf-Bragg equation:

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

where d is the distance between adjacent crystallographic planes;

θ – the angle of reflection of the X-ray beam, deg.;

n – the reflection order;

λ – the wavelength of monochromatic X-rays incident on the crystal.