

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

Школа: Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки: 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ): Отделение экспериментальной физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние облучения протонами на структуру наноразмерного металлического многослойного покрытия Zr/Nb

УДК 539.125.418:621.793.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б41	Кроткевич Дмитрий Георгиевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Кашкаров Егор Борисович			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н.		

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
Р1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОСЗ+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
Р2	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.	Требования ФГОСЗ+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
Р3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
Р4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)
Р5	Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-8, ОПК-9)

	своей инженерной деятельности.	
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р6	<p><u>Научно-исследовательская деятельность</u></p> <p>Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.</p>	<p>Требования ФГОСЗ+ (ПК-1, ПК-2)</p>
Р7	<p><u>Научно-инновационная деятельность</u></p> <p>Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.</p>	<p>Требования ФГОСЗ+ (ПК-3, ПК-4, ПК-5)</p>
Р8	<p><u>Организационно-управленческая</u></p> <p>Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования</p>	<p>Требования ФГОСЗ+ (ПК-6, ПК-7, ПК-8)</p>
Р9	<p><u>Педагогически-просветительская</u></p> <p>Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний</p>	<p>Требования ФГОСЗ+ (ПК-9)</p>

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

Школа базовой инженерной подготовки
 Направление подготовки 03.03.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Лидер А.М.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБ41	Кроткевич Дмитрий Георгиевич

Тема работы:

Влияние облучения протонами на структуру наноразмерного металлического многослойного покрытия Zr/Nb	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	31.01.2018, №533/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Образцы наноразмерного многослойного металлического Zr/Nb покрытия, нанесенные на подложку из монокристаллического кремния методом магнетронного распыления</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников; – Моделирование в программном пакете TRIM-2013 – Облучение протонным пучком на ускорителе ЭСГ-2,5 – Проведение рентгеноструктурного анализа – Измерение электрического сопротивления – Оценка изменений механических свойств – Анализ полученных результатов; – Социальная ответственность; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; – Заключение.
<p align="center">Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Федорчук Юрий Митрофанович, профессор ЭБЖ ИНК

Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Екатерина Валентиновна, доцент МЕН ИСГТ
---	---

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Кашкаров Егор Борисович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б41	Кроткевич Дмитрий Георгиевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б41	Кроткевич Дмитрий Георгиевич

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Физика

Тема дипломной работы: Влияние облучения протонами на структуру наноразмерного металлического многослойного покрытия Zr/Nb

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Материальные затраты -58246 амортизационные отчисления – 56958 руб., стоимость потребления электроэнергии – 13770 руб., заработная плата – 129 595 руб. и отчисления на социальные нужды – 35120 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Нормы амортизации – 6,6-14%, районный коэффициент – 1,3; коэффициент дополнительной зарплаты – 13%
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды – 27,1%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Потенциальные потребители результатов исследования Разработка анализа конкурентоспособности Выполнение SWOT- анализа проекта.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Проведение оценки ресурсной и финансовой эффективности исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.03.2018
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б41	Кроткевич Дмитрий Георгиевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0Б41	Кроткевич Дмитрий Георгиевич

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Физика

Тема дипломной работы: Влияние облучения протонами на структуру наноразмерного металлического многослойного покрытия Zr/Nb

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p><i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) - опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) - чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Облучение образцов многослойного покрытия осуществлялось на линейном ускорителе ЭСГ-2,5. Последующие исследования (рентгеноструктурный анализ и измерение электрического сопротивления) проводились в лаборатории.</p> <ul style="list-style-type: none"> - возможные вредные факторы: метеоусловия, освещение, сильные шумы от насосов, воздействие ионизирующего излучения от ускорителя - возможные опасные факторы: угроза поражения электрическим током - возможные ЧС природного и техногенного характера: сильные заморозки, пожар, предполагаемая диверсия
<p><i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - электробезопасность; - производственный шум; - микроклимат; - освещение - защита от ионизирующего излучения
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; - действие фактора на организм человека; - приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); - предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>Характеристика факторов изучаемой рабочей среды, описывающих процесс взаимодействия человека с окружающей производственной средой:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Воздействие микроклиматических условий на организм человека; - Воздействие производственного шума на организм человека - Воздействие ионизирующего излучения на организм человека - Практический расчет освещенности рабочего места
<p><i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i></p>	<p>Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> - электробезопасность (средства защиты,

