

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние облучения протонами и ионами гелия на дефектную структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb

УДК 621.793.74:669.784:66.065

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б81	Проскурина Анастасия Алексеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Лаптев Роман Сергеевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Склярова Елена Александровна	к.п.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

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 определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде.
УК(У) -4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке.
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способностью использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук (прежде всего химии, биологии, экологии, наук о земле и человеке).
ОПК(У)-2	Способностью использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей.
ОПК(У)-3	Способностью использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач.

ОПК(У)-4	Способностью понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности.
ОПК(У)-5	Способностью использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией.
ОПК(У)-6	Способностью решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
ОПК(У)-7	Способностью использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка.
ОПК(У)-8	Способностью критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности.
ОПК(У)-9	Способностью получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин.
ПК(У)-2	Способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта.
ПК(У) -3	Готовностью применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований.
ПК(У)-4	Способностью применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин.
ПК(У)-5	Способностью пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований.
ПК(У)-6	Способностью понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований
ПК(У)-7	Способностью участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме.
ПК(У)-8	Способностью понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования.

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Склярова Е.А.
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б81	Проскуриной Анастасии Алексеевны

Тема работы:

Влияние облучения протонами и ионами гелия на дефектную структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)

--	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Объект исследования: наноразмерные металлические многослойные покрытия Zr/Nb – Методы исследования: позитронная спектроскопия методом доплеровского уширения аннигиляционной линии с применением пучков позитронов переменной энергии – Цель работы: анализ наноразмерных металлических многослойных систем на основе Zr/Nb после облучения протонами и ионами гелия методом доплеровского уширения аннигиляционной линии с применением пучков позитронов переменной энергии.
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников; – Подготовка наноразмерных металлических покрытий Zr/Nb; – Облучение многослойных покрытий Zr/Nb протонами и ионами гелия; – Проведение исследования покрытий до и после облучения методом позитронной спектроскопии доплеровского уширения с применением пучков позитронов переменной энергии; – Анализ полученных результатов; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; – Социальная ответственность; – Заключение.
--	---

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Меньшикова Екатерина Валентиновна, Доцент ОСГН ШБИП</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Сечин Андрей Александрович, Доцент ООД ШБИП</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

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

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>0Б81</p>	<p>Проскурина Анастасия Алексеевна</p>		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б81	Проскурина Анастасия Алексеевна

Школа	ИШЯТ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 «Физика»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Бюджет – 473 609,16 руб. Затраты на заработную плату – 364 164,76 руб. Прочие расходы – 76 325,4 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на электроэнергию 5,8 кВт/ч
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налог во внебюджетные фонды – 27,1% Районный коэффициент – 1,3 Накладные расходы – 16%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>	Оценка потенциальных потребителей исследования, анализ конкурентных решений, SWOT – анализ,
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР</i>	Планирование этапов работ, определение трудоёмкости и построение календарного графика, формирование бюджета.
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков</i>	Оценка сравнительной эффективности исследования. Интегральный показатель ресурсоэффективности – 2,9

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Матрица SWOT
2. График разработки и внедрения ИР
3. Инвестиционный план. Бюджет ИП
4. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б81	Проскурина Анастасия Алексеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
0Б81		Проскурина Анастасия Алексеевна	
Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 Физика

Тема ВКР:

Влияние облучения протонами и ионами гелия на дефектную структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</p>	<p><i>Объект исследования:</i> наноразмерные металлические многослойные покрытия Zr/Nb <i>Область применения:</i> ядерная энергетика, аэрокосмическая промышленность <i>Рабочая зона:</i> рабочий стол с персональной электронно-вычислительной машиной в подвальной лаборатории корпуса №3</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022). – ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).</p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения: Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</p>	<p>Вредные факторы: – микроклимат; – воздействие шума, вибраций; – недостаточная освещённость. Опасный фактор: – повышенное напряжение в электрической цепи, которое может пройти через тело человека. Средства коллективной защиты от опасного фактора: защитное заземление, зануление, защитное отключение, двойная изоляция, оградительное устройство и разделение электросети с помощью трансформаторов. Средства индивидуальной защиты: каски, очки, щитки, диэлектрические перчатки, резиновые галоши</p>
<p>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</p>	<p>Атмосфера, литосфера: утилизация вышедших из строя персональных электронно-вычислительных машин</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</p>	<p>Наиболее типичная ЧС: возникновение возгорания вычислительной техники.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б81	Проскурина Анастасия Алексеевна		

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования Бакалавриат

Направление подготовки – Физика конденсированного состояния

Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

Период выполнения _____

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(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)
03.03.2022	Аналитический обзор литературы	15
15.04.2022	Исследование наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb до и после облучения протонами и ионами гелия методом позитронной спектроскопии с применением позитронов переменной энергии	20
01.05.2022	Анализ полученных результатов	15
20.05.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2022	Социальная ответственность	15
30.05.2022	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Лаптев Роман Сергеевич		к.т.н.	

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЭФ	Склярова Елена Александровна		к.п.н., доцент	

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 109 страниц, 10 рисунков, 15 таблиц, 47 источников, 0 приложений.

Ключевые слова: металлические покрытия, многослойные покрытия, облучение протонами, облучение ионами гелия, позитронная спектроскопия.

Объект исследования: наноразмерные металлические многослойные покрытия Zr/Nb с толщиной индивидуальных слоёв 100 нм.

Цель работы: анализ наноразмерных металлических многослойных систем на основе Zr/Nb после облучения протонами и ионами гелия методом доплеровского уширения аннигиляционной линии с применением пучков позитронов переменной энергии.

В процессе исследования проводилось облучение наноразмерных металлических многослойных покрытий Zr/Nb протонами с энергией 1750 кэВ и ионами гелия с энергией 25 кэВ; проводился анализ дефектной структуры полученных покрытий до и после облучения посредством позитронной спектроскопии методом доплеровского уширения с использованием пучков позитронов переменной энергии.

В результате исследования установлено, что после протонного облучения в покрытии происходит уменьшение избыточного свободного объёма, а облучение ионами гелия приводит к накоплению радиационных дефектов. При этом в обоих случаях сохраняется один преобладающий центр захвата позитронов – избыточный свободный объём вблизи границы раздела со стороны циркония.

Область применения: реакторы термоядерного синтеза различных конфигураций, аэрокосмическая техника.

Экономическая эффективность/значимость работы: полученные результаты могут оказать положительное влияние на методы повышения радиационной стойкости конструкционных материалов.

Оглавление

Введение.....	14
Глава 1. Наноразмерные многослойные системы: получение и их радиационная стойкость	16
1.1. Высокоэнтропийные многослойные системы	16
1.2. Наноразмерные многослойные системы	19
1.2.1. Наноразмерные многослойные керамические покрытия	20
1.2.2. Наноразмерные многослойные металлические покрытия	23
1.2.2.1. Когерентные системы.....	24
1.2.2.2. Некогерентные системы.....	28
1.2. Влияние облучения на ОЦК и ГПУ металлы.....	36
1.2.1. Влияние облучения на ОЦК металлы.....	37
1.2.2. Влияние облучения на ГПУ металлы	38
1.3. Позитронная спектроскопия радиационных дефектов	40
1.3.1. Физические основы метода.....	41
1.3.2. Спектроскопия доплеровского уширения аннигиляционной линии... 45	
Глава 2. Материалы и методы исследования	53
2.1. Нанесение наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb 53	
2.2. Облучение протонами	53
2.3. Облучение ионами гелия.....	55
2.4. Послойный анализ дефектов с применением пучков позитронов переменной энергии.....	56
2.4.1. Позитронная спектроскопия дефектов, индуцированных протонным облучением	56
2.4.2. Позитронная спектроскопия радиационных дефектов, индуцированных облучением ионами гелия.....	59

Глава 3. Влияние облучения на дефектную структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb.....	61
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	65
4.1. Потенциальные потребители результатов исследования	66
4.2. Анализ конкурентных технических решений	66
4.3 SWOT-анализ.....	68
4.4 Планирование научно-исследовательских работ	71
4.4.1 Определение трудоёмкости выполнения работ	71
4.4.2. Разработка графика проведения научного исследования.....	72
4.5. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	74
4.5.1. Расчёт материальных затрат НТИ.....	75
4.5.2. Расчёт затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ	76
4.5.3. Основная заработная плата исполнителей темы	77
4.5.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы	79
4.5.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	80
4.5.6. Контрагентные расходы	77
4.5.7. Накладные расходы	82
4.5.8. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	82
4.6. Оценка эффективности проекта	83
4.7. Выводы по финансовой части	85
Глава 5. Социальная ответственность.....	86
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	86
5.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства	86
5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	88

5.2. Производственная безопасность.....	89
5.2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	89
5.2.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	90
5.2.2.1. Микроклимат.....	90
5.2.2.2. Производственный шум.....	93
5.2.2.3. Освещённость.....	93
5.2.2.4. Расчёт искусственной освещённости.....	94
5.2.2.5. Электробезопасность.....	96
5.3. Экологическая безопасность.....	98
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	99
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	100
5.4.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС.....	100
Выводы по социальной части.....	102
Заключение.....	103
Список литературы.....	105

Введение

Большой сегмент современной высокотехнологичной техники ядерного и космического назначения подвергается негативному воздействию излучения, которое может приводить к выходу из строя критически важного оборудования. Для предотвращения этого используются различные методы, которые позволяют не только повысить радиационную стойкость конструкционных материалов, но ряд других физико-механических свойств.

Одним из таких методов является нанесение на поверхность конструкционных материалов наноразмерных многослойных металлических покрытий (НММП). Подобные многослойные покрытия зачастую обладают высокими механическими и трибологическими свойствами, коррозионной и радиационной стойкостью [1]. При этом наибольшей радиационной стойкостью обладают покрытия на основе керамики за счёт высокого сопротивления радиационному набуханию [2].

Однако НММП с некогерентными фазами имеют более простую и распространённую технологию нанесения, а также обеспечивают возможность самовосстановления радиационно-индуцированных повреждений посредством поглощения и препятствования распространению дефектов, образованных радиационным облучением, на границах между слоями. Система на основе мультислоев Zr и Nb является наиболее перспективной, поскольку сплавы на их основе активно используются в ядерных реакторах благодаря низкому сечению захвата тепловых нейтронов и высокой коррозионной стойкости.

Понимание влияния радиационных повреждений на структуру и свойства НММП имеет решающее значение для прогнозирования их потенциальных возможностей. Комбинированное воздействие высоких температур, коррозионных сред и продуктов термоядерных реакций (например, потоков протонов и ионов гелия) приводит к сложным повреждениям, которые в настоящее время малоизучены. Таким образом, актуальной задачей является изучение влияния различного облучения на структуру и свойства НМС на

основе Zr/Nb для разработки способов и подходов улучшения свойств существующих систем.

Для выявления механизмов радиационного повреждения наиболее применимы методы позитронной аннигиляционной спектроскопии, поскольку они могут обнаруживать ранние стадии образования дефектов и их распространения в атомном масштабе.

Целью данной выпускной квалификационной работы является анализ наноразмерных металлических многослойных систем на основе Zr/Nb после облучения протонами и ионами гелия методом доплеровского уширения аннигиляционной линии с применением пучков позитронов переменной энергии.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Подготовка экспериментальных образцов наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb;
2. Облучение наноразмерных металлических многослойных систем протонами и ионами гелия;
3. Исследование наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb до и после облучения протонами и ионами гелия методом позитронной спектроскопии с применением пучков позитронов переменной энергии;
4. Анализ результатов позитронной спектроскопии наноразмерных металлических многослойных системах Zr/Nb после облучения протонами и ионами гелия.

Глава 1. Наноразмерные многослойные системы: получение и их радиационная стойкость

Свойства многослойных покрытий повсеместно исследуются для использования их во многих сферах применения в качестве барьера от механических, химических, тепловых, электрических, электрохимических, радиационных или иных воздействий. На данный момент обращают особое внимание на защиту структурных компонентов оборудования, подверженного радиационному облучению. Из-за суровых условий работы поверхности материалов на ядерных установках подвергаются комплексному воздействию высокой температуры, высокого давления и широкого сечения пучков облучения. Повышение стойкости этих материалов к облучению является проблемой, стимулирующей исследования по разработке покрытий, устойчивых к облучению.

Существует несколько стратегий разработок, одна из которых заключается во внедрении в покрытия устойчивых к облучению сыпучих материалов, таких как устойчивые к облучению высокоэнтропийные сплавы или керамики. Другой подход заключается во введении сложных структур, например, многослойных металлических или керамических покрытий, для увеличения плотности границ раздела фаз, которые аннигилируют дефекты, индуцированные облучением [1]. Рассмотрим оба подхода.

1.1. Высокоэнтропийные многослойные системы

В отличие от традиционных разбавленных сплавов, для высокоэнтропийных сплавов сложность их состава и сильное искажение решетки могут эффективно изменять поведение миграции дефектов и повышать скорость комбинирования дефектов облучения [1].

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) – это смесь четырёх или более элементов с концентрациями в пределах 5-35 атомных процентов, образующая твёрдорастворную фазу со структурами ОЦК, ГЦК или ГПУ за счёт подавления образования соединений между металлическими компонентами. В целом можно классифицировать две основные группы известных ВЭС, используемых при высоких температурах: ГЦК-структуры на основе 3d-переходных металлов Fe, Ni, Co, Cr, Cu, Mn (также называемые сплавом Кантора) и ОЦК-структуры на основе тугоплавких элементов Zr, Ta, Mo, Ti, V, W, Hf, Nb.

По сравнению с обычными сплавами, содержащими один или два основных элемента, ВЭС обладают хорошими механическими и трибологическими свойствами, коррозионной и радиационной стойкостью. Тем не менее, добавление небольшого количества углерода и азота в сплавы может улучшить устойчивость к облучению путём увеличения искажений в решётке [1].

Керамические материалы обладают устойчивостью к аморфизации (превращению кристаллической структуры в разупорядоченное аморфное состояние) и набуханию под действием облучения и поэтому являются перспективными для радиационно-стойкой защиты поверхности [2].

Высокоэнтропийные нитриды (ВЭН) – класс керамических материалов, основанных на концепции ВЭС с растворённым азотом. Они используются в качестве защитных покрытий режущих инструментов, диффузионных барьерных (несмешиваемых) слоёв, а стойкие к коррозии покрытия находят применение в качестве стойких к облучению покрытий. Сочетание хорошей стойкости к облучению ВЭС и ВЭН с отличными механическими свойствами и способностью к аннигиляции дефектов многослойными структурами, устойчивое к облучению поведение многослойных покрытий систем ВЭС/ВЭС и ВЭН/ВЭН и лежащий в его основе механизм позволило авторам [1] начать исследования их особенностей. В частности, исследования микроструктурной стабильности и диффузии элементов в условиях высокой температуры и радиационного облучения.

Для этого в камере с системой из четырёх магнетронных установок были выращены высокоэнтропийные металлические и нитридные (в атмосфере азота) многослойные покрытия TiNbZrTa/CrFeCoNi и TiNbZrTaN/CrFeCoNiN на подложках из монокристалла сапфира (оксида алюминия) с ориентацией (0001) с толщиной бислоя около 30 нм и общей толщиной 2 мкм. Затем образцы были облучены ионами ксенона при комнатной температуре и при 500°C для введения высокой радиационной дефектности.

Рентгеновская дифракция показала, что после облучения изначальная ГЦК ВЭС покрытий структура оказалась слегка хаотично ориентированной лишь в слоях с TiNbZrTa, а слои второго типа превратились в аморфные за счёт диффузии кобальта и никеля во внутренние слои. Хотя аморфизация является важной проблемой для облученной многослойной керамики [3], тем не менее, сравнение результатов всех исследований в работе [1] показали, что нитридные многослойные покрытия обладают лучшей структурной стабильностью под воздействием облучения и высокой температуры, чем металлические.

Структурная и химическая стабильность ВЭН при высокой температуре и при облучении объяснялась более сильным химическим сродством азота с основными металлическими элементами, химической гетерогенностью, индуцированной растворением межузельных атомов, и низкой свободной энергией Гиббса системы [1, 4].

В другой работе рассматривались ВЭС, обладающие, благодаря низким диффузионным эффектам и сильным эффектам от искажения решётки, выдающейся устойчивостью к облучению, высокой прочностью, пластичностью, термической стабильностью и большой усталостной стойкостью.

Так, были нанесены покрытия ВЭС/Cu (где ВЭС – Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀, Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Ni₁₀) общей толщиной 1,5 мм на кремниевую подложку (111) методом магнетронного распыления постоянным током. Первым слоем была медь, а последним – ВЭС. В камере при комнатной температуре основное давление составляло $4 \cdot 10^{-4}$ Па перед процессом осаждения и 1 Па (за счёт

атмосферы Ar) во время процесса. Толщина индивидуального слоя была одинакова и от образца к образцу изменялась в диапазоне 5-150 нм. Затем образцы облучались ионами гелия с энергией 40 кэВ и дозой излучения $1 \cdot 10^{17}$ ионов/см².

В результате выяснилось, что, вопреки тенденции, что меньшая толщина индивидуального слоя оказывает меньшее упрочнение облучением в биметаллических многослойных системах, система Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀/Cu проявила тенденцию увеличения упрочнения после облучения при уменьшении толщины слоя. Это обуславливается образованием пузырьков гелия, препятствующих движению дислокаций. И наоборот, система Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Ni₁₀/Cu демонстрируют максимальное упрочнение при критической толщине индивидуального слоя, равном 50 нм. Ниже этого критического размера имеет место стандартная тенденция биметаллических систем, то есть рост упрочнения с повышением толщины слоя за счёт цепей пузырьков газа, не препятствующих движению границ зёрен; в то же время выше этого размера поведение радиационного упрочнения аналогично первому составу [5].