<ul style="list-style-type: none"> - механические опасности (источники, средства защиты); - термические опасности (источники, средства защиты); - электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); - пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>предусмотренные конструкцией, соблюдение правил и инструкций по электробезопасности при работе);</p>
<p><i>Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - защита селитебной зоны - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); - разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Утилизация металлических лабораторных образцов - Утилизация люминесцентных ламп; - Переработка бытового мусора.
<p><i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i> - перечень возможных ЧС на объекте;</p> <ul style="list-style-type: none"> - выбор наиболее типичной ЧС; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	<p>Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
<p><i>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<p>Правовые вопросы обеспечения безопасности</p> <ul style="list-style-type: none"> - приведен список использованных нормативных документов
<p>Перечень графического материала:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) План размещения светильников на потолке рабочего помещения 2) План эвакуации 	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.03.2018
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ41	Кроткевич Дмитрий Георгиевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 100 с., 25 рисунков, 20 таблиц, 48 литературных источника, 1 приложение.

Ключевые слова: многослойные покрытия, облучение протонным пучком структурный анализ, радиационно-индуцированные дефекты, радиационная стойкость, механические свойства

Объектом исследования является наноразмерное многослойное Zr/Nb покрытие, полученное методом магнетронного осаждения. По многочисленным исследованиям в области компьютерного моделирования показали, что граница раздела между слоями Zr и Nb является эффективным стоком для радиационно-индуцированных дефектов. Таким образом, Zr/Nb многослойные покрытия должны обладать высокой радиационной стойкостью и эффектом самовосстановления, ввиду высокой объемной плотности границ раздела.

Целью работы является исследование влияния облучения протонами на структуру и механические свойства наноразмерного многослойного Zr/Nb покрытия, в зависимости от дозы и интенсивности облучения.

В данном исследовании образцы многослойного Zr/Nb покрытия были подвергнуты облучению протонным пучком на линейном ускорителе ЭСГ – 2,5. Предварительно было проведено компьютерное моделирование в программе TRIM-2013. Был проведен рентгеноструктурный анализ, оценены изменения в величинах электрического сопротивления, микронапряжения, размера области когерентного рассеяния. Изменение таких механических свойств как твердость и модуль были определены по результатам наноиндентирования.

В результате исследования было определено, что облучение протонным пучком приводит к падению электрического сопротивления, уменьшению величины микронапряжения и увеличению размеров области когерентного рассеяния. Также было отмечено увеличение твердости и модуля Юнга вследствие облучения.

В первой главе дан обзор принципам радиационной повреждаемости металлов, влияния радиационно-индуцированных дефектов на физико-технические свойства металлов.

Во второй главе проведен анализ механизмов радиационной устойчивости у таких наноразмерных структур как нанокристаллические металлы и наноразмерные многослойные металлические композиты.

Третья глава посвящена результатам проведенного исследования. В главе описана методика облучения образцов на ускорителе ЭСГ – 2,5 позволяющая достичь минимального относительного разброса энергии пучка и обеспечивающая меньшую по сравнению с толщиной покрытия глубину проникновения протонов. Показано изменение структурных и механических свойств исследуемых покрытий вследствие облучения протонным пучком.

Исследования наноразмерных многослойных металлических Zr/Nb покрытий могут способствовать созданию радиационно-стойких конструкционных материалов для ядерных и термоядерных реакторов нового поколения, с увеличенным сроком службы. Также данные исследования имеют особую значимость для создания стойкой к излучению электроники для аэрокосмической промышленности.

В будущем планируется привлечение таких методов как электронная микроскопия и электрон-позитронная аннигиляция. Также планируется провести исследования по облучению различными типами частиц.

Содержание

Введение.....	14
Глава 1. Воздействие высокоэнергетических частиц и излучения на металлы	16
1.1 Первичные процессы. Точечные дефекты их комплексы.....	16
1.2 Радиационно-стимулированные явления в металлах	20
1.2.1 Явление радиационного распухания и порообразования	20
1.2.2 Блистеринг и флекинг.....	23
1.2.3 Явление радиационного охрупчивания и упрочнения.....	24
1.3 Облучение протонами циркония и ниобия.....	26
Глава 2. Явление радиационной стойкости у наноразмерных структур.....	30
2.1 Нанокристаллические металлы	30
2.1.1 Аспекты, влияющие на силу стока дефектов к границе зерна.....	33
2.2 Наноразмерные многослойные металлические покрытия.....	37
Глава 3. Влияние облучения протонным пучком на структуру Zr/Nb многослойного покрытия	42
3.1 Материалы и методы.....	42
3.1.1 Параметры образцов наноразмерного многослойного Zr/Nb покрытия	42
3.1.2 Моделирование в программном пакете TRIM. Расчет глубины пробега протонов в зависимости от энергии пучка.	43
3.1.3 Облучение протонами на линейном ускорителе ЭСГ-2.5	43
3.1.4 Оценка дефектной структуры методом измерения электрического сопротивления	45
3.1.5 Рентгеноструктурный анализ. Расчет размера кристаллитов и величины микронапряжения.	45
3.6 Анализ механических свойств облученных образцов	46
3.2. Результаты и их обсуждение.....	48
3.2.1 Моделирование в программном пакете TRIM-2013	48
3.2.2 Анализ изменения электрического сопротивления.....	49
3.2.3 Рентгеноструктурный анализ.....	50

3.2.4 Анализ изменения твердости и модуля Юнга.....	53
3.2.5 Обсуждение полученных результатов	53
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	57
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	57
4.2 Анализ конкурентных технических решений	58
4.3 SWOT анализ	60
4.4 Структура работ в рамках научного исследования	62
4.5 Планирование управления научно-техническим проектом	63
4.6 Бюджет научно – технического исследования	65
4.6.1 Расчет материальных затрат	66
4.6.2 Расчет затрат на специальное оборудование.....	66
4.6.3 Расчет основной и дополнительной заработной платы	67
4.6.4 Отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы	69
4.6.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	70
4.7 Определение ресурсной эффективности исследования	71
Таким образом реализованный вариант является самым ресурсоэффективным.	72
Глава 5. Социальная ответственность.....	73
5.1 Общие правила работы на ускорителе	73
5.2 Выявленные вредные и опасные производственные факторы	75
5.2.1 Производственный шум	75
5.2.2 Микроклимат.....	76
5.2.3 Освещенность	78
5.2.4 Ионизирующее излучение.....	82
5.2.5 Электробезопасность	85
5.3 Чрезвычайные ситуации.....	87
5.3.1 Пожарная безопасность.....	88
5.3.2 Чрезвычайные ситуации природного характера	90
5.3.3 Диверсия	91

5.4 Охрана окружающей среды.....	91
5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	92
Заключение	94
Список литературы	95
Приложение А	100

Введение

В наши дни существует значительный спрос на открытие и разработку передовых материалов способных выдерживать воздействие высоких температур и доз облучения для ядерных и термоядерных реакторов нового поколения. При воздействии ионизирующего излучения, материалы теряют свои физико-механические свойства, что, как правило, вызвано увеличением плотности дефектов. За прошедшие несколько десятков лет, обширные исследования в области воздействия радиационных методов на реакционную среду показывают, что почти никакие материалы не защищены от радиационного повреждения.