1.2. Наноразмерные многослойные системы

Покрyтия, состоящие из множества чередующихся слоёв металла или керамики с наноразмерными толщинами, показывают свою эффективность высокой прочностью и превосходной устойчивостью к повреждениям. Также они считаются привлекательными для исследователей, изучающих влияния границ раздела слоёв покрытия на устранение дефектов, индуцированных облучением, поскольку большое количество межфазных областей могут выступать в качестве упругих стоков дефектов [6]. Разберём несколько вариаций подобных систем.

Наноразмерные многослойные системы можно разделить по различным признакам. Например, на основе групп конструкционных материалов различаются чисто металлические, керамические, полимерные, композитные покрытия или их комбинации (биметаллические, металло-керамические и тому подобное). Из них определённой радиационной стойкостью отличаются в основном металлические и керамические покрытия, которые, в свою очередь, можно сгруппировать по состоянию твёрдых веществ (кристаллические, аморфные или их сочетание).

Особую роль играет разделение многослойных покрытий по комбинированию кристаллической структуры каждого типа вещества (ГЦК, ОЦК, ГПУ и другие), поскольку, как выяснилось, границы раздела покрытий, имеющих разные кристаллические решётки, являются эффективным стоком точечных и линейных дефектов [7].

1.2.1. Наноразмерные многослойные керамические покрытия

Смешивание слоёв наноразмерных многослойных керамических и не только покрытий обычно вызывает деградацию свойств и снижает срок их эксплуатации. Например, радиационная стойкость и прочность защитных покрытий внутри ядерных реакторов теряются под действием облучения, вызывающего структурные дефекты, повреждения и коалесценцию (перемешивание). Этим руководствовались в работе [2], исследуя покрытия, которые потенциально не будут перемешиваться за счёт низкой взаимной растворимости и поглощающих радиационные дефекты границы раздела веществ. Для этого были выбраны многослойные системы AlN/TiN, характеристиками которых являются высокая твёрдость, прочность, а также отличная термостойкость.

Многослойные покрытия выбранной системы осаждали на очищенные ионным травлением и промывкой пластины кремния (100) комнатной температуры с использованием ионов аргона 1,5 кэВ для распыления

высокочистых мишеней алюминия и титана в азотной среде. Отсутствие нагрева подложки контролировалось термопарой. Выращивание происходило в одном вакуумном цикле путём переключения с одной мишени на другую. Покрытие составило 5 бислоев AlN/TiN, первым нанесённым слоем был TiN, а внешним – AlN. Отдельные слои нитрида алюминия имели толщину около 22 нм, а слои нитрида титана примерно 32 нм, дающие общую толщину 270 нм. Полученные покрытия, составляющие кристаллическую структуру ГПУ/ГЦК, при комнатной температуре облучали ионами аргона с энергией 200 кэВ и тяжёлыми ионами ксенона с энергией 166 МэВ.

Результаты экспериментов в [2] свидетельствуют о явном различии вклада атомных столкновений и электронных возбуждений в эффекты от ионного облучения на многослойные слои AlN/TiN. При этом последствия имплантации аргоном локализованы на глубине ионного диапазона, а последствия облучения ксеноном одинаковы по всей многослойной структуре. Атомные столкновения, действующие при облучении ионами Ar, формируют кристаллические дефекты и низкую степень перемешивания, который может быть частично компенсирован химическим расслоением. В случае облучения ионами Xe только электронные возбуждения способствуют индуцированным структурным изменениям. Термические всплески, возникающие в обоих случаях имплантации, приводят к латеральному росту зёрен в отдельных слоях, но без смешивания границ раздела. Подтверждённая измерениями относительная стабильность к радиационному облучению и отсутствие перемешивания многослойной системы AlN/TiN обусловлены высокой взаимной нерастворимостью составляющих фаз.

Однако, поскольку исследования взаимодействия наноразмерных структур, облучаемых ионами, ограничены и различаются от одной системы к другой, физические процессы, а также получаемые эксплуатационные характеристики могут сильно различаться. Так, в системе ZrN/TaN после облучения высокоэнергетическими ионами гелия выявлен асимметричный характер точечных дефектов через различия в энергиях образования вакансий

чередующихся слоёв. Это несоответствие приводит к сохранению кристалличности в одной фазе и сильной аморфизации в другой [3]. То есть неравновесное композиционное распределение может быть обусловлено особенностями границ раздела, выполняющих роль диффузионного барьера для атомов и вакансий (например, прочность ковалентных связей). В конечном итоге это привело к преимущественному распределению гелия в слое TaN и накоплению вакансий на границе раздела [8].

А в работе [3], наоборот, рассматривали размытие альтернативных слоёв покрытия для улучшения поглощения дефектов и ионов отдачи. Упоминались наноканальные слои нитрида хрома, получившие сильную коалесценцию (перемешивание) в результате бомбардировки ионами гелия с энергиями 30-380 кэВ с дозой $2 \cdot 10^{17}$ ионов/см². Эти покрытия сохраняли микроструктурную стабильность при повышенных температурах.

Вообще, индуцированное ионным облучением межфазное перемешивание в тонких плёнках можно разделить на три режима. Первый режим – баллистическое перемешивание за счёт каскадов столкновений. Время, необходимое для того, чтобы падающий ион и вторичные отскоки потеряли большую часть кинетической энергии, составляет порядка 10^{-13} с. Второй режим называется термализирующим, или релаксационным. Он длится около 10^{-10} - 10^{-9} с. Данный режим составляет время, необходимое для выравнивания локальной температуры, развившейся вокруг движущихся частиц, с соседним окружением. Третий – замедленный режим. Он изотермичен и длится намного дольше, поскольку включает в себя миграцию атомов и дефектов из-за неравновесных концентраций. Обычно последний режим оказывает низкое влияние на структуры, возникающие при смешивании ионными пучками [2].

Поэтому на предварительно очищенную в тлеющем разряде горячую (250°C) медную подложку были нанесены слои хрома и циркония в атмосфере азота при рабочем давлении в камере 0,16 Па. Полученное покрытие имело структуру ГЦК. Ионное перемешивание верхних 40 нм системы CrN/ZrN происходило при комнатной температуре ионами кремния с энергией 60 кэВ, а

затем и при более высокой энергии ионов для максимизации смешивания слоёв. Комнатная температура поддерживалась подачей на заднюю часть подложки холодной воды.

По итогам исследований сделано предположение, что структура многослойной системы CrN/ZrN (001) должна быть метастабильной из-за большого накопления энергии деформации, возникающей в результате рассогласования решётки. Рассчитанная энергия замещения атомов металла атомами кремния в разных слоях вокруг границы раздела фаз указывает на то, что кремний будет концентрироваться на стороне CrN ближе к интерфейсу в соответствии с экспериментом. Несмотря на шероховатую поверхность, трибологический тест показывает стабильный абразивный износ и низкий коэффициент трения ($\mu = 0.2$). Повышенная стойкость к истиранию обусловлена гетерогенной структурой наноразмерного слоя и самосмазыванием частиц кремния. В целом, это исследование демонстрирует, что имплантированные кремнием покрытия на основе CrN/ZrN имеют потенциал разве что для трибомеханических применений.

1.2.2. Наноразмерные многослойные металлические покрытия

Исследования, посвящённые радиационному поведению наноразмерных многослойных металлических покрытий (НММП), тоже обусловлены свойствами отдельных структур. Современные методы нанесения покрытий, такие как магнетронное распыление, позволяют выращивать различные типы границ раздела фаз, а также точно контролировать толщину отдельных слоёв. Когда два различных химических элемента или формульных единиц образуют идентичную кристаллическую структуру и почти одинаковый параметр решётки, обычно получаются когерентные границы раздела; при этом обе кристаллические решётки почти неразличимы на границе между слоями. Это также называется эпитаксиальным ростом. С другой стороны, когда компоненты многослойных покрытий имеют отличающиеся кристаллические

структуры или сильно разные параметры решётки, то тогда образуются некогерентные границы раздела [6].

1.2.2.1. Когерентные системы

ГЦК-кристаллы имеют сходные температуры плавления около 1000°C , что заставляет предположить похожесть динамики их точечных дефектов в ответ на излучение. Были исследованы системы с когерентными границами раздела для того, чтобы лучше понять роль систем ГЦК/ГЦК в развитии радиационных повреждений с обеих сторон [9]. Кроме того, изменяя концентрацию радиационных дефектов и концентрацию гелия, исследовали, как изменяются взаимодействия границ раздела с количеством точечных дефектов, созданных в каждом слое системы, и с различными типами радиационных дефектов.

Так называемые "объёмные нанокompозиты" Cu/Ag, выбранные в качестве модели для изучения, были получены путём закалки расплавленного сплава с эвтектическим составом, то есть атомным соотношением 2 к 3. Размеры слитков изготавливались диаметром 10 мм и длиной 40 мм, из которых были изготовлены два типа образцов: "объёмные" дисковые образцы и образцы для просвечивающей электронной микроскопии. Объёмные образцы вырезали из слитка методом искровой резки, затем шлифовали и полировали до зеркальной поверхности. Фольгу для электронного микроскопа измельчали до толщины около 50 мкм.

Полученные образцы облучали ионами гелия с энергией 400 кэВ при 400°C . Доза ионов составила $2 \cdot 10^{17}$ ионов/см² в течение 200 минут. Пучок гелия был настроен почти перпендикулярно (7° , чтобы избежать эффекта каналирования, уменьшающего количество дефектов) к верхней поверхности объёмных образцов и к поверхности фольги.

Анализ показал, что межузельные ионы серебра мигрировали, по крайней мере, на расстояние 800 нм (в 10 раз больше, чем было спрогнозировано), в то время как межузельные ионы меди перемещались на расстояние более 600 нм

(в 46 раз больше прогноза). Существенная разница в экспериментальных измерениях и расчётах предполагает усиленную радиацией диффузию, то есть ускорение излучением диффузии дефектов как минимум на один порядок. Продолжение исследований указывает на то, что межузельные ионы движутся быстрее, чем вакансии, а также межузельные ионы серебра диффундируют дальше, чем меди. Другим моментом, который стоит отметить, является большее расхождение для Cu, чем для Ag.

Поскольку расслоение, вызванное межфазным напряжением, происходит на многочисленных границах раздела Cu/Ag, концентрация межузельных дефектов в слое Cu выше, чем в слое Ag, что способствует диффузии межузельных ионов меди в более глубокие области. Этот эффект объясняет, почему последние демонстрируют гораздо большее расхождение от предсказанного законом диффузии по сравнению с серебром. Отсюда следует важное соображение, что как усиленная радиацией диффузия дефектов, так и заметная разница в подвижности вакансий и промежутков между двумя фазами вредны для металлов во время излучения. Вместе они препятствуют рекомбинации точечных дефектов и способствуют накоплению радиационных повреждений [9].

В следующей работе [6] рассматривались НММП когерентной ГЦК-системы Ag/Ni с целью подтвердить заключение иной работы о том, что меньшая толщина слоя покрытия приводит к повышенной радиационной стойкости, и на зарождение и миграцию дефектов можно в значительной степени повлиять, если уменьшить толщину отдельного слоя до нескольких нанометров.

Многослойные покрытия Ag/Ni общей толщиной 1-4 мкм были синтезированы на очищенных травлением монокристаллах кремния (111) методом магнетронного распыления постоянного тока при комнатной температуре. Каждый слой имеет одинаковую индивидуальную толщину слоя, варьирующуюся от 1 до 200 нм. Базовое давление в камере $6,7 \cdot 10^{-6}$ Па до начала процесса повысилось после введения атмосферы аргона примерно до 0,5

Па во время процесса. Все покрытия облучали при комнатной температуре с использованием ионов гелия с энергией 100 кэВ и дозой $6 \cdot 10^{20}$ ионов/м² или протонов с энергией 180 кэВ и дозой $6 \cdot 10^{21}$ ионов/м². Повышение температуры во время облучения образцов составило около 50°С.

Проведённые далее эксперименты были проведены для сравнения микроструктурной эволюции и упрочнения в НММП системы Ag/Ni, вызванное ионным и протонным излучением. Было обнаружено, что пузырьки являются основными дефектами в покрытиях, облучённых ионами гелия, тогда как дислокационные петли наблюдались в облучённых протонами покрытиях. Протонное излучение сформировало гораздо меньшее искажение решётки и незначительное радиационное упрочнение по сравнению с облученными ионами He, учитывая, что в каждом случае применялся одинаковый уровень дозы.

В облучённых ионами гелия покрытиях плотность пузырьков He уменьшается с уменьшением толщины индивидуального слоя. Это явление может быть объяснено в первую очередь захватом атомов гелия на границах раздела фаз системы Ag/Ni. В простых объёмных поликристаллических металлах с крупными зёрнами растворимость гелия обычно очень низкая, поэтому атомы He предпочитают не входить в кластеры вакансий и образуют пузырьки He лишь под давлением. Однако в системе Ag/Ni пузырьки гелия, по-видимому, вносят более значительные искажения в кристаллическую структуру покрытия. Кроме того, эти пузырьки вызывают растягивающее напряжение, которое приводит к большему расширению кристаллической решетки.

Упрочнение образовавшимися в покрытиях пузырьками ионов гелия в многослойных слоях имеет чёткую зависимость от размера, которая была описана модифицированной в работе модели скопления скользящих дислокаций [6].

Были исследованы дефекты, индуцированные облучением в когерентной ОЦК-системе из Fe/W [10]. На подложки из оксида кремния многослойное покрытие Fe/W осаждали посредством магнетронного распыления при

комнатной температуре с первоначальным давлением менее $5 \cdot 10^{-8}$ торр перед осаждением. Компоненты системы имеют одинаковую индивидуальную толщину, варьирующуюся от 1 до 200 нм (1, 20, 50, 200). Общая толщина покрытия составляла около 2 мкм. После подложки облучались при комнатной температуре ионами гелия с энергией 100 кэВ до дозы облучения в $6 \cdot 10^{16}$ ионов/см².

В покрытиях всех толщин твёрдость после облучения увеличилась. Для объяснения радиационного упрочнения был предложен механизм дисперсного барьерного упрочнения, где радиационно-индуцированные дефекты (вакансионные или межузельные кластеры) действуют как барьеры для движения дислокаций.

В случае многослойного покрытия системы Fe/W радиационно-индуцированные изменения твёрдости, вероятно, происходят из-за формирования множества пузырьков гелия, межузельных петель, межузельных атомов гелия и микроструктурной эволюции границ раздела фаз (например, смешивания), среди которых более или менее значительный вклад оставляет именно изменение границ раздела.

Радиационно-индуцированное расширение решётки было подтверждено печальными картинками в исследованиях просвечивающей электронной микроскопии. Расширение решетки в слоях Fe и W, по всей видимости, является результатом появления межузельных дефектов, включая межузельные атомы He и собственные межузельные ионы Fe и W, а также межузельные петли, когда диаметр петли составляет порядка нанометрового масштаба длины.

Исследования также показывают, что средний диаметр наполненного гелием пузырька в Fe немного больше, чем в W. Следовательно, разница в диаметре пузырька He может быть вызвана разницей в модуле сдвига и поверхностной энергии между Fe и W.

А смешивание Fe и W из-за излучения происходит вдоль границ раздела слоёв, поскольку Fe и W являются взаимно растворимыми друг в друге твёрдыми растворами [10].

1.2.2.2. Некогерентные системы

НММП с некогерентными границами раздела фаз имеют высокую стабильность при повышенных температурах, что позволяет регулировать механические и электрические свойства. Нанесение таких покрытий улучшает радиационную стойкость материалов значительно лучше за счёт изменения термодинамических свойств точечных дефектов, их захвата на границе раздела и последующей рекомбинации. Управление радиационно-индуцированными дефектами через границы раздела является ключевым фактором снижения повреждения и придания стабильности некоторым наноматериалам в условиях, когда объёмные материалы страдают от набухания пустот и/или охрупчивания [11]. Рассмотрим различные комбинации кристаллических решёток в некогерентных НММП.

ОЦК-металлы обычно имеют более высокую температуру плавления и лучшую устойчивость к облучению, чем ГЦК-металлы, и поэтому многослойные покрытия ОЦК/ГЦК демонстрируют большую радиационную стойкость и термическую стабильность, чем отдельно ГЦК или даже когерентная система из решёток ГЦК. Таким образом, вклад ОЦК-фазы в радиационную стойкость границ раздела фаз системы ОЦК/ГЦК значителен [9]. Например, видимая плотность кластеров дефектов в меди с ГЦК-структурой больше, чем в железе со структурой ОЦК, подвергнутом той же дозе излучения. Также предполагается, что кластеры дефектов в облучённом железе относительно малы и более равномерно распределены, что приводит к их усиленной рекомбинации во время излучения. Аналогично, ферритные или мартенситные стали с преимущественно ОЦК-структурами часто обладают

лучшей устойчивостью к набуханию пустот, чем аустенитные нержавеющие стали с ГЦК-структурами [12].

Существует много экспериментальных данных, демонстрирующих, что границы раздела ОЦК/ГЦК могут излечивать радиационные дефекты в слоях ГЦК. Динамика дефектов в ОЦК и ГЦК металлах заметно отличается: подвижность дефектов в решётке ГЦК выше, чем в ОЦК. Следовательно, границы раздела в таких условиях излучения фактически взаимодействует только с дефектным потоком из слоёв с ГЦК-решёткой. Это может быть одним из объяснений того, почему границы раздела ОЦК/ГЦК показывают гораздо лучшую радиационную стойкость и стабильность структур, чем их границы зёрен [9].

В [12] многослойные покрытия Cu/Fe стали модельной системой для исследования реакции на радиационное повреждение при облучении тяжёлыми ионами. Медь и железо были выбраны, поскольку оба являются классическими примерами элементов металлов ОЦК и ГЦК и проявляют совершенно разные эффекты от радиационного облучения.

Многослойные покрытия Cu/Fe с индивидуальной толщиной слоя 100 и 5 нм осаждали магнетронным распылением при комнатной температуре на протравленные подложки кремния с ориентацией (110). Камера была эвакуирована до давления менее $8 \cdot 10^{-8}$ торр перед осаждением. Затем образцы облучали ионами меди с энергией 3 МэВ до степени повреждения примерно 1 дпа.

Максимальная плотность дефектов была идентифицирована в середине слоя меди, тогда как плотность дефектов достигла минимального уровня, прилегающего к границам раздела слоёв Cu/Fe. Такое распределение плотности дефектов поддерживает гипотезу о существовании зоны влияния границы раздела слоёв. Это подразумевает, что скоплениям дефектов труднее зародиться вблизи границ раздела, поскольку за счёт диффузии количество точечных дефектов снижается, приближаясь к границе. Иначе говоря, градиент плотности дефектов приводит к диффузии дефектов от внутренних объёмов к

границам слоёв. Таким образом, способность НММП смягчать последствия радиационного повреждения путём поглощения или устранения радиационно-индуцированных дефектов усиливается, когда толщина слоя уменьшается до размера, сопоставимого с размером зоны быстрой диффузии.

В предыдущих работах авторов исследования [12] сообщали, что плотность пузырьков гелия в многослойных покрытиях Cu/Fe, облучённых ионами He, сначала снижалась с уменьшением толщины индивидуального слоя примерно до 5 нм, а затем росла при меньшей толщине; тем не менее, набухание пустот монотонно уменьшалось с уменьшением толщины слоя.

Система ОЦК/ГЦК с другими элементами не демонстрирует противоречия с упомянутой гипотезой. В [13] сосредоточились на изучении упрочнения от пузырьков гелия в несмешивающейся ОЦК/ГЦК системе V/Ag в зависимости от толщины слоя.

Многослойные покрытия с равными толщинами слоев, а также чистые покрытия Ag и V были выращены посредством магнетронного распыления постоянного тока на подложках кремния (100) при комнатной температуре. Общая толщина была постоянной для абсолютно всех образцов – 1 мкм. Соответственно, общее количество бислоев различно для разных толщин. Во время процесса парциальное давление аргона в камере составляло 0,533 и 2,4 Па для осаждения Ag и V. После образцы при комнатной температуре облучали ионами гелия с энергией 22 кэВ дозой $1 \cdot 10^{17}$ ионов/см² до повреждения 10 дпа.

Установлено, что радиационно-индуцированное упрочнение снижается с уменьшением толщины отдельного слоя. В образцах с толщиной менее 10 нм не получили изменения твёрдости; эта толщина составляет среднее расстояние между пузырьками He. Чистые покрытия ванадия показали значительное упрочнение из-за плотного распределения пузырьков He диаметром 0,8 нм, а в чистом Ag пузырьки вырастают до диаметра 20 нм и перестают вызывать упрочнения [13].

Прочие многослойные покрытия, характеризующиеся способностью залечивать радиационные повреждения, состояются с более плотно

упакованными решётками – ГПУ. Они могут быть сконструированы таким образом, чтобы получить как большую радиационную стойкость, так и высокую прочность за счёт варьирования толщины слоёв и межфазных структур [14].

Для проектирования такой структуры при комнатной температуре магнетронным распылением постоянным током нанесли на монокристалл кремния (100) некогерентную и смешивающуюся систему ГЦК/ГПУ в виде многослойного покрытия Cu/Zr. Общая толщина около 1,6 мкм состояла из толщин индивидуальных слоёв, варьировавшихся от 5 до 100 нм. Перед осаждением подложки очищали ультразвуковой мойкой и травлением. На каждом образце самым верхним слоем была медь. Затем покрытия Cu/Zr отжигали 2 ч при 150°C, чтобы уменьшить остаточное напряжение и сделать микроструктуру стабильной. Эксперимент по облучению проводился с энергией ионов гелия 40 кэВ при комнатной температуре с дозами ионов $1 \cdot 10^{16}$, $1 \cdot 10^{17}$, и $5 \cdot 10^{17}$ ионов/см². Расчёт показал, что концентрация гелия достигает максимального значения на глубине примерно 150-200 нм.

Поскольку границы раздела слоёв Cu-Zr играют роль стока для дефектов облучения и облегчают аннигиляцию/рекомбинацию дефектов, покрытия с низкой толщиной слоёв показывают хорошую радиационную стойкость при низкой плотности пузырьков гелия. А чем выше ионный поток, тем больше диаметр пузырька и ниже расстояние между пузырьками оказывалось в слоях меди. То есть низкая доза ионов индуцировала упрочнение облучением, в то время как высокая доза приводила к размягчению материала [14].

Ещё более некогерентную систему составляют представители ГПУ и ОЦК-структур – цирконий и молибден. Выбор материалов в [15] обусловлен, во-первых, тем, что Zr широко используется в атомной промышленности из-за его низкого сечения захвата тепловых нейтронов. Во-вторых, по сравнению с цирконием Mo обладает лучшей устойчивостью к ползучести, высокотемпературной прочностью, сильной устойчивостью к нейтронному и гамма-излучению. Однако радиационно-индуцированное охрупчивание и более

высокое сечение захвата тепловых нейтронов ограничивают его применение. Поэтому естественно ожидать, что комбинация Zr и Mo в форме НММП может быть использована для преодоления недостатков при облучении.

Систему смешивающиеся покрытий Mo/Zr общей толщиной 1,5 мкм осаждали на кремниевую (100) подложку методом магнетронного распыления постоянным током в атмосфере аргона при комнатной температуре. Во время процесса давление в камере поддерживалось менее $2,5 \cdot 10^{-3}$ торр. Толщина отдельного слоя Zr и Mo одинакова и составляла от 10 до 150 нм. Образцы подвергались воздействию ионов гелия с энергией 40 кэВ до достижения дозы $1 \cdot 10^{16}$ и $1,0 \cdot 10^{17}$ ионов/см².

Сравнивая характеристики пластической деформации покрытий Mo/Zr до и после облучения, выявили следующие закономерности. Поскольку границы раздела могут действовать как поглотители радиационных дефектов и способствовать их восстановлению, покрытия с меньшей толщиной проявляют большую радиационную стойкость при меньшей плотности пузырьков.

При низкой дозе облучения происходит подавление упрочнения с уменьшением толщины слоя. При высокой дозе существует критическая толщина около 15 нм, ниже которой радиационное упрочнение стало более значительным. Это расхождение объясняется наличием скоплений He-вакансий на границе раздела и перемешиванием слоёв, усиленным облучением [15].

В ещё одной работе [11], в которой изучалась система ОЦК/ГПУ, а также в [14] было показано различие используемых для анализа механизмов радиационно-индуцированного упрочнения в зависимости от толщины слоя или размера зерна:

- для большой толщины/большого размера зерна (более 50 нм) упрочнение опирается на скопление скользящих дислокаций и, таким образом, описывается классической моделью зернограничного упрочнения Холла-Петча;
- при средней толщине/размере (между 10 нм и 50 нм), следуя механизму изгиба дислокаций по Оровану, модель скольжения

ограниченного слоя имеет влияние на текучесть наноразмерных слоёв;

- для малых размеров (менее 10 нм) прочность текучести слоёв определяется прочностью межфазного барьера для одиночной скользящей дислокации, прорезающей границы раздела.

Различные параметры могут влиять на механические свойства НММП, такие как тип, размер и плотность дефектов, созданных в результате облучения, а также плотность границы раздела и несоответствие между слоями. Понимание деформационного поведения НММП необходимо для получения в покрытиях высокой твёрдости и низкого упрочнения облучением за счёт оптимизации микроструктурных параметров [11].

Чем был обусловлен выбор компонентов покрытия? Цирконий и его сплавы используются для оболочек ТВЭЛОВ, управляющих стержней, топливных контейнеров; являются одними из основных компонентов рабочей зоны в ядерных реакторах с водяным охлаждением благодаря их низкому поперечному сечению захвата тепловых нейтронов и исключительной коррозионной стойкости. Циркониевые сплавы, такие как циркалой (цирконий с оловом) и Zr–Nb, также используются в качестве материалов конструкций атомной промышленности. Сплавы Zr–Nb показали наилучшие свойства, главным образом устойчивость к коррозии и ползучести от облучения, по сравнению с прочими циркониевыми сплавами. Облучение вызывает осаждение богатых ниобием игольчатых частиц в матрице Zr, что может способствовать повышению коррозионной стойкости сплавов во внутренней среде реактора.

С другой стороны, при некоторых условиях облучение может существенно влиять на целостность объёмных конструкций из циркониевых сплавов за счёт образования пустот, поверхностного набухания и формирования пузырьков.

С учётом свойств циркония и его сплавов, а также преимущества границ раздела НММП систем ОЦК/ГПУ по отношению к другим системам,

многослойные покрытия Zr/Nb являются наиболее перспективной структурой, обладающей высокой устойчивостью к радиационно-индуцированному разрушению [11].

Поэтому высокочистые мишени Zr и Nb использовались для осаждения многослойного покрытия Zr/Nb с толщиной бислоя 6 нм (Zr = 3 нм, Nb = 3 нм), 27 нм (Zr = 16 нм, Nb = 11 нм) и 96 нм (Zr = 57 нм, Nb = 39 нм) на монокристалл кремния (111) методом магнетронного распыления постоянного тока. Общая толщина покрытия варьировалась от 1,5 до 2 мкм. Облучение ионами C с энергией 1,4 МэВ проводили при комнатной температуре при двух дозах $1,5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ ионов/см², облучение Si проводили с энергией 1,8 МэВ при $4 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ ионов/см² и, наконец, облучение ионами Cu с энергией 2,225 МэВ проводили при $1,5 \cdot 10^{15}$ и $4 \cdot 10^{15}$ ионов/см².

Осаждённые покрытия содержат вакансии, размер и плотность которых растут с повышением повреждений от облучения. Система Zr/Nb сохраняет упругую энергию из-за большого несоответствия на границе раздела, что играет значительную роль в тонких многослойных покрытиях (с толщиной бислоя 6 нм). Следовательно, эволюция деформации сильно зависит от толщины. Повреждение облучением вызывает внеплоскостную деформацию, которая более выражена в тонких многослойных слоях и, в частности, в ОЦК слоях ниобия.

Экспериментальные результаты показывают, что структурная эволюция покрытия практически не зависит от типа облучённого иона. Тонкие многослойные покрытия Zr/Nb на 11% твёрже толстых (остальных покрытий) и проявляют более высокую радиационную стойкость (более низкое упрочнение облучением), то есть плотность границ раздела оказывает большое влияние на упрочнение. Это открытие указывает на то, что границы раздела представляют собой центр рекомбинации дефектов и действуют как сток.

В тонких слоях радиационное упрочнение падает с увеличением дозы, а при сильном облучении ионами кремния и меди происходит переход от

упрочнения к размягчению. И наоборот, в толстых слоях упрочнение достигает точки насыщения при низких дозах, а затем начинает уменьшаться [11].

Авторы статьи [16] облучали ионами Cu с энергией 2,225 МэВ до низких и высоких доз $1,5 \cdot 10^{15}$ и $4 \cdot 10^{15}$ ионов/см² тонкие Zr/Nb₆ (толщина бислоя 6 нм) и толстые Zr/Nb₉₆ (96 нм) многослойные покрытия и выявили интересные последствия радиационного облучения.

После имплантации ионами Cu рентгеновский анализ показал некоторые изменения для тонких многослойных покрытий, связанные с менее заметными линиями-спутниками, смещением основной линии в сторону более высоких углов и уменьшением ширины FWHM. Первый аспект указывает на снижение уровня межфазной когерентности после облучения, то есть появилась более сильная разобщённость кристаллических структур слоёв. Второй аспект связан с искажением решетки из-за радиационно-индуцированных дефектов. Это произошло, вероятно, из-за увеличения размера зерна при повреждении облучением. Для Zr/Nb₉₆ после имплантации Cu почти не наблюдалось явных изменений, за исключением небольшого сдвига линии ниобия в сторону более высоких углов.

Противоположные искажения (сжатие и растяжение) в разных областях (во внутренних и на границах раздела) одного и того же слоя объясняет отсутствие средней внеплоскостной деформации в общей толстой многослойном покрытии. Высокая деформация в тонком НММП объясняется наличием только одного типа искажения в пределах отдельного слоя. Результаты этой работы подчеркивают, что в зависимости от степени радиационного повреждения дефекты внутри слоёв развиваются посредством отличных друг от друга стадий, вызывая различные искажения слоя.

Определение в данной работе эффективности поглощения интерфейса (аннигиляция дефектов) системы Zr/Nb в качестве иллюстрации обеспечивает стратегию проектирования новых производных структур многослойных покрытий с высокой устойчивостью к радиационному повреждению.

Таким образом, учитывая всё выше изложенное, появляется логичное заключение, что металлические системы, состоящие из ГЦК и/или ОЦК слоёв, обладают хорошими характеристиками для радиационной стойкости. Однако системы ГПУ/ОЦК из-за особенностей строения структуры имеют гораздо более сильные искажения границ раздела фаз, ведущие к лучшей радиационной стойкости. Перспективность подобных покрытий не отменяет того, что требуются дополнительные исследования для поиска оптимальных параметров (например, толщины индивидуальных слоёв) в разные сферы применения. Поэтому в следующем подразделе рассмотрим влияние облучения на именно такие системы.

1.2. Влияние облучения на ОЦК и ГПУ металлы

Высокая радиационная стойкость определяется более низкой способностью повреждаться от воздействия облучения. К этому относится, кроме радиационной активации вещества, ещё и быстрота восстановления первичных дефектов на так называемых центрах аннигиляции [17]. Этими центрами являются различные искажения решётки – поверхностные, одномерные и точечные дефекты. Однако точечные дефекты, вакансии и межузельные атомы (пары Френкеля), введённые облучением, могут эволюционировать в более крупные скопления точечных дефектов, тем самым ухудшая механические свойства конструкционных материалов [5].

Существуют определённые размеры зоны захвата для каждого типа дефектов. Аналогично условию формирования кластеров дефектов, для эффекта "самовосстановления" дефектов необходимо преодолевать преграду в виде некоторого энергетического барьера. То есть предполагается, что аннигиляция произойдёт только после перехода вакансий или примесей через поле напряжений других дефектов [17]. Наиболее эффективными в деле захвата являются границы зёрен, границы раздела фаз и дислокации. Эти

поглотители дефектов взаимодействуют с точечными дефектами и кластерами дефектов, индуцированных облучением, и в большей степени устраняют их [3].

Известно, что не все границы раздела демонстрируют одинаковую результативность в поглощении дефектов и что их различия могут быть рационализированы на основе их атомных структур и энергий взаимодействия с точечными дефектами. В дополнение к выбору или проектированию оптимальной структуры интерфейса для достижения высокой радиационной стойкости также важно увеличить объемную долю границ раздела. Эта высокая объемная доля приводит к превосходной стойкости к облучению и механическим свойствам [9].

Следовательно, создание НММП для смягчения радиационного повреждения весьма оправдано; чем выше плотность слоёв покрытия и чем сильнее некогерентны фазы, тем большую энергию захвата дефектов имеют границы раздела и тем лучше аннигилируют дефекты.

Тем не менее, выбранная система для создания НММП с некогерентными слоями требует чуть более глубокого изучения характерных для структур ОЦК и ГПУ радиационно-индуцированных дефектов. Здесь будут частично разобраны характерные дефекты для упомянутых кристаллических структур, полученных в результате облучения.

1.2.1. Влияние облучения на ОЦК металлы

Подобно металлам ГЦК, в облучённых ОЦК-металлах генерируется набор точечных дефектов и их скоплений. Энергия образования вакансий для ОЦК-металлов обычно составляет 1,6–3 эВ, а энергия миграции вакансий – 0,5-2 эВ. В ОЦК могут формироваться различные типы межузельных дефектов, в том числе краудионы (линейные скопления атомов за счёт дополнительных вставок), $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ гантели (межузельные скопления в форме гантелей) и октаэдрические и тетраэдрические собственные межузельные атомы [3].

Объём активации для самодиффузии межузельных дефектов в ОЦК-металлах составляет примерно 0,4–0,6 атомных объёмов (Ω), что меньше, чем в металлах ГЦК с 0,85 Ω [18]. По сравнению с ГЦК объёмное расширение, связанное со вставкой межузельного атома в ОЦК, значительно меньше около 0,64 Ω (против 1,1 Ω для ГЦК), из-за более низкой плотности упаковки ОЦК-металлов [19]. Релаксационный объём для собственных межузельных атомов составляет 1,0–1,5 Ω , что также значительно меньше, чем в ГЦК, равном 2 Ω [20]. Эти различия между ГЦК и ОЦК могут объяснить повышенную радиационную стойкость ОЦК-металлов по сравнению с другими металлами [3].

Как правило, высокая энергия дефекта упаковки ОЦК-металлов препятствует образованию крупных разорванных дислокационных петель [21]. Идеальные скользящие петли в ОЦК имеют $\{110\}$ характерные плоскости с $b = a/2 \langle 111 \rangle$, тогда как идеальные сидячие петли часто находятся на $\{100\}$ плоскостях с $b = a \langle 100 \rangle$ [22].

В целом, скопления дефектов, индуцированные тяжёлыми ионами и нейтронами, в облучённых ОЦК-металлах имеют похожие дислокационные петли размером до 10 нм. Облучение тяжёлыми ионами индуцирует в Fe цепочки дислокационных петель, тогда как нейтронное облучение индуцирует их скопления в Fe [3].

1.2.2. Влияние облучения на ГПУ металлы

Исследования природы дефектов в металлах ГПУ во многом обусловлены применением сплавов на основе циркония в качестве топливных оболочек реакторов. Вакансии и междоузлия в металлах ГПУ имеют гораздо более сложные конфигурации, чем в кубических системах.

Энергия образования и миграции моновакансий обычно составляет 0,6–2 эВ и 0,3–1 эВ соответственно. Объём образования единичных вакансий колеблется от 0,78 до 0,97 Ω [23]. Вакансии могут диффундировать внутри или

вне базальных (перпендикулярных главной оси) плоскостей. Расчёты показывают, что энергия активации самодиффузии (суммирование энергии образования вакансий и энергии миграции) меньше для небазальной плоскости в Zr из-за неидеального соотношения параметров решётки c/a [24].