Перспективным материалом для применения в радиационно-агрессивной среде являются наноразмерные, многослойные, металлические (НММ) покрытия. Помимо прочности близкой к теоретической, высокой эластичности и морфологической стабильности, НММ покрытия демонстрируют высокую сопротивляемость, как к усталостным нагрузкам, так и к радиационным дефектам, что делает их уникальными, многофункциональными материалами. Большинство исследований в области НММ покрытий сфокусировано на кубических классах, где оба слоя имеют гранецентрированную кубическую решетку, либо где один слой имеет гранецентрированную (ГЦК), а второй объемцентрированную (ОЦК) решетки. Гораздо меньшее внимание уделяют более сложным системам, где один слой представляет собой гексагональную плотноупакованную решетку (ГПУ), а второй слой ГЦК или ОЦК решетку. Растущий интерес в разработке таких систем возник из результатов атомистической симуляции, по результатам которой было предположено, что граница раздела Zr/Nb это отличный сток для радиационных точечных дефектов [1]. В наши дни Zr-Nb сплав широко используется в роли конструкционных материалов в ядерных реакторах, ввиду его высокой устойчивости к радиационным повреждениям и низкого сечения захвата тепловых нейтронов, коррозионной стойкости и

механическим свойствам. Таким образом, использование Zr/Nb многослойных покрытий, которые должны показывать высокую несмешиваемость (разделение фаз) ввиду некогерентности границы раздела, делает такое покрытие перспективным конструкционным материалом для ядерной промышленности [2].

Целью данной работы является исследование влияния облучения протонами на структуру и механические свойства наноразмерного многослойного Zr/Nb покрытия, в зависимости от дозы и интенсивности облучения.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

1. Создание радиационно-индуцированных дефектов.
2. Оценка изменений в структуре и механических свойствах многослойного Zr/Nb покрытия, вызванных наличием радиационных дефектов.

Для решения данных задач были использованы следующие методы:

1. Подбор режима и непосредственное облучение протонным пучком на линейном ускорителе ЭСГ-2.5.
2. Наличие радиационных дефектов и изменения в структуре (размер области когерентного рассеяния и микронапряжения) проводилось из результатов рентгеноструктурного анализа и измерению электрического сопротивления.
3. Механические свойства (твердость и модуль Юнга) были определены по результатам наноиндентирования.

Глава 1. Воздействие высокоэнергетических частиц и излучения на металлы

Высокоэнергетические частицы и излучение воздействуя на металлы могут приводить к изменению их структурного состояния и физических свойств. Основой радиационных явлений и эффектов служат процессы первичного взаимодействия заряженных частиц и излучения с металлом и последующего возникновения структурных дефектов.

Понимание физических изменений, возникающих в твердых телах под влиянием высокоэнергетических частиц и излучения, требует детального изучения ключевых радиационно-индуцированных (стимулированных) эффектов, вызванных различными видами облучения.

1.1 Первичные процессы. Точечные дефекты их комплексы.

Первичные процессы при радиационном воздействии тесно связаны с возбуждением электронной и ядерной подсистем, с протеканием ядерных реакций и со смещением атомов кристаллической решетки из положений равновесия. Важную роль в протекании этих процессов играют условия облучения и свойства облучаемых материалов. Условия облучения включают в себя следующие факторы:

- 1) энергия, тип и спектр налетающих частиц;
- 2) плотность потока частиц;
- 3) время облучения;
- 4) температура облучения;
- 5) внешние воздействия.

На рисунке 1 представлены основные стадии радиационного воздействия на вещество и его радиационные повреждения. Попадая в твердое тело, быстрая частица вовлекается в сложный процесс взаимодействия с электронами и ядрами атомов кристаллической решетки.

Передача энергии бомбардирующих частиц ядрам мишени и электронам происходит в процессах упругого или неупругого их взаимодействия. При упругом взаимодействии суммарная кинетическая энергия частиц до и после удара остается постоянной, при неупругом – суммарная энергия после соударения уменьшается.