Существует 8 различных способов расположения собственных межузельных атомов в металлах ГПУ. Два из них являются краудинами, расположенными на полпути между двумя ближайшими атомами вдоль $\langle 110 \rangle$ (на базальной плоскости) и $1/6 \langle 203 \rangle$ (вне базальной плоскости). Два других являются расщеплёнными гантелями внутри или ортогонально базальной плоскости [23,24]. Эти дефекты являются наиболее стабильной конфигурацией для металлов ГПУ с довольно большим отклонением от идеального соотношения параметров решётки c/a , а небазальная гантель является наиболее стабильной конфигурацией для ГПУ с близкими к идеалу отношениями c/a . Энергия межузельных образований тоже высока, обычно 2-6 эВ, тогда как энергия их миграции составляет всего лишь 0,051 эВ. Объём образования межузельных дефектов обычно составляет 0,6-1,2 Ω [23].

Основные типы кластеров дефектов, генерируемых излучением в металлах ГПУ, включают вакансионные кластеры и межузельные петли.

Нейтронное и электронное облучения индуцируют как вакансионные, так и межузельные петли в Zr. В облучённом тяжелыми ионами криптона с энергией 1 МэВ магнии почти все базальные петли имеют вектор Бюргерса $1/6 \langle 203 \rangle$ и являются межузельными петлями, тогда как призматические петли обоих типов имеют вектор $1/3 \langle 110 \rangle$ [25]. При этом нейтронное облучение Mg формирует дислокационные сетки [3]. Облучение электронным пучком Mg (300 К с 5 дпа) приводит к вакансионным и межузельным петлям с вектором Бюргерса $1/3 \langle 110 \rangle$ и к межузельной петле с вектором $1/6 \langle 203 \rangle$ [26].

Пустоты в облучённых материалах могут иметь различную геометрию, включая гранёные, прямоугольные или сферические формы. Поскольку пустоты являются типичными концентраторами напряжений и значительно

ухудшают вязкость разрушения материалов, набухание пустот представляет серьёзную угрозу их целостности [3].

1.3. Позитронная спектроскопия радиационных дефектов

Известно, что с помощью микроскопической количественной оценки ширины бездефектной зоны, сформированной вдоль границ разделов фаз покрытий, можно измерить эффективность поглощения ими радиационно-индуцированных дефектов. Из таких анализов становится ясно, что не все эти границы разделов демонстрируют одинаковую результативность и что различия могут быть рационализированы на основе различий в их атомных структурах и энергиях взаимодействия с точечными дефектами [9]. Практически во всех работах из обзора выше дефектная структура покрытий изучалась на просвечивающем электронном микроскопе. Этот метод имеет множество недостатков, в числе которых длительность подсчёта и недостаточная точность оценки количества точечных дефектов, непростая подготовка образцов к исследованию и прочее. Также проводилось множество исследований с помощью рентгеновской дифракции, анализу результатов которых препятствует чувствительность метода к изменениям постоянной решётки после облучения материала.

Более мощным методом для обнаружения и характеристики дефектов, вызванных облучением, является позитронная спектроскопия (ПС) благодаря своей уникальной способности зондировать дефекты атомного размера и отличной чувствительности менее 1 миллионной доли. На самом деле, позитронная спектроскопия предлагает намного больше, чем просто обнаружение точечных дефектов. Этот метод даёт возможность исследовать дислокации, одиночные вакансии, малые и большие скопления вакансий вне зависимости от изменения фазы. Его выдающаяся чувствительность позволяет полностью охарактеризовать дефекты с точки зрения размера (0,1-3

нм) и концентрации (для вакансий 10^{-3} - 10^{-6} на атом, для дислокаций 10^{12} - 10^{15} $1/\text{м}^2$) и различать кластеры вакансий от размеров одной вакансии до скопления с 50-100 вакансиями [27,28].

Разработка и усовершенствование защитных материалов для ядерной энергетики требует тщательного понимания механизмов радиационного разрушения. ПС активно используется в выявлении ценной информации о дефектообразовании, накоплении и восстановлении в облучённых материалах без дополнительных манипуляций с образцами [27]. Поэтому далее рассмотрим физические основы метода и его частный случай в виде доплеровского уширения аннигиляционной линии для лучшего понимания способностей спектроскопии.

1.3.1. Физические основы метода

Позитрон (обозначается как e^+) – это античастица электрона и единственная частица-зонд, которая позволяет обнаруживать отдельные атомные вакансии и скопления вакансий, пустоты, индуцированные облучением, внедрённые одиночные частицы и их агломерации, предоставляя информацию об их размере, концентрации и химическом составе [27,28].

Позитрон, проникая в твёрдое тело, теряет свою кинетическую энергию вследствие электронного возбуждения и рассеяния на фононах, так как позитрон положительно заряжен и отталкивается от положительно заряженных остовов решетки. Такое движение происходит до тех пор, пока его энергия не снизится до тепловой энергии $3/2 kT$, соответствующей температуре кристалла. При комнатной температуре эта энергия составляет примерно 0,04 эВ. Это явление называется термализацией, и в металлах оно длится всего 1-5 пикосекунд [29,30].

Термализовавшись, из-за отталкивания положительными ядрами позитрон проникает в межионные промежутки и равномерно распределяется по доступному объёму идеального кристалла в свободном или делокализованном

состоянии. Коэффициент диффузии позитронов при комнатной температуре находится в диапазоне $(1-2) \cdot 10^{-4}$ м²/с. Поэтому диффузионная длина позитрона – глубина, на которую позитрон успевает проникать – для металлов оказывается достаточно большой, в пределах 100–200 нм [27,28,30].

После инжектирования в образец и последующей термализации, позитрон сталкивается с электроном (вероятнее всего, с валентным) и аннигилирует [28]. Аннигиляция двух частиц происходит с испусканием электромагнитного излучения в виде одного (в исключительных случаях), двух или трёх фотонов в зависимости от относительной ориентации спинов позитрона и электрона, а также с образованием позитрония – экзотического атома в виде комплекса e^+e^- .

В двухфотонном случае при столкновении теплового позитрона и электрона оба фотона испускаются в диаметрально противоположные стороны с характерной энергией около 511 кэВ [27]. Об этом случае будет написано чуть более подробно в следующем подразделе.

В зависимости от ориентации спинов позитрона и электрона могут образоваться два основных типа комплекса позитрония: пара-позитроний (спины противоположно направлены, нулевой суммарный спин) и орто-позитроний (спины однонаправлены, суммарный спин равен единице). Различают три типа орто-позитрония, отличающихся магнитными квантовыми числами ± 1 и 0 . Для пара-позитрония магнитное число равно нулю. Поэтому относительный статистический вес орто-позитрония равен $\frac{3}{4}$, парапозитрония – $\frac{1}{4}$. Соответственно орто-позитроний испытывает трёхфотонную аннигиляцию, а пара-позитроний двухфотонную [28].

Обнаружение дефектов позитронами основано на том, что позитроны могут быть захвачены дефектами кристаллической решётки. Различные дефекты материала, такие как одиночные или множественные вакансии, дислокации, границы зёрен, пустоты, изменяют энергетический спектр аннигиляционных фотонов характерными способами, различающимися благодаря распределению импульсов электронов и их концентрациям. Такие дефекты обычно имеют не положительный заряд, как остовы решётки,

отталкивающие позитроны, а нейтральный и отрицательный. Это становится причиной так называемого самонаведения позитронов, последующего захвата его дефектами и окончания пути в виде аннигиляции со свободными электронами [27,31]. Поэтому метод ПА позволяет изучать очень низкие концентрации дефектов и размеры дефектов в нм-масштабе.

Если подводить выше упомянутое с точки зрения квантовой физики, то позитрон, находящийся в состоянии, описываемом функцией Блоха, имеет два пути. Прежде всего, он может продолжать двигаться во внутренние пространства кристаллической решётки под действием отталкивающего потенциала положительно заряженных остовов до тех пор, пока не проаннигилирует с электроном.

Либо, проходя мимо мест, где отсутствуют один или несколько узлов решётки, позитрон захватывается этими дефектными местами, поскольку они создают локальный энергетический минимум для e^+ . Энергия связи позитрона с дефектом определяется глубиной этой потенциальной ямы и равняется величине большей, чем энергия позитрона. Позитрон не может покинуть дефект и реагирует с электроном внутри него [27,28]. Пониженная электронная плотность внутри дефекта вызывает увеличение времени жизни позитронов по сравнению с аннигиляцией в бездефектной решётке [27]. При этом вклад аннигиляции естественным путём замедляющихся позитронов, или аннигиляции на лету, обычно невелик (менее 1%) и оттого не учитывается [32].

Интересно, что рост температуры кристалла тоже приводит к увеличению времени жизни позитронов. Этот эффект объясняется увеличением количества вакансий, внутри которых понижена электронная плотность, отчего позитроны аннигилируют медленнее на 20-80%, чем при поглощении решёткой [32].

Таким образом, получение информации дефектах в кристаллах с помощью позитронной аннигиляции происходит посредством обнаружения фотонов аннигиляции. Что важно сейчас, это даёт возможность понять механизмы накопления радиационно-индуцированных дефектов в материалах, а также влияние структуры вещества, дозы облучения, скорости повреждения,

температуры и наличия примесных веществ на эволюцию дефектов в облучённых материалах [27]. Разные вещества имеют разное сродство к позитрону. За счёт этого методом ПС также можно исследовать частицы примесей, формирование вторичных фаз, если сродство к позитрону матрицы менее предпочтительно, чем к примесям [28].

Позитроны для исследований добываются преимущественно из радиоактивных β^+ -изотопов, которые после бомбардировки протонами в циклотроне могут испускать позитроны в непрерывном широком интервале энергий [32,33,34]. Для увеличения срока обслуживания и более продолжительного использования радиоактивных источников их период полураспада должен быть, по крайней мере, несколько лет, а получение позитрона должно сопровождаться излучением характерной длины гамма-кванта.

Важно отметить, что, независимо от конструкции источника, часть позитронов останется внутри источника и будет аннигилировать, так что конечные сигналы будут содержать вклад источника. Очень часто в качестве источников позитронов используют выпаренный раствор $^{22}\text{NaCl}$, который запечатывают в оболочку из плёнки Каптона (диэлектрическая полимерная плёнка) или металлические фольги [29]. В зависимости от толщины покрывающей плёнки вклад таких источников может варьироваться от 7 до 20% [33,34,35].

Использование моноэнергетических позитронных пучков даёт возможность охарактеризовать дефектную структуру покрытий в зависимости от глубины [36].

Величина энергии вылетающих позитронов определяет глубину их проникновения в материал. Быстрые позитроны, инжектированные из источников ^{22}Na , ^{44}Ti , ^{58}Co с максимальными энергиями 0,54, 1,5 и 0,47 МэВ, способны проникать на глубину до 50 мкм [30]. Медленные позитронные пучки создаются путём замедления быстрых, снижая исходные энергии воздействием различных полей до порядка кэВ. Один из таких методов будет рассмотрен в

следующем разделе. Глубина проникновения медленных позитронов меньше 1 мкм [27].

Для начала исследования источник позитронов фиксируют между двумя частями исследуемого образца, чтобы как можно больше позитронов, испускаемых во всех направлениях, попало в образец [29]. Происходящие процессы в веществе фиксируются с помощью детекторов излучения гамма-квантов [32].

Измерение временных, энергетических и угловых спектров аннигиляционного излучения позволяет извлечь информацию об электронной плотности и электронных состояниях в месте аннигиляции. Различные схемы для получения этих спектров, а также величина диапазона энергий позитронных пучков делят ПС на несколько методов: спектроскопию времени жизни позитронов, позволяющую идентифицировать дефекты открытого объёма и определять их концентрацию; спектроскопию доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ), предоставляющую информацию о локальном химическом окружении дефектов; спектроскопию угловой корреляции аннигиляционного излучения, исследующую электронную структуру; спектроскопию аннигиляции медленных позитронов с переменной энергией (распространённое сокращение с англ. – VEPAS), которая позволяет определить профиль глубины дефекта и измерить длину диффузии позитронов; спектроскопию возраста импульсной корреляции (вольный перевод с англ. age momentum correlation), что позволяет изучать свободные объёмы в полимерах и пористых материалах [27,29].

1.3.2. Спектроскопия доплеровского уширения аннигиляционной линии

Спектроскопия доплеровского уширения построена на одновременном обнаружении двух аннигиляционных гамма-лучей, рассматривая их с учётом законов сохранения энергии и импульса во время аннигиляции позитронов

[29,36]. Из-за особенностей программной обработки сигналов детекторов этот метод также называют спектроскопией доплеровского уширения совпадений.

Позитрон в кристалле окончательно аннигилируется с одним из окружающих электронов, вследствие чего чаще всего излучаются два кванта определённой энергии (см. схему на рис. 1).

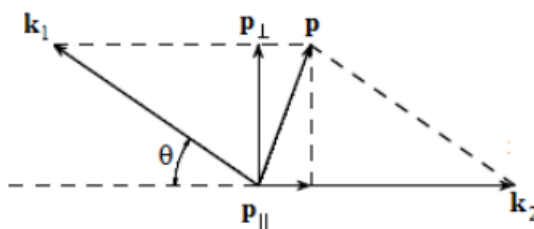


Рисунок 1 – Схема векторов импульсов при двухфотонной аннигилии [37]

В системе центра масс аннигиляционные гамма-лучи летят в строго противоположных направлениях, и энергия каждого луча равна $m_0c^2 = 511$ кэВ, где m_0 – масса покоя электрона, а c – скорость света [29]. При этом выполняются законы сохранения импульса и энергии:

$$k_1 + k_2 = p = m v,$$

$$k_1 c + k_2 c = E = m_0c^2,$$

где E – энергия центра масс пары электрон-позитрон, v – скорость движения пары в лабораторной системе отсчёта, k_1 и k_2 – импульсы аннигиляционных квантов.

Из уравнений следует, что в лабораторной системе отсчёта суммарный импульс и энергия гамма-лучей должны равняться полной энергии и импульсу аннигилирующей пары электрон-позитрон [28]. Если центр масс пары электрон-позитрон в лабораторной системе отсчёта неподвижен ($v = 0$), то оба гамма-кванта разлетятся в противоположных направлениях с одинаковой энергией: $k_1c = k_2c = m_0c^2 = 511$ кэВ.

Однако в реальности, когда центр масс приобретает ненулевую скорость (импульс), то строго противоположное направление лучей не соблюдается, и их энергия отличается от m_0c^2 на величину ΔE . Поскольку позитрон в образце

термализован, то величина ΔE , которую называют доплеровским сдвигом, будет определяться импульсом аннигилирующего нерелятивистского электрона [28,32]:

$$\Delta E = \frac{p_{\parallel} c}{2},$$

где p_{\parallel} – составляющая импульса в направлении распространения фотона, или продольный импульс.

Таким образом, в случае двухфотонной аннигиляции отклонение угла разлёта гамма-квантов от 180° или ненулевой импульс аннигилирующей пары электрон-позитрон приводит к доплеровскому сдвигу энергии аннигиляционного излучения в лабораторной системе отсчёта [29,34,37].

Импульс термализованного позитрона много меньше импульса электрона, так как позитрон в процессе термализации теряет всю свою кинетическую энергию. Отсюда становится ясно, что доплеровский сдвиг излучения ΔE несёт информацию о распределении импульсов аннигилировавших в кристалле электронов. Этот сдвиг вызывает уширение аннигиляционной линии 511 кэВ в энергетическом спектре излучения [27,34].

Энергия гамма-квантов измеряется двумя детекторами из германия высокой чистоты, имеющих энергетическое разрешение линии аннигиляции около 1 кэВ. Одновременность измерения подавляет фоновое излучение примерно на три порядка и позволяет обнаруживать и исследовать редко происходящую аннигиляцию с внутренними электронами, которые не подвержены воздействию поля кристалла и потому не искажают идентичность своего химического элемента [27,29].

Измеренная энергия аннигиляционных гамма-квантов равна $(511 \pm \Delta E)$ кэВ. Сумма этих энергий определяет энергетическое разрешение спектрометра, а разность энергий – это просто удвоенный доплеровский сдвиг [27].

В зависимости от начальной энергии позитроны инжектируются в материал с определённым энергетическим диапазоном, которое можно описать распределением Махова. После замедления до тепловых энергий позитроны

диффундируют внутри кристалла, пока не оказываются захваченными дефектами, чтобы после аннигилировать [36]. Типичное отображение распределения энергий после аннигиляции вокруг максимума в 511 кэВ представлено на рисунке 2 на примере чистого и наводороженного титана.

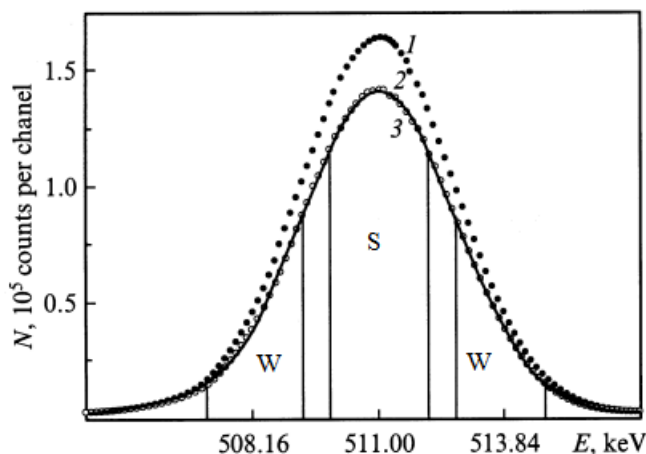


Рисунок 2 – Пример энергетического спектра ДУАЛ чистого α -титана (линия 1) и наводороженного в течение 120 (линия 2) и 360 (линия 3) минут [38]

Для анализа спектра используют параметры на основе очертания формы энергетического распределения – S (форма максимума) и W (форма крыла). Параметр S определяется как отношение количества событий (аннигиляции) в центральной области максимума распределения к количеству всех событий, а W – как отношение событий в боковых областях к общему количеству событий. Если полученный график имеет узкую форму спектра, то есть параметр S относительно низкий, то это означает, что аннигиляция происходит преимущественно на валентных электронах. В ином случае, когда график имеет широкий максимум и, соответственно, высокий параметр S, то позитрон аннигилирует с основным электроном. Таким образом, величина S пропорциональна числу позитронов, аннигилированных валентными электронами, а величина W – аннигилированных электронами остова [27,39].

Позитроны, локализованные в дефектах вакансионного типа, с высокой вероятностью аннигилируют с валентными электронами, поэтому рост параметра S , снижение W и уширение спектра ДУАЛ является показателем увеличения содержания дефектов в кристалле [27,34,39]. Параметры формы спектра не способны прямо рассказать о размере дефектов, однако из графика зависимости $S-W$ можно спрогнозировать некоторую качественную информацию об изменении их структуры.

Абсолютные значения S и W параметров не имеет смысла сравнивать, особенно если они получены на разных спектрометрах, по причине их сильной зависимости от энергетического разрешения спектрометра [27]. В то же время, нормировка параметров относительно бездефектных образцов делает возможным сравнение результатов различных образцов на любых экспериментальных установках [32]. Это особенно подходит для экспериментов, где образцы подвергаются различным упрочняющим или размягчающим воздействиям.

Также для анализа предлагается параметр R , который рассчитывается как отношение приращения S -параметра к приращению, или наклон графика зависимости $S(W)$. Изменение наклона этого графика определяет тип преобладающих дефектов, где аннигилируют позитроны, так как параметры S и W чувствительны к концентрации и типу дефектов.

Другой способ нахождения параметра R основывается на его вычислении по формуле:

$$R = \frac{S_d - S_b}{W_b - W_d},$$

где S_b , W_b – параметры ДУАЛ, характеризующие позитроны, которые прореагировали с электронами в бездефектной части образца, а S_d и W_d , — параметры, связанные с аннигиляцией захваченных дефектами позитронов. Этот способ не зависит от концентрации дефектов, а определяется лишь их типом [39].

Позитронная спектроскопия дефектов пучками медленных позитронов с переменной энергией была впервые реализована в 1980-х годах, что позволило исследовать приповерхностный слой, простые и многослойные покрытия. Низкоэнергетический позитронный пучок перестраиваемой энергии в диапазоне 0-30 кэВ обеспечил изучение с глубинным разрешением для дефектов на глубине до 1 мкм от поверхности.

Обнаружение квантов аннигиляции и обработка сигналов для ПС с переменной энергией аналогичны обычному методу ДУАЛ. Разница между ними заключается в том, что во втором случае регистрируется только один спектр 511 кэВ, из которого единожды извлекаются S- и W-параметры, в то время как в первом случае спектр регистрируется при каждой энергии пучка позитронов. На основе этих полученных данных строятся графики зависимостей параметров S и W от каждой энергии позитронных лучей. Таким образом, этот метод позволяет исследовать глубину дефектов и вычислять длину диффузии позитронов [27].

В 1983 году было проведено первое исследование радиационных повреждений, вызванных облучением He, для нержавеющей стали SS316, облучённой ионами гелия с энергией 28 МэВ. Это показало перспективность использования позитронов при оценке эволюции поведения гелия в материале. Позже анализ спектров сплава Fe-9Cr, при комнатной температуре облучённых ионами гелия с 20 кэВ, показал, что идентифицировать He можно только по кривой графика S(W), полученной ПС пучком позитронов с медленной энергией [27].

После изучения аннигиляционных спектров облучённого ионами гелия вольфрамового покрытия был прослежен механизм высокой радиационной стойкости его наноканальных структур. Наличие наноканалов увеличивает объёмную долю поверхностей в покрытии, что создаёт высокую плотность стоков для дефектов и снижает глубину проникновения ионам гелия, отчего газ легче покидает покрытие.

Для понимания различия дефектов, полученных от воздействия облучения благородными газами, вольфрам облучали ионами гелия и неона, а затем проводили отжиг полученных образцов в диапазоне температур от 20 до 990°C. Выяснилось, что большая часть скоплений вакансий в образцах, облучённых Ne, самовосстановилась после отжига при 900°C. В то время как эти же скопления в образцах, облучённых неоном, проявляли устойчивость даже после отжига при 990°C. Эта разница объяснялась отличными размерами кластеров вакансий, создаваемых Ne, по сравнению с He [27].

Облучённый ионами водорода с энергией 200 кэВ монокристалл вольфрама был исследован с помощью метода ДУАЛ. Энергия падающего позитрона изменялась в диапазоне 0,5-25 кэВ, что соответствует средней глубине проникновения водорода в вольфрам в диапазоне 0,7-360 нм [40]. График $S(W)$ показал, что точки, принадлежащие исходным и отожжённым при 500-600 К образцам, лежат на одной линии, что означает присутствие одинаковых дефектов (предположительно одиночных вакансий). Это показывает, что природа дефектов существенно не менялась в этом диапазоне температур. Изменяющийся угол наклона линий в отожжённых при более высоких температурах образцах указывают на аннигиляцию позитронов при кластерах вакансий среднего и большого размера [27].

Интересно, что изучение многослойных покрытий методом ПС имеет отличительные особенности. Сродство к позитрону различных металлов и их модификаций, из которых создаются многослойные и многокомпонентные покрытия, различно. Из-за этого факта позитроны обычно ограничиваются одним типом металлов. Другими словами, позитроны захватываются наиболее привлекательным металлическим слоем, а не границами раздела, отчего они становятся невидимыми для позитронов [31].

В работе [31] пучками медленных позитронов в диапазоне энергий от 0,1 до 30 кэВ были исследованы покрытия, состоящие из чистого серебра, ванадия и системы Ag/V. Анализ графика $S(E)$ для покрытия из чистого Ag позволяет понять, что с увеличением энергии позитроны могут последовательно

обнаруживать поверхность, слой серебра и материал подложки. Это означает, что область, отобранная медленными позитронами, может быть разделена на несколько слоёв. Учитывая широкий профиль имплантации, позитроны со специфической энергией могут выбрать определённые слои для окончательной аннигиляции. Параметры S и W , измеренные в многослойных покрытиях V/Ag , были очень близки к параметрам, измеренным в покрытии из чистого Ag . Это позволяет предположить, что позитроны предпочитают попадать в слои Ag и что серебро обладает более сильным сродством к позитронам, чем ванадий.

Многослойные покрытия системы Zr/Nb , облучённых ионами водорода с энергией 900 кэВ, исследовались с использованием спектроскопии доплеровского уширения с пучком позитронов переменной энергии. Для исходных образцов, на первый взгляд, результаты показали, что за счёт повышенного сродства циркония к позитронам (на 26% больше, чем у ниобия) основная масса аннигиляций происходит в его слоях. Однако дальнейшие рассуждения привели к тому, что это поведение следует отнести к смешанному состоянию. Анализ образцов, облучённых водородом в течение 30 мин, предполагает, что относительные изменения параметров S и W (увеличение S -параметра и снижение W) означают уменьшение свободного объёма в покрытии (причём в слое циркония эти изменения более выражены) аналогично образованию водородно-вакансионных комплексов в материалах с ГПУ-структурой. Тем не менее, это не указывает на увеличение концентрации дефектов после облучения, поскольку до и после облучения позитроны схоже аннигилируют вблизи границ раздела [й].

Все озвученные примеры наглядно демонстрируют важность ПС при исследовании дефектной структуры облучённых материалов, в особенности, наноразмерных металлических многослойных покрытий. Этот неразрушающий и многогранный в своём анализе метод является отличной альтернативой и дополнением к прочим методам, которые более трудоёмки для применения.

Глава 2. Материалы и методы исследования

2.1. Нанесение наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb

Наноразмерные металлические многослойные покрытия выращивались посредством метода магнетронного распыления с постоянным током в установке на базе вакуумного насоса Shimadzu. Осаждение происходило на предварительно очищенную пластину монокристалла кремния с преимущественной ориентацией плоскостей (100) с попеременным распылением металлических мишеней из циркониевого сплава Э100 и ниобиевого сплава НБ 1-0. Давление в камере во время процесса осаждения с учётом атмосферы аргона особой чистоты поддерживалось на уровне 0,5 Па.

Компоненты многослойного покрытия имеют одинаковую толщину каждого слоя около 100 нм с погрешностью в 10 нм. Общая толщина покрытия составила $1 \pm 0,1$ мкм.

Отсутствие нагрева подложки во время эксперимента гарантировало использование термопары, контролирующей изменения температуры.

2.2. Облучение протонами

В ядерных реакторах структурные элементы находятся под воздействием потоков ионов гелия, нейтронов и протонов. Научные эксперименты с нейтронным облучением являются длительными, дорогостоящими и небезопасными. Чтобы избежать этих проблем, в работе проводились испытания с облучением протонами и ионами гелия.

Параметры процесса протонного облучения многослойного покрытия:

НММП системы Zr/Nb облучались пучком протонов с энергией 1750 кэВ посредством линейного электростатического ускорителя ЭСГ-2,5 МэВ. Для

замедления и достижения такой энергии протонов кремниевые пластинки ограждались фольгой из алюминия толщиной около 33 мкм. Облучение протонами происходило 15, 30 и 120 минут для достижения доз $3,4 \cdot 10^{15}$ ионов/см², $8,6 \cdot 10^{15}$ ионов/см² и $3,4 \cdot 10^{16}$ ионов/см² соответственно при плотности ионного тока 2 и 4 мкА/ см².

После облучения многослойных покрытий, толщина которых меньше длины пробега протонов – 10,6 см, в образцах основную часть радиационных дефектов обычно составляют отдельно расположенные вакансии. В некоторых случаях в результате высокоэнергетических взаимодействий протоны могут осуществить рассеяние на большой угол, оставляя за собой кластеры вакансий. То есть, в покрытиях остаются одиночные скопления вакансий – вакансионных ядер – посреди множества отдельных вакансий. Эти скопления обычно появляются после воздействия быстрых нейтронов, поэтому облучение протонами часто используют для имитации последствий их воздействия.

Вокруг вакансионных ядер всегда существует градиент этих точечных дефектов, что инициирует распространение вакансий в обеднённые ими области. При наличии в веществе примесей после образования скоплений вакансий эти чужеродные частицы проворно удаляются за пределы вакансионных ядер. В таком случае, возможно взаимодействие межузельных примесей с отдельными вакансиями и их рекомбинация. Тогда с уменьшением количества примесей вакансии внутри ядра начинают образовывать двойные, тройные комплексы – ди- или тривакансии.

В объёмном материале или в покрытиях, толщина которых больше длины пробега, на расстоянии этого пробега облучение приводит к стремительному увеличению количества дефектов, поскольку протоны оккупируют свободные электроны в рассмотрении модели твёрдых шаров. С другой стороны, при ином взаимодействии протонов с электронами в этих местах начинает скапливаться водород [16].

2.3. Облучение ионами гелия

Облучение НММП Zr/Nb ионами гелия с энергией 25 кэВ было проведено с помощью плазменного источника ионов с ненакаливаемым (холодным) катодом "ПИОН-1М". Плотность ионного тока при облучении составляла 0,23 мА/см², что соответствовало потоку ионов, равном $1,44 \cdot 10^{15}$ ионов/см²·с. Время облучения было подобрано таким образом, чтобы обеспечить дозу облучения в 10^{16} , 10^{17} и 10^{18} ионов/см².

Во время процесса температура образцов контролировалась пирометром и не превышала 200°С.

Облучение ионами гелия обычно вызывает высокую плотность точечных дефектов (вакансии и межузельные дефекты), и в зависимости от энергии облучения и температуры эти дефекты могут перерасти в более крупные (дислокационные петли, дефекты укладки, полости) [10,11]. Из-за взаимодействия ионов гелия с этими дефектами могут образовываться пузырьки He (дефекты шарообразной формы на поверхности материалов) [11,42].

Растворимость гелия в металлах очень низкая. Таким образом, при относительно низких концентрациях внедрённого He легко образуются скопления вакансий гелия, которые тоже становятся центром образования пузырьков. После зародышеобразования, чтобы поддерживать механическое равновесие между давлением газа и напряжением спекания, пузырьки растут за счёт поглощения атомов He и вакансий, индуцированных излучением [10].

Пузырьки He вносят значительные искажения в кристаллическую структуру. Кроме того, под действием давления изнутри пузырьков они вызывают растягивающее напряжение, приводящее к большему расширению кристаллической решетки [6]. Поэтому длительное облучение представляет большую угрозу, способную подрвать безопасность ядерных реакторов [11]. Особенно страдают механические свойства металлов; происходит увеличение предела текучести и значительная потеря пластичности (охрупчивание) [10].

В наноразмерных многослойных средах наличие границ раздела действует как эффективный поглотитель для точечных дефектов излучения, которые могут существенно влиять на зарождение и рост скоплений газовых пузырьков [42]. Таким образом, некогерентные границы раздела удаляют радиационно-индуцированные дефекты и захватывают атомы He, что в итоге приводит к уменьшению концентрации гелия в пузырьках [6].

2.4. Послойный анализ дефектов с применением пучков позитронов переменной энергии

2.4.1. Позитронная спектроскопия дефектов, индуцированных протонным облучением

Облучённые протонами образцы исследовались на установке, основанной на линейном ускорителе LEPTA.

Установка на позитронных пучках с переменной энергией на основе линейного ускорителя LEPTA (Low Energy Positron Toroidal Accumulator) находится в городе Дубна, ОИЯИ, лаборатории ядерных проблем. Данная установка (см. рис. 3) состоит из инжектора позитронов (см. рис. 3, п. 1, 2, 3) и накопительного кольца.

Накопительная часть с периметром 17,2 м охлаждается электронной системой за счёт рекомбинации электронов с позитронами и генерирования атомов позитрония.

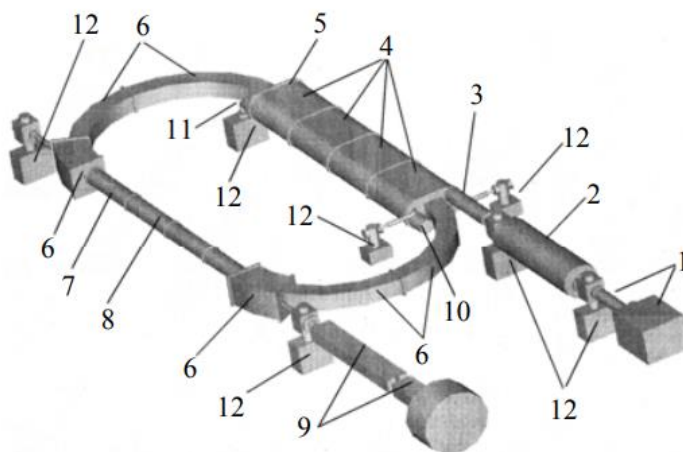


Рисунок 3 – Общий вид установки на базе ЛЕРТА: 1 – источник позитронов, 2 – позитронная ловушка, 3 – транспортировочный канал, 4 – соленоид прямоугольного сечения, 5 – импульсный электрический кикер, 6 – соленоиды в форме тора, 7 – спиральный квадруполь, 8 – прямолинейная секция, 9 – экспериментальный канал, 10 – электронная пушка, 11 – коллектор электронов охлаждающей системы, 12 – вакуумные насосы [43].

Расположение соленоидов по всей окружности накопителя обеспечивает фокусировку пучков позитронов с энергией 10 кэВ продольным магнитным полем величиной 400 Гс. Прохождение позитронами одного круга установки осуществляется с помощью кикера 5, расположенного внутри соленоида 4, а продолжительная циркуляция пучков регулируется спиральным квадруполем 7, находящимся в прямолинейной секции 8 (см. рис. 3) [43].

На рисунке 4 изображена схема инжектора позитронов.

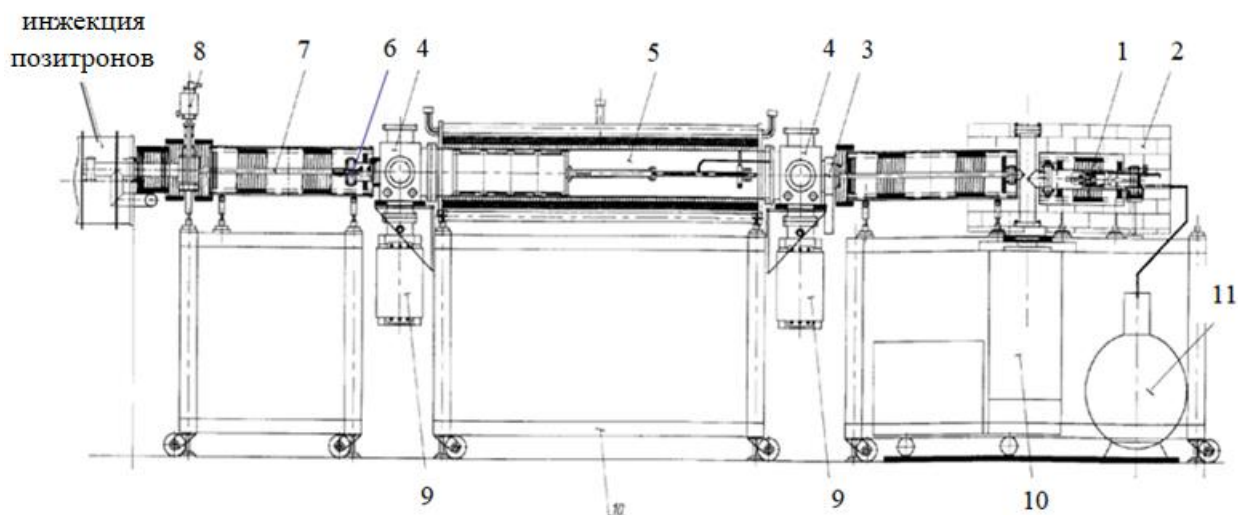


Рисунок 4 – Схема импульсного инжектора позитронов, где 1 – источник позитронов ^{22}Na , 2 – радиационная защита, 3 – шибберная задвижка, 4 – вакуумный откачной пост, 5 – позитронная ловушка, 6 – проходной изолятор, 7 – область инжекции позитронов в накопитель, 8 – быстрая шибберная задвижка, 9 – магниторазрядный насос, 10 – турбомолекулярный насос, 11 – сосуд Дьюара с неоном [44].