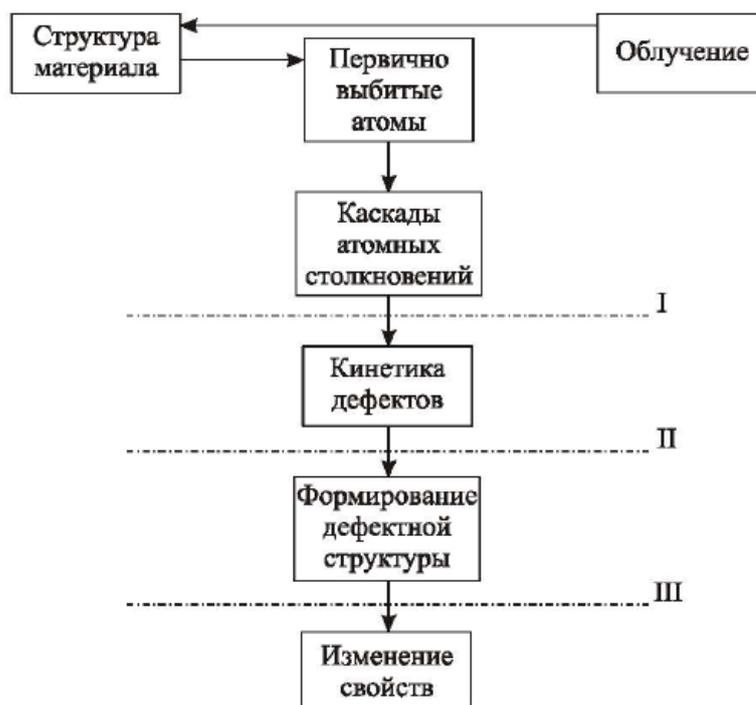


Рисунок 1 – Схема основных стадий радиационной повреждаемости; I- динамическая стадия; II-диффузионная стадия; III-стадия эволюции стоков [3].

Основную роль во всех явлениях радиационной повреждаемости играют смещения атомов кристаллической решетки за счет процессов упругого или неупругого взаимодействия налетающих частиц (нейтронов, ионов, электронов) с атомом мишени. При этом одновременно создается вакансия и собственный междоузельный атом (СМА), которые получили название пары Френкеля. Естественно, что вакансии и междоузлия всегда создаются в равных количествах при формировании пар Френкеля [3]. В зависимости от полученной энергии атом мишени может отклониться от своего

первоначального положения и передать избыток энергии решетке, либо сместиться на малое расстояние и образовать неустойчивую пару Френкеля, либо сместиться на расстояние, превышающее радиус зоны спонтанной аннигиляции, и образовать устойчивую пару Френкеля (Рисунок 2).

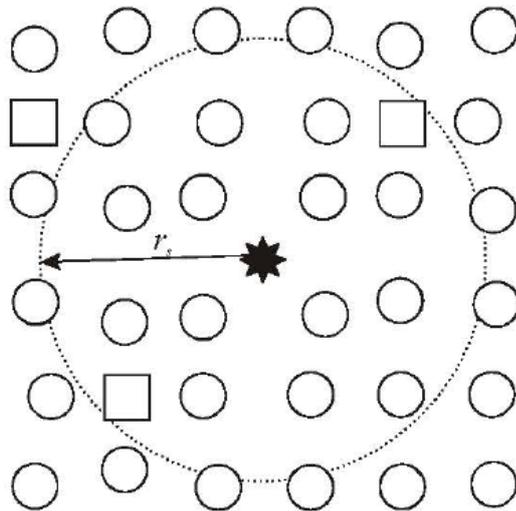


Рисунок 2 – Формирование пар Френкеля при облучении [3].

Главное условие формирования устойчивой пары Френкеля является передача атому решетки энергии, превышающую пороговую энергию смещения. Величина пороговой энергии у различных металлов неодинакова. Более того, она может изменяться для различных кристаллографических направлений одного и того же кристалла. У большинства металлов величина пороговой энергии составляет 20-50 эВ. [4]

В результате передачи атому решетки энергии, значительно превышающей пороговую, энергия, освобождающаяся в каскаде столкновений, трансформируется главным образом в тепловую, которая диссипирует по прилегающему объему материала [5]. В этом временном интервале происходит интенсивное атомное перемешивание. При этом 70-80 % образовавшихся дефектов - вакансий и междоузлий - рекомбинируют путем взаимной аннигиляции, а на месте прохождения каскада менее чем через 100 пс формируется обедненная зона - «вакансионное ядро»,

окруженное междоузельной «шубой». Дефекты, избежавшие внутрикаскадной рекомбинации, могут вступать в реакцию с дефектами, образовавшимися в других каскадах [3].