Импульсный инжектор позитронов состоит из источника позитронов в виде радиоизотопа ^{22}Na (см. рис. 4, п. 1) и ловушки пенинговского типа (устройства для хранения заряженных частиц с использованием комбинации однородного осевого магнитного поля и неоднородного квадрупольного электрического поля [45]) для предварительного накопления позитронов [44]. Также инжектор можно разделить на четыре условные части: КРИММП, канал транспортировки, позитронной ловушки и области вывода позитронов.

Криогенный источник медленных монохроматических позитронов (КРИММП) является ключевым элементом инжектора медленных позитронов. Высокоэнергичные позитроны, испускаемые из защищённого радиационной защитой 2 источника 1 (см. рис. 4), после распада изотопа ^{22}Na попадают в криогенный замедлитель, питающийся от сосуда Дьюара 11.

В качестве замедлителя на установке в работе [46] был выбран твёрдый неон. Он замедлял позитроны, которые изначально испускались из источника с

широким энергетическим спектром с максимумом энергии около 200 кэВ. Чем толще слой замедлителя, тем больше позитронов выйдет с необходимой энергией. Максимум выхода медленных позитронов соответствует толщине замедлителя 130 мкм при среднем потоке $5 \cdot 10^6 - 10^7$ позитронов/с.

Затем пучок позитронов через канал транспортировки, состоящий из откачного поста 4 с подсоединённым к нему магниторазрядным насосом 9 и шибберной задвижки, попадает в ловушку позитронов. Сама ловушка представляет собой расположенную внутри соленоида с магнитной индукцией до 1500 Гс цилиндрическую камеру длиной 2 м и внутренним диаметром 250 мм. Магнитное поле удерживает позитроны в поперечном направлении, а электростатическое поле электродов – в продольном. Позитроны захватываются в ловушку и охлаждаются за счёт неупругих столкновений с молекулами азота, чтобы затем импульсно внедрять в накопительную (основную) часть установки через задвижку 8. Импульсное ускорение частиц осуществляется статическим электрическим полем с потенциалом 1–10 кВ в зазоре проходного изолятора 6 (см. рис. 4) [44].

2.4.2. Позитронная спектроскопия радиационных дефектов, индуцированных облучением ионами гелия

Облучённые ионами гелия образцы исследовались на установке под названием SPONSOR (The Slow-Positron System of Rossendorf).

Установка SPONSOR, расположенная в центре имени Гельмгольца в Дрездене, Германия, – это прибор для исследования материалов с использованием доплеровского уширения аннигиляционной линии медленных позитронов. Схематическое изображение установки показано на рисунке 5.

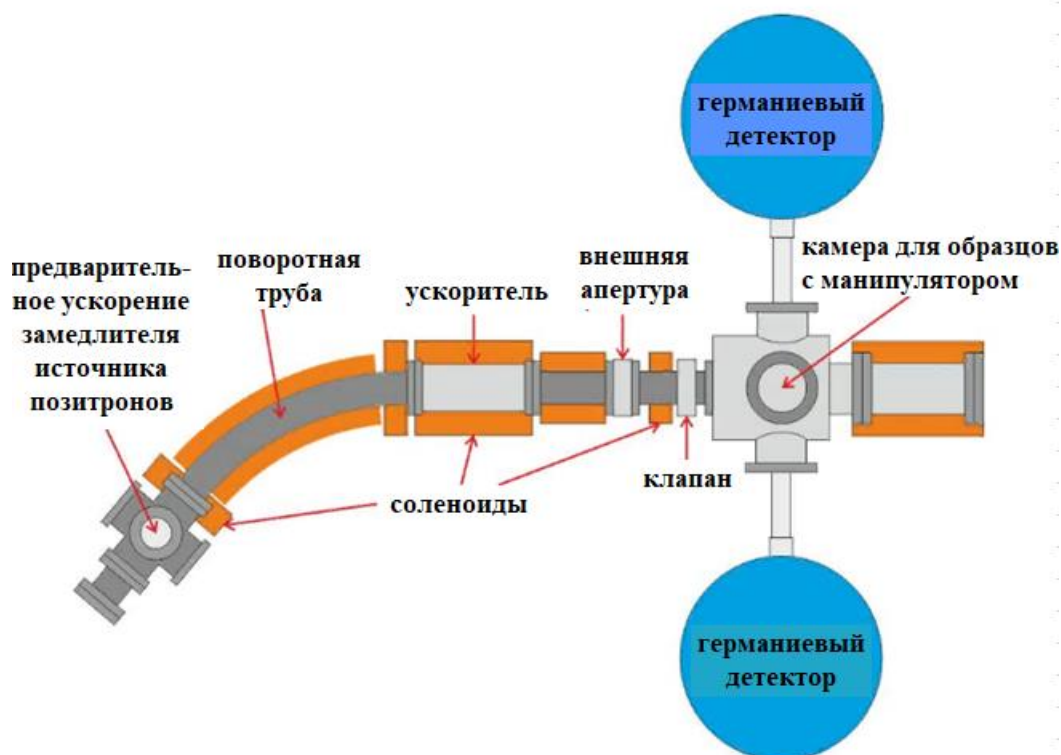


Рисунок 5 – Схема моноэнергетической позитронно-лучевой системы SPONSOR [47]

Пучки позитронов диаметром около 4 мм генерируются за счёт β^+ -распадов радиоактивного изотопа ^{22}Na и замедляются с помощью вольфрамовой фольги. Управление частицами происходит посредством магнитного поля соленоидов (см. рис. 5). После моноэнергетические позитроны ускоряются к образцу с типичными энергиями в диапазоне от 30 эВ до примерно 36 кэВ. Полученные от аннигиляции в веществе гамма-кванты регистрируются двумя детекторами из особо чистого германия, которые располагаются с двух сторон от камеры с образцами. Разрешение зафиксированной энергии аннигиляции составляет $1,09 \pm 0,01$ кэВ (при 511 кэВ) [47].

Собранные результаты исследования анализировались через программное обеспечение SP-11, в котором на построенных спектрах ДУАЛ определялись S и W параметры. Оценка относительного изменения этих параметров до и после облучения S/S_0 и W/W_0 позволила проанализировать влияние дозы облучения на дефектную структуру многослойного покрытия.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Коммерческая привлекательность научного исследования определяется многими характеристиками: улучшенными техническими параметрами, будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и так далее.

В данной работе было рассмотрено влияние облучения на структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb. Данное исследование является достаточно перспективным для применения в будущем. Поэтому цель главы 4 – оценка конкурентоспособности технологии в отношении финансового планирования, ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Для выполнения цели необходимо поэтапно выполнить следующие задачи:

- 1) Определить возможные альтернативы проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- 2) Спланировать научно-исследовательские работы;
- 3) Показать финансовую, бюджетную, ресурсосберегающую, социальную и экономическую эффективности исследования.

4.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определёнными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определённый товар. Можно применять географический, демографический, поведенческий, иные критерии сегментирования рынка потребителей или их комбинации.

Поскольку наноразмерные металлические многослойные покрытия Zr/Nb обладают наилучшей радиационной стойкостью среди подобных покрытий, то потенциальными потребителями готовой продукции будут являться производители реакторов термоядерного синтеза различных конфигураций и аэрокосмическая промышленность.

4.2. Анализ конкурентных технических решений

Для успешного выхода на рынок необходимо проводить систематический анализ конкурирующих товаров, поскольку с течением времени постоянно прибывают всё более новые разработки. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Результатом анализа конкурирующих товаров, являются важные коррективы и поправки, вносимые в научное исследование, с целью постоянного повышения спроса и преимущества на рынке.

Рассматривая данный анализ со стороны ресурсоэффективности и ресурсосбережения, следует ряд оценок сравнительной эффективности научной разработки и определение ее развития и конкурентоспособности в будущем.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Для выполнения данного анализа учётом технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации радиационно-стойких покрытий воспользуемся оценочной картой, приведённой в таблице 1.

В качестве конкурентов рассматривались нитридные высокоэнтропийные многослойные покрытия TiNbZrTaN/CrFeCoNiN (K1) и когерентные наноразмерные многослойные покрытия Ag/Ni (K2).

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путём, в сумме должны составлять 1.

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		БФ	БК1	БК2	КФ	КК1	КК2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1) Простота получения покрытия	0,1	4	2	4	0,4	0,2	0,4
2) Радиационная стойкость	0,3	4	4	3	0,4	0,4	0,3
3) Адгезионная прочность	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
4) Термоустойчивость	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
5) Возможность создания сложных геометрических форм	0,02	3	2	3	0,3	0,2	0,3
6) Безопасность технологии получения	0,2	3	3	3	0,3	0,3	0,3

7) Простота эксплуатации	0,02	5	5	5	0,5	0,5	0,5
8) Энергоэкономичность	0,03	4	3	4	0,4	0,3	0,4
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1) Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
2) Предполагаемый срок эксплуатации	0,03	3	3	3	0,3	0,3	0,3
Итого баллы:					3,9	3,5	3,6

Итоги, показанные в оценочной карте сравнения конкурентных технических разработок, позволяют сделать вывод, что наноразмерное металлическое многослойное покрытие системы Zr/Nb превосходит своих конкурентов по многим критериям, в частности, по простоте способа нанесения, термоустойчивости, радиационной стойкости и другие. Это показывает преимущество системы на фоне нитридных высокоэнтропийных покрытий и НММП системы Ag/Ni при привлечении партнёров и инвесторов.

4.3 SWOT-анализ

Матрица SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для анализа внешних и внутренних факторов, влияющих на осуществление проекта.

Вначале определяют сильные стороны (технологические преимущества, выдающиеся характеристики готового продукта) и слабые стороны (ограничения, недостатки, которые нужно улучшить) реализованного проекта.

Далее выявляют возможности проекта, которые включают в себя все предпочтительные ситуации изменяющегося мира в сфере технологий, рыночных отношений (неудовлетворяющиеся потребности покупателей), правительства и тому подобное.

Следующим этапом является выявление угроз для проекта, которые включают в себя все неблагоприятные для проекта ситуации: деятельность

конкурентов, устаревание технологий, несовершенство оборудования, неблагоприятные экономические и политические изменения.

Таблица 2 – SWOT-анализ научно-исследовательского проекта

	<p>Сильные стороны: С1. Простота и распространённость метода нанесения; С2. Некогерентные системы имеют лучшую радиационную стойкость, чем когерентные; С3. Наиболее ресурсоэффективный метод радиационной защиты; С4. Получение качественного разделения некогерентных слоёв.</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Находится на стадии разработки; Сл2. Выявлена лишь часть характеристик покрытия, влияющих на аннигиляцию дефектов; Сл3. Не изучены полностью все структурные механизмы поведения радиационно-индуцированных повреждений; Сл4. Дорогостоящее оборудование.</p>
<p>Возможности: В1. Повышение срока эксплуатации оборудования с покрытием; В2. Изучение влияния новых факторов; В3. Появление дополнительного спроса на продукт; В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>С1. Эта сильная сторона позволит сделать исследуемое покрытие наиболее распространённым решением, а с изучением влияния новых факторов появится новый, более усовершенствованный продукт, на который появится дополнительный спрос. С2. Некогерентные НММП Zr/Nb по сравнению с когерентными лучше повышают срок эксплуатации оборудования за счёт своих свойств. Благодаря похожим формам зависимостей их свойств, если исследователи когерентных покрытий повысят стоимость своих разработок после изучения влияния новых факторов, то эти разработки можно использовать и применительно к некогерентным покрытиям. С3. Изучение новых факторов может позволить сделать метод нанесения более ресурсоэффективным и увеличить срок эксплуатации. С4. Отсутствие размытия границ слоёв сильно повысит срок эксплуатации</p>	<p>Сл1. Нахождение на стадии разработки позволит повысить срок эксплуатации оборудования, особенно с изучением новых факторов, но не позволит получить преимущества от дополнительного спроса и повышения стоимости у конкурентов. Сл2, Сл3. Эти слабости не позволят дополнительно повысить срок эксплуатации оборудования и как-то среагировать на повышение стоимости у конкурентов, однако откроют новые возможности исследованиям влияния новых факторов. Сл4. Высокая стоимость оборудования для нанесения покрытия может обеспечить дополнительный спрос на продукт за счёт уверенней соответствия качества-цены, а также, возможно, сыграть на возможности В4.</p>

	оборудования, упростит исследование новых факторов влияния	
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства; У2. Появление нового конкурента; У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции; У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования.</p>	<p>С1. Простота и распространённость метода нанесения имеет силу, если он не оптимизирован у конкурента, да даст упасть при У4 и позволит легко его модифицировать, если изменятся государственные требования. С2. Отличия от когерентных систем, возможно, позволят держаться, пока не найдётся способ получше обойти нового конкурента. С3. Ресурсоэффективность метода может помочь мягко обойти прерывание финансирования проекта, временное отсутствия спроса на новые технологии и даст этой способностью возможность обойти нового конкурента перед знающими инвесторами/покупателями. С4. Качественное разделение слоёв покрытия позволит частично нивелировать влияние появления конкурента и дополнительных требований на скорость вывода продукции на рынок.</p>	<p>Сл1, Сл2, Сл 3. Нахождение на стадии разработки и остальные слабости не помогут никак повлиять на отсутствие спроса, к тому же исследование может надолго прерваться из-за отсутствия финансирования. Но зато поможет подготовиться к изменениям процессов сертифицирования. Сл2, Сл3. Эти не до конца изученные вещи, вдобавок к предыдущему влиянию на угрозы, могут позволить опередить успех нового конкурента. Сл4. Высокая стоимость оборудования может лишь снизить интерес к новым технологиям, повысить вероятность достижения успеха у конкурентов, никак не поможет при введении дополнительных требований и значительно ухудшит ситуацию с отсутствием финансирования при серьёзных поломках оборудования.</p>

На последнем этапе проводится заполнение интерактивной таблицы распределением наиболее коррелирующих сильных и слабых сторон и возможностям и угрозам. Это помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегии развития.

Каждый фактор помечается либо знаком "+" (означает сильное соответствие сторон), либо знаком "-" (что означает слабое соответствие); "0" – если есть сомнения в том, что поставить "+" или "-".

Таблица 3 – Интерактивная матрица

Возможности проекта/Угрозы проекта										
		B1	B2	B3	B4		У1	У2	У3	У4
Сильные стороны	С1	+	+	+	0		-	+	+	+
	С2	+	+	+	+		-	+	-	-
	С3	0	+	+	0		+	+	0	+
	С4	+	+	0	0		-	+	+	-
Возможности проекта/Угрозы проекта										
Слабые стороны	Сл1	-	+	+	+		-	-	+	+
	Сл2	+	+	0	-		-	0	+	+
	Сл3	+	+	0	-		-	0	+	+
	Сл4	0	-	+	0		+	+	-	+

4.4 Планирование научно-исследовательских работ

4.4.1 Определение трудоёмкости выполнения работ

Главным фактором отражения основной части стоимости научной разработки являются трудовые зарплаты. Исходя из этого, важным моментом является определение трудоёмкости работ каждого из участников научного исследования.

Для оценки трудоёмкости выполнения научного исследования выпускной квалификационной работы используют экспертный путь, определяемый человеко-днями. Для определения ожидаемого значения трудоёмкости используют следующее соотношение:

$$t_{ож.і} = \frac{3t_{\min і} + 2t_{\max і}}{5},$$

где $t_{ож.і}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

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

$t_{\max і}$ – максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоёмкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

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

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

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

4.4.2. Разработка графика проведения научного исследования

Для проведения научного исследования, представленного в выпускной квалификационной работе, выбирают специальную узко направленную научную тему. Для этого строится специальный ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для построения графика необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

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:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

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

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

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

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Рассчитаем коэффициент календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

Сведём рассчитанные значения в таблицу 4.

Таблица 4 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min}	t_{max}	$t_{ож.г}$			
	чел-дни	чел-дни	чел-дни			
Составление технического задания	1	5	2,6	Научный руководитель	2,6	3,85
Выбор направления исследования	1	7	3,4	Научный руководитель, инженер	1,7	2,52
Изучение литературы	45	60	51	Инженер	51	75,48
Изготовление опытного образца	2	6	3,6	Научный руководитель, инженер	1,8	2,66
Выполнение экспериментальных исследований	14	30	20,4	Научный руководитель, инженер	10,2	15,1
Оформление отчёта по НИР	30	45	36	Инженер	36	53,28
Итого	93	153	117		103,3	152,88

Далее на основе приведённых в таблице 4 данных построим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и

декадам за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделяются различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 5 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме "Влияние облучения протонами и ионами гелия на дефектную структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb"

Название работы	Исполнители	T_{ki}	Продолжительность выполнения работ														
			февр		март			апр			май						
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
Составление технического задания	Научный руководитель	3,85	■														
Выбор направления исследования	Научный руководитель, инженер	2,52	■	▨													
Изучение литературы	Инженер	75,48	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
Изготовление опытного образца	Научный руководитель, инженер	2,66			▨	▨											
Выполнение экспериментальных исследований	Научный руководитель, инженер	15,1				▨	▨	▨									
Оформление отчёта по НИР	Инженер	53,28							▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨

Научный руководитель  Инженер (студент) 

4.5. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- 1) материальные затраты НТИ;
- 2) затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;

- 3) основная заработная плата исполнителей темы;
- 4) дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- 5) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 6) контрагентные затраты;
- 7) накладные расходы.

4.5.1. Расчёт материальных затрат НИИ

Расчёт материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырьё и материалы;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырьё и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий.

В таблице 6 перечислены все затраты на приобретение используемых сырья и материалов

Таблица 6 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Монокристалл кремния (100) диаметром $d = 100$ мм	шт	2	120	240
Мишень из циркониевого сплава Э100	кг	1	7 500	7 500

Продолжение таблицы 6				
Мишень из ниобиевого сплава НБ 1-0	кг	1	12 500	12 500
Баллон аргона особой чистоты	шт	1	8 800	8 800
Всего за материалы				29 040
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1 452
Итого				30 429

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

Под возвратными отходами производства понимаются остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, теплоносителей и других видов материальных ресурсов, образовавшихся в процессе производства научно-технической продукции, утратившие полностью или частично потребительские качества исходного ресурса и в силу этого используемые с повышенными затратами (понижением выхода продукции) или вовсе не используемые по прямому назначению.

4.5.2. Расчёт затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по теме.

В данной работе использовалось уже имеющееся оборудование, и закупка специального оборудования не производилась. Соответственно, затраты на специальное оборудование отсутствуют. Однако в ходе эксплуатации основного оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями.

Амортизация специального оборудования определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{C}{365 \cdot СПИ},$$

где A – сумма амортизации за месяц;

C – первоначальная или восстановительная стоимость объекта (основная сумма);

СПИ – срок полезного использования объекта в годах.

Тогда сумма амортизации за 2 дня эксплуатации установки на базе вакуумного насоса Shimadzu со сроком полезного использования 15 лет и первоначальной стоимостью 14 800 тыс. руб.

$$A = \frac{C}{365 \cdot СПИ} \cdot 2 = \frac{14800}{365 \cdot 15} \cdot 2 \approx 2,7 \text{ (тыс.руб.)}$$

Данная формула используется при расчёте амортизации основных средств, является одним из его видов и носит название линейный. Необходимо заметить, что амортизация была определена для объектов с суммой свыше 40 тыс. руб.

4.5.3. Основная заработная плата исполнителей темы

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работе.

Для расчета основной заработной платы необходимо сформировать баланс рабочего времени, приведённого в таблице 7.

Таблица 7 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	
Количество нерабочих дней	118	118
- выходные дни	104	104
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени	24	31
- отпуск	24	24
- невыходы по болезни	-	7
Действительный годовой фонд рабочего времени	223 пересчитайте	216

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 4);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

- при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 7).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p,$$

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

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

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{тс}$);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке. Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 8.

Таблица 8 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Разряд	k_t	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	К-т т.н.	1	37700	0,3	0,3	1,3	78416	3769	16,3	31434,7
Инженер	студент	1	19200	0,3	0,3	1,3	39936	1864	100,7	187704,8
Итого										249139,5

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда.

4.5.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таблица 9 – Дополнительная заработная плата исполнителя темы

Исполнитель темы	$Z_{\text{осн}}$, руб.	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{доп}}$, руб.
Руководитель	31434,7	0,15	9 215,21
Студент	187704,8	0,15	28 155,72
		Итого	37 370,93

4.5.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды является обязательным фактором, согласно законодательству Российской Федерации, нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

На 2014 г. в соответствии с Федеральном закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1% [Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ "О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования"].

Для расчёта отчислений во внебюджетные фонды воспользуемся формулой:

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

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, равный 27,1% для образовательных учреждений.

Таблица 10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	З _{осн} , руб.	З _{доп} , руб.	к _{внеб} , руб.	З _{внеб} , руб.
Руководитель	31434,7	9 215,21	0,271	19 146,13
Инженер	187704,8	28 155,72	0,271	58 498,2
Итого				77 644,33

4.5.6. Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ сторонними организациями (контрагентами, субподрядчиками), в том числе:

1) Работы и услуги производственного характера, выполняемые сторонними предприятиями и организациями. К работам и услугам производственного характера относятся:

- выполнение отдельных операций по изготовлению продукции, обработке сырья и материалов;
- проведение испытаний для определения качества сырья и материалов;
- контроль за соблюдением установленных регламентов технологических и производственных процессов;
- ремонт основных производственных средств;
- поверка и аттестация измерительных приборов и оборудования, другие услуги в области метрологии и прочее;
- транспортные услуги сторонних организаций по перевозкам грузов внутри организации и доставка готовой продукции на склады хранения, отправления.

2) Работы, выполняемые другими учреждениями, предприятиями и организациями (находящимися на самостоятельном балансе экспериментальными предприятиями по контрагентским договорам на создание научно-технической продукции, генеральным исполнителем которых является данная научная организация).

Расчёт величины этой группы расходов зависит от планируемого объёма работ и определяется из условий договоров с контрагентами.

В данной работе подобными контрагентами являлись научные исследовательские центры ИОЯИ ЛЯП города Дубна и центр имени Гельмгольца в Дрездене, Германия.

В первом центре средства были потрачены с учётом будущих исследований, что в пересчёте на каждый образец составляло 5 500 руб/ед. Во втором центре, в Дрездене, позитронная спектроскопия образцов, облучённых гелием, была совершена на основе субсидий, предоставляемым самим центром. Таким образом, всего на этот раздел было потрачено 11 000 руб.

4.5.7. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и так далее. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей 1/7}) \cdot k_{нр},$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.5.8. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в табл. 11.

Таблица 11 – Расчёт бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	30 429	Пункт 4.5.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	2 700	Пункт 4.5.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	249 139,5	Пункт 4.5.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	37 370,93	Пункт 4.5.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	77 644,33	Пункт 4.5.5
6. Контрагентные расходы	11 000	Пункт 4.5.6
7. Накладные расходы	65 325,4	16 % от суммы ст. 1 - 6
8. Бюджет затрат НТИ	473 609,16	Сумма ст. 1 - 7

4.6. Оценка эффективности проекта

Определение эффективности научно-исследовательской работы происходит на основе расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путём по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Принимая, что в первом исполнении НММП системы Zr/Nb с толщиной индивидуального слоя 200 нм наносились на кремниевую подложку с ориентацией (110) при более высоком давлении от атмосферы аргона, чем во втором исполнении того же покрытия с толщиной слоя 100 нм, нанесённом на монокристалл кремния с ориентацией (100), сравним оба варианта исполнения проекта для оценки ресурсоэффективности в таблице 12.

Таблица 12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий \ Объект	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1 ((110), 0,7 Па)	Исп. 2 ((100), 0,5 Па)
Способствует росту производительности нанесения	0,1	5	4
Удобство в эксплуатации	0,15	5	5
Радиационная стойкость	0,15	4	5
Энергосбережение	0,2	3	5
Надёжность	0,25	5	5
Материалоемкость	0,15	4	5
Итого	1	4,3	4,8

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Тогда интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$\text{Исполнение 1: } I_{pi1} = 2,6$$

$$\text{Исполнение 2: } I_{pi2} = 2,9$$

Таким образом, значений интегральных показателей эффективности показывают, что второй вариант исполнения более ресурсоэффективен и является лучшим вариантом.

4.7. Выводы по финансовой части

Перед определением эффективности финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения проекта был произведён анализ конкурентных технических решений, который показал эффективность данного проекта после сравнения характеристик НММП Zr/Nb с покрытиями других систем. Сильные и слабые стороны, угрозы и возможности и их совмещение были определены с помощью SWOT-анализа.

Построенный календарный план-график работ позволил рассчитать реальную заработную плату для всех участников проекта.

Подсчёт затрат на разработку показывает, что основной статьёй расходов является основная заработная плата исполнителей темы: основная – 249 139,5 руб., дополнительная – 37 370,93 руб, а также расходы на внебюджетные фонды в размере 77 644,33 руб.

На втором месте по величине идут затраты на специальное оборудование, а именно амортизация уже имеющейся установки – 2 700 руб. Накладные расходы составили 65 325,4 руб., а контрагентные – 11 000 руб. Отсюда общий бюджет проекта составляет 473 609,16 руб.

В конце рассматривалась ресурсная эффективность данного проекта по сравнению с иным исполнением работы. Анализ показал, что именно нынешнем исполнении многослойные покрытия системы Zr/Nb ресурсоэффективны и являются наилучшим вариантом для дальнейших исследований.

Глава 5. Социальная ответственность

В современных условиях труда для снижения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости очень важно внедрить системы целенаправленных действий по защите и охране труда на всех стадиях производственного процесса.

Для выполнения данной выпускной квалификационной работы на тему "Влияние облучения протонами и ионами гелия на дефектную структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb" проводилась серия экспериментов с применением различных установок, помогающих решить поставленные задачи, таких как: вакуумная камера с магнетронной системой, электростатический ускоритель ЭСГ-2,5, плазменный источник ионов с холодным катодом "ПИОН-1М" и другие. Но основная работа, поиск информации и анализ данных проводились на персональном компьютере. В связи с этим, детальное рассмотрение правил гигиены и безопасности труда при работе за персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) особенно необходимо при осуществлении учебных исследований.

Тогда для внедрения определённых правил и мер предосторожности требуется разработать комплекс мероприятий технического, организационного, режимного и правового характера, минимизирующих негативные последствия.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства

При выполнении данной работы работником (студентом) согласно статье 91 ТК РФ его нормальная продолжительность рабочего времени не должна превышать 40 часов в неделю. В течение рабочего дня работнику должен предоставляться перерыв для отдыха и питания (ст. 108 ТК РФ) в размере 1 часа согласно правилам внутреннего распорядка. Согласно статье 14

федерального закона N 426-ФЗ, вид работы относится ко первому классу вредности.

Для комфортной работы должна поддерживаться средствами кондиционирования воздуха оптимальная температура для данного времени года (СанПиН 2.2.4.3359-16). Значительная часть данной работы выполняется на ПЭВМ, тем самым работник должен быть обеспечен рабочим столом, ПЭВМ и помещением, соответствующим правилам СанПиН 2.2.4.548-96.

К работе с ПЭВМ допускаются лица, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретённых навыков.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с газовыми баллонами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы:

– инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В. Данная инструкция предназначена для всех категорий работников, занятых техническим обслуживанием электроустановок, проводящих в них оперативные переключения, организующих и выполняющих строительные, монтажные, наладочные, ремонтные работы, испытания и измерения;

– инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ. Данная инструкция предназначена для всех категорий работников, занятых эксплуатацией ПЭВМ (далее операторов): операторов, работа которых связана с приёмом и вводом информации, наблюдением и корректировкой решаемых задач по готовым программам; программистов, занятых на ПЭВМ разработкой, проверкой, отладкой программ; инженеров и техников ЭВМ и ПЭВМ,

выполняющих профилактические и ремонтные работы, устанавливающих причины сбоев, работающих со схемами и другой техдокументацией; пользователей ПЭВМ, совмещающих работу оператора с основной работой и занятыми работой с ПЭВМ менее половины своего рабочего времени.

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Согласно положению ГОСТ Р 50923-96 "Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения", рабочее место с дисплеем должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы.

Основными элементами рабочего места оператора являются: рабочий стол, рабочий стул, дисплей (экран), клавиатура. Рабочий стул должен быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сидения и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья.

Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову. Дисплей должен быть установлен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. То есть должна предусматриваться возможность регулирования экрана по высоте ± 3 см, по наклону от 10 до 20° относительно вертикали, в левом и правом направлениях. Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать 60°.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину

поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сидения с заглублённым передним краем.

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

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные оттенки, которые не рассеивают внимание (оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряжённости, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

5.2. Производственная безопасность.

5.2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.

При выполнении работ на персональном компьютере согласно ГОСТ 12.0.003-2015 "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация" могут иметь место следующие факторы, представленные в таблице 13:

Таблица 13 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении	-	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений"
Повышенный уровень шума	-	+	-	ГОСТ 12.1.029-80 "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация"
Отсутствие естественного света	+	+	+	СанПин 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение"
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность"

5.2.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.

5.2.2.1. Микроклимат

Микроклимат в производственном помещении включает в себя температуру, относительную влажность и скорость движения воздуха. Неблагоприятные метеоусловия в помещении могут вызвать перенапряжение механизмов терморегуляции, перегрев или переохлаждение организма.

Организм человека начинает перегреваться или переохлаждаться, если параметры внешней среды отклоняются от комфортных. Перегрев возникает при повышенной температуре воздуха, которая сопровождается высокой относительной влажностью и низкой подвижностью воздуха. Симптомы перегрева – учащенный пульс, слабость, головная боль, повышение температуры тела, обильное потоотделение.

Переохлаждение может возникать при пониженной температуре в сочетании с высокой влажностью и подвижностью воздуха. В случае переохлаждения понижается температура тела, сужаются кровеносные сосуды, нарушается работа сердечнососудистой системы.

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений согласно СанПиН 2.2.4.548–96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений", утверждены оптимальные и допустимые интервалы температуры воздуха, относительной влажности и скорости движения воздушных масс.

Нормативы установлены с учётом тяжести выполняемой работы и времени года. В таблице 14 отражены оптимальные климатические параметры в производственных помещениях для 1а категории согласно СанПиН 2.2.4.548–96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений".

Таблица 14 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Холодный	22-24	40-60	0,1
Тёплый	23-25		

К допустимым микроклиматическим нормам можно отнести параметры, которые способны вызвать изменение теплового состояния организма. При этом не возникает недомоганий, но могут ощущаться дискомфорт, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности. Допустимые нормы

устанавливаются в тех производственных помещениях, где по каким-либо причинам невозможно обеспечить оптимальные условия. Допустимые параметры для легкой категории работ представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Холодный	20-25	15-75	0,1
Тёплый	21-28		0,1-0,2

Для достижения оптимальных параметров в таблице 5.2 в помещении используются следующие средства коллективной защиты (СКЗ): кондиционирование воздуха в тёплый период года, отопление помещения в холодный период года.

Профилактика перегрева организма работника в тёплый период года включает следующие мероприятия: нормирование верхней границы внешней термической нагрузки на допустимом уровне применительно к восьмичасовой рабочей смене; регламентация продолжительности воздействия нагревающей среды для поддержания среднесменного теплового состояния на оптимальном или допустимом уровне; использование специальных СКЗ и СИЗ, уменьшающих поступление тепла извне к поверхности тела человека и обеспечивающих допустимый тепловой режим.

Защита от охлаждения (холодный период года) осуществляется посредством: использования локальных источников тепла, обеспечивающие сохранение должного уровня общего и локального теплообмена организма; регламентации продолжительности непрерывного пребывания на холоде и продолжительности пребывания в помещении с комфортными условиями.

5.2.2.2. Производственный шум

Влияние шума на организм человека является причиной негативных изменений, прежде всего в органах слуховых, нервных и сердечнососудистых систем. Для избегания последствий уровни шума на рабочих местах не должны превышать значений, утверждённых СН 2.2.4/2.1.8.562–96.

Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории уровни звука и эквивалентный уровни звука (дБА) не должны превышать 60 дБА. При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной и индивидуальной защиты.

В зависимости от конструктивного исполнения защита слуха от шума производится согласно "ГОСТ 12.4.275-2014 (EN 13819-1:2002). Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органа слуха. Общие технические требования. Методы испытаний".

К СКЗ относятся: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения. В качестве материала можно использовать минеральную вату, гипсокартон, базальтовую вату, вспененный полиэтилен и другие. К СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха (наушники, беруши).

5.2.2.3. Освещённость

Правильно спроектированное и исполненное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду,

оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать.

Кроме того, всё поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Иными словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, так как яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряжённость глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 освещённость на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк, а на поверхности экрана – более 300 лк. Освещение не должно создавать бликов на мониторе.

5.2.2.4. Расчёт искусственной освещённости

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется при помощи метода коэффициента светового потока, учитывающего световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 8$ м, ширина $B = 6$ м, высота = 3,7 м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно упомянутому документу необходимо создать освещённость не ниже 200 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы (средней точности, В-1).

Коэффициент отражения побеленных стен с окнами без штор $\rho_c = 50\%$, побеленного потолка $\rho_{\Pi} = 70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий

загрязнение светильника, для помещений с небольшим количеством пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для ламп $Z = 1,1$.

Выбираем линейные светильники SPO-108 мощностью 36 Вт, длиной 1192 мм, шириной 75 мм и теплотой света 4400 К. Светильники принадлежат к лампам эксплуатационной группы 5.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которую принимаем равной 1,1. Тогда, учитывая, что расчётная высота подвеса $h = 2,7$ м, найдём примерное расстояние между соседними светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,7 = 2,97 \text{ (м.)}$$

В таком случае, расстояние от крайнего ряда светильников до стены будет $L/3 = 0,99$ м.

Определим число рядов светильников n_p в помещении и количество светильников в ряду $n_{св}$:

$$n_p = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{6 - \frac{2}{3} \cdot 2,97}{2,97} + 1 \approx 3;$$

$$n_{св} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l + 0,5} = \frac{8 - \frac{2}{3} \cdot 2,97}{1,192 + 0,5} \approx 4;$$

Для равномерности размещения пересчитаем расстояния между светильниками с учётом количества рядов и числа светильников в ряду. Тогда разместим осветительные приборы в три ряда по четыре светильника способом, показанным на рисунке 9.