Объединение вакансий и междоузлий при их неравновесных концентрациях в комплексы энергетически выгодно. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при температурах, при которых созданные в неравновесных концентрациях вакансии и междоузельные атомы подвижны, а их равновесные концентрации относительно низки, идет интенсивное объединение однотипных дефектов и образование вакансионных и междоузельных скоплений [6].

Дислокационные петли

Вследствие высокой подвижности междоузельных атомов (энергия миграции 10^2 -10 эВ) даже при низких температурах (10-20 К) они быстро образуют скопления. Ввиду больших искажений вносимых междоузельными атомами развитие трехмерных скоплений энергетически невыгодно, поэтому они образуют только один вид скоплений – дислокационные петли [7]. Минимальным зародышем для образования дислокационной петли служит пара междоузлий.

Наиболее благоприятными местами для зарождения и роста междоузельных дислокационных петель являются структурные несовершенства, такие как дефекты упаковки, плоскости, по которым произошло скольжение, границы двойников и т.д. В ряде случаев наблюдается рост междоузельных петель до определенного размера, после чего дефектность петли снижается путем зарождения и роста вторичной петли в плоскости, параллельной предыдущей, и т. д. При этом формируются многослойные петли, вероятность образования которых возрастает с увеличением скорости создания смещений.

С повышением температуры облучения (увеличением подвижности вакансий) продлевается этап зарождения междоузельных дислокационных

петель; при высоких температурах их зарождение происходит непрерывно в течение длительного времени облучения [3].

Вакансионные петли

Вакансионные петли в условиях облучения являются не стабильными дефектами, в отличие от дислокационных петель. Тем не менее, при ионном и нейтронном облучении металлов, размер вакансионных петель настолько велик, что при низких температурах облучения они могут сохраняться в течение длительного времени, несмотря на последующее растворение. Зарождение вакансионных петель при разрушении каскадов смещения является атермическим процессом. Однако конечную форму выживших вакансионных скоплений определяют термически активируемые процессы [4]. При непрерывном нейтронном и ионном облучении устанавливается характерное для данных условий облучения соотношение между скоростями: зарождения вакансионных петель при разрушении вновь образующихся под воздействием облучения каскадов смещений; растворения вакансионных петель, созданных ранее, из-за преференции (предпочтении в поглощении) дислокаций по отношению к междоузельным атомам и термической эмиссии вакансий из петель; зарождения и роста междоузельных петель; зарождения и роста пор. Образованию вакансионных петель также способствует неконсервативное переползание дислокаций несоответствия от межфазных границ больших некогерентных областей.

1.2 Радиационно-стимулированные явления в металлах

1.2.1 Явление радиационного распухания и порообразования

К наиболее значимым и интересным радиационным эффектам (явлениям), существенно ограничивающим работоспособность конструкционных материалов быстрых и термоядерных реакторов, относится радиационное распухание - увеличение объема и изменение плотности

облучаемого материала за счет образования и роста многочисленных вакансионных и газовых пор [8].

Для успешного зарождения и роста пор при облучении необходимо выполнение следующих условий:

- 1) Высокое вакансионное насыщение.
- 2) Высокая подвижность вакансий и атомов решетки для обеспечения прихода к позициям роста пор и ухода атомов из этих позиций.
- 3) Необходимость стабилизации трехмерного вакансионного комплекса.

На выполнение обозначенных условий влияют структурное состояние материала, энергия образования и миграции точечных дефектов и их взаимодействия. Также оказывают влияние параметры облучения, такие как температура, энергия и тип бомбардирующих частиц, интенсивность потока.