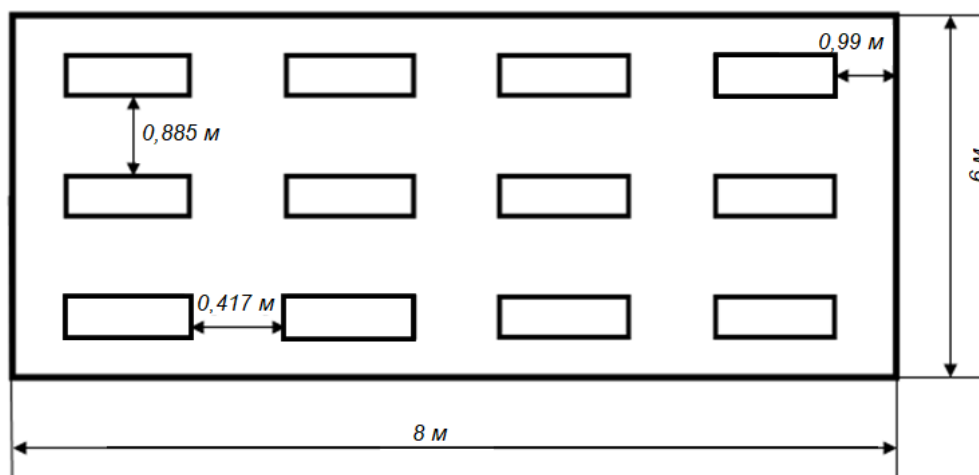


Рисунок 9 – Схема размещения светильников в помещении

Далее определим индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h(A + B)} = \frac{8 \cdot 6}{2,7 \cdot (8 + 6)} = 2,87.$$

Значения коэффициента использования светового потока светильников η примем равным 53 %. Тогда необходимый световой поток:

$$\Phi = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,53} = 2490 \text{ (лм)}.$$

В действительности же, в помещении было расположено всего 2 линейных светильника с теплотой света 4400 К, что даже без сравнения светового потока на рабочем месте (который было бы необходимо определять лишь посредством специальной аппаратуры) с необходимым и достаточным для работы очевидна недостаточность освещения на рабочей поверхности. Однако эта проблема легко решается дополнительным локальным источником освещения в виде настольной лампы, питающейся от электросети.

5.2.2.5. Электробезопасность

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока.

Согласно требованиям электробезопасности (ГОСТ 12.1.019-79 "ССБТ. Электробезопасности. Общие требования и номенклатура видов защиты") электрооборудование и приборы должны находиться на специально отведённых местах с заземлением. Сопротивление заземления должно быть не более 4 Ом.

В настоящее время большая доля внимания уделена электробезопасности, так как использование в повседневной жизни различного вида электроустановок неуклонно растёт. Анализ опасности электрических сетей практически сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека в различных условиях, в которых может оказаться человек при эксплуатации электрических сетей. Безопасной для человека является величина переменного тока – 10 мА, постоянного – 50 мА, безопасное напряжение 12 В.

К средствам коллективной защиты относятся: защитное заземление, зануление, защитное отключение, двойная изоляция, оградительное устройство и разделение электрической сети с помощью трансформаторов.

К средствам индивидуальной защиты относятся: средства защиты головы (каска), глаз и лица (очки, щитки), рук (диэлектрические перчатки) а также специальная обувь (резиновые галоши, боты).

Также весь ручной инструмент, использующийся на электроустановках должен обладать изоляцией. В используемом помещении применяются электроустановки напряжением менее 1000 В.

Для данной работы активно используется электричество для питания компьютерной техники, которая может являться источником опасности. Несоблюдение правил ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ "Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов" может привести к опасным последствиям. Поражение электрическим током может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение.

В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного

прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надёжной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

5.3. Экологическая безопасность

В данном разделе будет рассмотрено влияние объекта исследования на атмосферу, гидросферу и литосферу.

На рабочем месте предполагаемым источником загрязнения окружающей среды могут оказаться воздействующие на литосферу отходы при поломке предметов вычислительной техники и оргтехники.

Вышедшая из строя ПЭВМ и сопутствующая оргтехника относится к IV классу опасности и подлежит специальной утилизации. Для оказания наименьшего влияния на окружающую среду, необходимо проводить специальную процедуру утилизации ПЭВМ и оргтехники, при которой более 90% отправится на вторичную переработку и менее 10% будут отправлены на свалки. При этом она должна соответствовать процедуре утилизации ГОСТ Р 53692-2009 "Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов".

В ходе деятельности организация также создает бытовой мусор (канцелярские, пищевые отходы, искусственные источники освещения), который должен быть утилизирован в соответствии с определённым классом опасности или переработан, чтобы не оказывать негативное влияние на состояние литосферы.

Накапливаемые отходы складываются в стальной бак на входе в производственное помещение и затем утилизируются. Организация сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов является полномочиями органов местного самоуправления в области обращения с

отходами и регулируется Федеральным законом Российской Федерации от 24 июня 1998 года № 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления", Федеральным законом от 10 января 2002 года № 7-ФЗ "Об охране окружающей среды", Федеральным законом от 30 марта 1999 года № 52-ФЗ "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения", а также санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, окружающей среде.

Чрезвычайные ситуации бывают техногенные и природные. Техногенные чрезвычайные ситуации вызваны производственной деятельностью человека, в то время как природные ЧС возникают по причине природных явлений и процессов. Так, к техногенным чрезвычайным ситуациям относятся пожары и взрывы на производстве, аварии с выбросом химически опасных или радиоактивных веществ и так далее. Природные ЧС могут возникнуть ввиду наводнения, заморозка, урагана и другие.

Предупреждение чрезвычайных ситуаций – это комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба природе и материальных потерь. Комплекс мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера включает меры организационного, организационно-экономического, инженерно-технического и специального характера.

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.

За счёт наличия вычислительной техники в помещении наиболее вероятно возникновение пожара, под которым понимается вышедший из-под контроля процесс горения, обусловленный возгоранием вычислительной техники и угрожающий жизни и здоровью работников.

Причинами возгорания при работе с ПЭВМ могут быть:

- токи короткого замыкания;
- неисправность устройства ПЭВМ или электросетей;
- небрежность оператора при работе с ПЭВМ;
- воспламенение ПЭВМ из-за перегрузки.

В связи с этим, согласно ГОСТ 12.1.004-91 "Пожарная безопасность. Общие требования", при работе с ПЭВМ необходимо соблюдать следующие нормы пожарной безопасности:

- для предохранения сети от перегрузок запрещается одновременно подключать к сети количество потребителей, превышающих допустимую нагрузку;
- работы за компьютером проводить только при исправном состоянии оборудования, электропроводки;
- иметь средства для тушения пожара (огнетушитель);
- установить количество, размеры и соответствующее конструктивное исполнение эвакуационных путей и выходов;
- обеспечить возможность беспрепятственного движения людей по эвакуационным путям.

5.4.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС.

Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- 1) использование только исправного оборудования;
- 2) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности, проверка соблюдения правил пожарной безопасности;
- 3) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- 4) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения применяют до прибытия пожарной команды. В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.



Рисунок 10 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из подвальных помещений учебного корпуса № 3.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности: иметь в наличии охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации (см. рис. 10), порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом и табличек с указанием направления к выходу.

Выводы по социальной части

В данном разделе были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, в которых регламентируются условия труда, инструкции по работе со специальным оборудованием, а также гигиенические требования к организации работы.

Выявлены опасные и вредные факторы производственной среды. К вредным факторам можно отнести: микроклимат, воздействие шума, вибраций и недостаточная освещённость. К опасному фактору можно отнести: повышенное значение напряжения в электрической цепи, которое может пройти через тело человека.

К факторам, угрожающим окружающей среде, относится утилизация ПЭВМ в случае несовместимых с рабочим режимом неисправностей.

Помещение, в котором производилась работа на персональной электронно-вычислительной машине, соответствует требованиям пожарной безопасности. В работе приведён план эвакуации при пожаре и других чрезвычайных ситуациях из помещения, в котором проводилась интеллектуальная деятельность.

Микроклимат, уровень шума помещения находится в пределах допустимых параметров, а освещённость помещения для нормальной работы требует дополнительных источников света. Электробезопасность помещения соответствует требованиям защиты электрооборудования и приборов. Перед началом работы были проведены все необходимые инструктажи.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведено исследование влияния облучения протонами и ионами гелия на дефектную структуру наноразмерных многослойных металлических покрытий на основе Zr/Nb методом доплеровского уширения аннигиляционной линии с применением пучков позитронов переменной энергии. Образцы изготавливались методом магнетронного распыления Zr и Nb мишеней при постоянном токе на кремниевую подложку. Анализ структурных дефектов до и после облучения протонами проводился с помощью метода доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ) с использованием пучков позитронов переменной энергии в ОИЯИ ЛЯП в г. Дубна, а после – облучением ионами гелия на специализированной установке SPONSOR (Slow-Positron System of Rossendorf) HZDR (Дрезден, Германия). Спектры ДУАЛ анализировались путём определения S и W параметров с помощью программного обеспечения SP-11. Влияние облучения оценивалось по относительному изменению S/S_0 и W/W_0 , где S_0 и W_0 параметры ДУАЛ до облучения, а S и W параметры ДУАЛ после облучения.

Анализ дефектной структуры методом ДУАЛ показал, что во всём диапазоне энергий внедрённых позитронов наблюдается тенденция к уменьшению относительного значения S/S_0 и увеличению W/W_0 после облучения протонами относительно исходного уровня. При этом на глубине около 90 ± 20 нм, соответствующей пику брэгговской кривой для протонов, наблюдается уменьшение S параметра и рост W параметра относительно исходного уровня, связанное с уменьшением дефектности. Указанные изменения ($S/S_0 \downarrow$, $W/W_0 \uparrow$) соответствует уменьшению избыточного свободного объёма в НММП Zr/Nb после протонного облучения.

Облучение ионами гелия сопровождается небольшим снижением S/S_0 и ростом W/W_0 в первом слое. Однако в последующих слоях данный параметр

начинает возрастать, и на глубинах от 10 до 30 нм его значения становятся больше 1, что свидетельствует о накоплении радиационных дефектов.

В исследованных НММП Zr/Nb до и после облучения протонами либо ионами гелия сохраняется один преобладающий центр захвата позитронов – избыточный свободный объем вблизи границы раздела в окрестности циркония.

Список литературы

1. Wang Ji et. al. Xe-ion-irradiation-induced structural transitions and elemental diffusion in high-entropy alloy and nitride thin-film multilayers // *Materials & Design*. – 2022. – V. 219. – p. 28;
2. Milosavljević M. et. al. A comparison of Ar ion implantation and swift heavy Xe ion irradiation effects on immiscible AlN/TiN multilayered nanostructures // *Materials Chemistry and Physics*. – 2012. – V. 133. – pp. 884-892;
3. Xinghang Zhang et. al. Radiation damage in nanostructured materials // *Progress in Materials Science*. – 2018. – V. 96. – pp. 217-321;
4. Pogrebñjak A.D. et. al. Positron annihilation studies of defect structure of (TiZrHfNbV)N nitride coatings under Xe¹⁴⁺ 200 MeV ion irradiation // *Mater. Lett.* – 2021. – V. 303. – p. 4;
5. Zhao Y.F. et. al. Unusual He-ion irradiation strengthening and inverse layer thickness-dependent strain rate sensitivity in transformable high-entropy alloy/metal nanolaminates: A comparison of Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀/Cu vs Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Ni₁₀/Cu // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2022. – V. 116. – pp. 199-213;
6. Yu K.Y. et. al. Comparisons of radiation damage in He ion and proton irradiated immiscible Ag/Ni nanolayers // *Journal of Nuclear Materials*. – 2013. – V. 440. – pp. 310-318;
7. Misra A. et al. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites // *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. – 2009. – V. 59. – pp. 62-65;
8. Lao, Y. et. al. Asymmetric Interaction of Point Defects and Heterophase Interfaces in ZrN/TaN Multilayered Nanofilms // *Sci. Rep.* – 2017. – V. 7. – p. 9;
9. Wang Min et. al. Defect-interface interactions in irradiated Cu/Ag nanocomposites // *Acta Materialia*. – 2018. – V. 160. – pp. 211-223;
10. Li Nan et. al. He ion irradiation damage in Fe/W nanolayer films // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – V. 389, Is. 2. – pp. 233-238;

11. Daghbouj N. et. al. Characterizing heavy ions-irradiated Zr/Nb: Structure and mechanical properties // *Materials & Design*. – 2022. – V. 219. – p. 13;
12. Chen Y. et. al. In situ study of heavy ion irradiation response of immiscible Cu/Fe multilayers // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – V. 475. – pp. 274-279;
13. Wei Q.M. et. al. Suppression of irradiation hardening in nanoscale V/Ag multilayers // *Acta Materialia*. – 2011. – V. 59. – pp. 6331-6340;
14. Liang X.Q. et. al. Size- and ion-dose-dependent microstructural evolution and hardening in He-irradiated miscible Cu/Zr crystalline/crystalline nanolaminates // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – V. 366. – pp. 255-265;
15. Wu S.H. et. al. Effect of He-irradiation fluence on the size-dependent hardening and deformation of nanostructured Mo/Zr multilayers // *International Journal of Plasticity*. – 2018. – V. 11. – pp. 36-52;
16. Daghbouj N. et. al. Revealing nanoscale strain mechanisms in ion-irradiated multilayers // *Acta Materialia*. – 2022. – V. 229. – p. 11;
17. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П.. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов // Учебное пособие. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 1998. – 92 с.;
18. Wolfer W. Fundamental properties of defects in metals // *Compr. Nucl. Mater.* – 2012. – V. 1. – pp. 1-45;
19. Schilling W. Self-interstitial atoms in metals // *Journal of Nuclear Materials*. – 1978. – V. 70. – pp. 465-489;
20. Ullmaier H. Atomic defects in metals. – Berlin: Springer-Verlag, 1991. – V. 25. – 437 p.;
21. Marian J. et. al. Mechanism of formation and growth of <100> interstitial loops in ferritic materials // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – V. 88;
22. Kiritani M. Similarity and difference between fcc, bcc and hcp metals from the view point of point defect cluster formation // *Journal of Nuclear Materials*. – 2000. – V. 276. – pp. 41-49;
23. Wangyu H. et. al. Analytic modified embedded atom potentials for HCP metals // *J Phys: Condens Matter*. – 2001. – V. 13. – p. 1193;

24. Bacon D. Point defects and clusters in the hcp metals: their role in the dose transition // *Journal of Nuclear Materials*. – 1993. – V. 206. – pp. 249-265;
25. Yamada S., Kameyama T. Observation of c-component dislocation structures formed in pure Zr and Zr-base alloy by self-ion accelerator irradiation // *Journal of Nuclear Materials*. – 2012. – V. 422. – pp. 167-172;
26. Griffiths M. Evolution of microstructure in hcp metals during irradiation // *Journal of Nuclear Materials*. – 1993. – V. 205. – pp. 225-241;
27. Selim F.A. Positron annihilation spectroscopy of defects in nuclear and irradiated materials- a review // *Materials Characterization*. – 2011. – V. 174. – p. 110952;
28. Перминов Д. А. Позитронные аннигиляционные исследования взаимодействия радиационных дефектов с дислокациями и интерметаллидными выделениями в FeNi сплавах на ранних стадиях радиационной повреждаемости // Дисс. канд. физ. – мат. наук. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2016. – 126;
29. Čížek J. Characterization of lattice defects in metallic materials by positron annihilation spectroscopy: A review // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2018. – V. 34 Iss. 4. – pp. 577-598;
30. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.;
31. Qi1 N. et. al. Selective trapping of positrons by Ag nanolayers in a V/Ag multilayer system // *AIP Advances*. – 2019. – V. 10. – p. 035012;
32. Суворов А.Л. Технологии производства и методы исследования структур кремний на изоляторе. – М.: МИЭТ, 2004. – 407 с.;
33. Slugen V. et. al. Application of Positron Annihilation Spectroscopy in Accelerator-Based Irradiation Experiments // *Materials*. – 2021. – V. 14(21). – p. 6238;
34. Čížek J. et. al. The Development of Vacancies during Severe Plastic Deformation// *Materials Transactions*. – год. – V. 60 Iss. 8. – pp. 1533-1542;

35. Dubov L.Yu. et. al. Evaluation of Positron Implantation Profiles in Various Materials for ^{22}Na Source// Acta Physica Polonica. – 2017. – V. 132. – pp. 1482-1485;
36. Positron Annihilation Spectroscopy – Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR // Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf – HZDR: 2011-2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=35245&pNid=3225>;
37. Козлова Т.В. Перераспределение избыточного объема и связанной с ним энергии при низкотемпературном отжиге ультрамелкозернистого никеля и меди // Диссертация канд. физ. – мат. наук. Томск: ИФПМ СО РАН, 2021. – 131 с.;
38. Арефьев К.П. Аннигиляция позитронов в насыщенном водородом титане // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45, вып. 1. – С. 3-7;
39. Кузнецов П.В. Позитронная спектроскопия дефектов в субмикрочеталлическом никеле после низкотемпературного отжига / Миронов Ю.П., Толмачев А.И., Бордулев Ю.С., Лаптев Р.С., Лидер А.М., Корзников А.В. // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57 вып. 2. – С. 209-218;
40. Zibrov M. et. al. Vacancy cluster growth and thermal recovery in hydrogen-irradiated tungsten // Journal of Nuclear Materials. – 2020. – V. 531. – p. 152017;
41. Laptev R. et. al. First-Principles Calculations and Experimental Study of H⁺-Irradiated Zr/Nb Nanoscale Multilayer System // Metals. – 2021. – V. 11 Iss. 4. – p. 17;
42. Uglov V.V. et. al. Tolerance of MeN/Si₃N₄ (Me = Zr, Al, Cr) multilayered systems to radiation erosion // Surface and Coatings Technology. – 2020. – V. 399. – p. 126146;
43. Болтушкин Е. В. Динамика заряженных частиц в магнитном поле стеллатронного типа // Прикладная физика. – 2006. – №3. – С. 27-32;
44. Быковский В. Ф. Импульсный инжектор позитронов низкой энергии // Прикладная физика. – 2008. – №2. – С. 24-28;

45. Сафьянов Г.А. Резонансные состояния цилиндрической ловушки Пеннинга // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. – 2020. – №20(1). – С. 86-104;

46. Зыков П.А., Снигур И.М. Замедление и аннигиляция позитронов в криогенном позитронном источнике установки LEPTA // Материалы XVIII Международной научной конференции "Ломоносов". – 2011. – С. 39-40;

47. SPONSOR – Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR // Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf – HZDR: 2011-2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=35320&pNid=3225>.