Температура облучения является одним из основных параметров, влияющих на форму, скорость зарождения и роста вакансионных скоплений. У большинства металлов и сплавов зависимость распухания от температуры имеет вид колокола (Рисунок 3), высота и положение которого определяются условиями облучения, типом дефектов и состоянием материала [3].

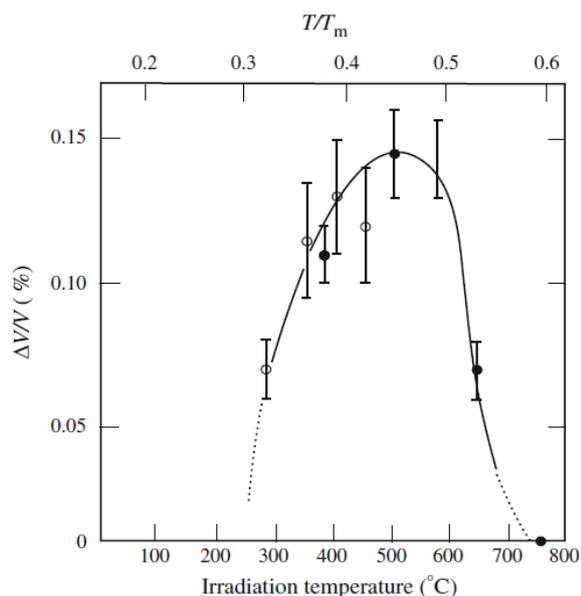


Рисунок 3 – Зависимость радиационного распухания от температуры облучения для никеля облученного нейтронами с дозой 5×10^{19} н/см² [9].

Температурная зависимость набухания материалов проходит через максимум, и с ростом температуры облучения при температуре начала интенсивного отжига дислокаций начинается спад набухания. Для некоторых металлов и сплавов температурная зависимость набухания имеет несколько максимумов [6]. Их появление обусловлено влиянием на радиационное набухание сопутствующих процессов, в том числе дислокационной структуры, введенной предварительной деформацией, рекристаллизации, распада твердого раствора, а также повышенной активности действия окружающей среды и предварительно введенных или генерируемых в процессе облучения газов.

На рисунке 4 представлена кривая зависимости набухания металлов от дозы, где выделено три периода: I-инкубационный ($S=0-1\%$), II-переходной ($S \sim (D-D_0)^n$, $n \geq 1$ (сплошная линия), $n=1$ (штриховая)), и III-установившийся ($S \sim (D-D'_n)$, (сплошная)).

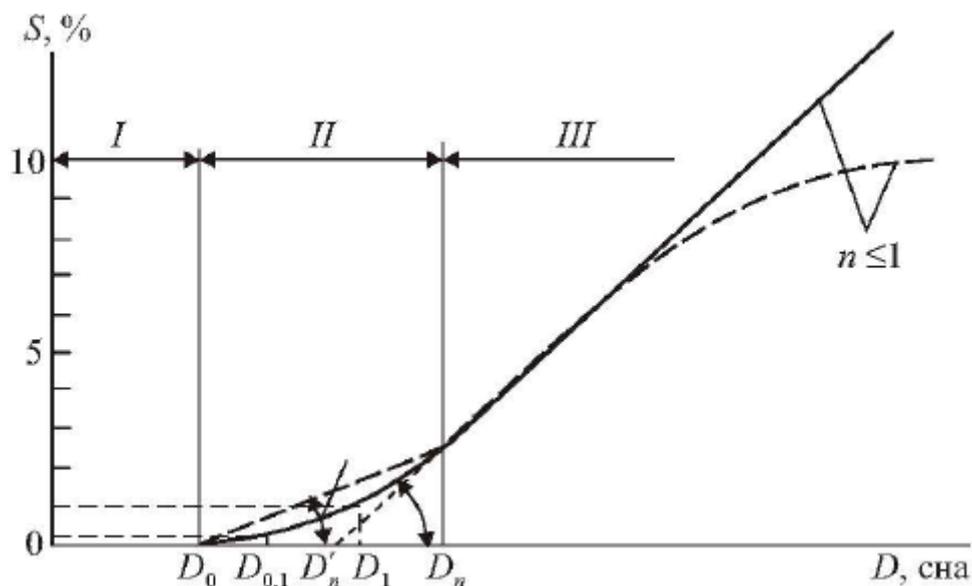


Рисунок 4 – Зависимость набухания металлов от дозы; I-инкубационный период; II-переходной период; III-установившийся период [3].

Инкубационный период предшествует интенсивному зарождению и росту пор в облучаемом материале. В настоящее время отсутствуют достаточно четкие представления о процессах, происходящих в течение инкубационного периода, что обусловлено методическими трудностями изучения в динамике поведения дефектов малого размера. На практике используется несколько характеристик инкубационного периода: порог порообразования, D_0 ; порог распухания, D_p ; условный порог распухания $D_{0,1}$, D_1 . Порог порообразования - доза, при которой поры достигают размера, достаточного для их фиксации. Согласно теоретическим представлениям, за время инкубационного периода обеспечивается избыточный, достаточный для интенсивного роста пор поток вакансий в поры. Дозу, при которой такое состояние достигается и резко ускоряется процесс роста пор (D_p), принимают за порог распухания. Дозу, при которой распухание составляет 0,1 или 1,0 % называют условным порогом распухания соответственно $D_{0,1}$, D_1 . Длительность инкубационного периода зависит от свойств материала, его структурного состояния и химического состава, типа и энергии бомбардирующих частиц, скорости введения газов. В зависимости от перечисленных факторов значение D_0 изменяется от 10^4 до 10^8 сн [3].

1.2.2 Блистеринг и флекинг

При воздействии на поверхность металла ионами газов (H^+ , D^+ , T^+ , Ne^+ , He^+ и др.) трудно растворимых в них и имеющих энергию порядка от нескольких кэВ до нескольких МэВ может происходить накопление атомов этих газов в приповерхностном слое и по достижению больших концентраций отрыв участка этого приповерхностного слоя. В результате на поверхности образуются вздутия (блистеры) (Рисунок 5), или начинается процесс отшелушивания (флекинг). Данные явления происходят при дозах облучения превышающих некоторую критическую величину, зависящую от температуры облучения, энергии и типа ионов. В диапазоне температур,

характерных для блистеринга, облучение поверхности материала после достижения критической дозы приводит к росту плотности блистеров, а затем к отрыву крышек блистеров от матрицы. На участках поверхности, где произошел отрыв крышек, возникает новое поколение блистеров. Число поколений ограничено и увеличивается с ростом энергии бомбардирующих ионов. Как только образуется последнее поколение блистеров, дальнейшее облучение приводит к возникновению губчатой структуры с развитой поверхностью, которая служит эффективным стоком для радиационных дефектов. Ввиду этого система оказывается стабильной и в дальнейшем не подвержена блистерингу [10, 11].

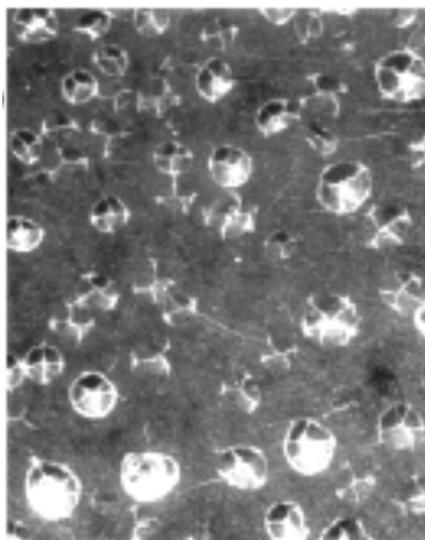


Рисунок 5 – Поверхность вольфрама облученного протонами с энергией 1.75 МэВ и дозой 5×10^{18} ион/см² [10].

1.2.3 Явление радиационного охрупчивания и упрочнения

В процессе облучения образуются радиационные дефекты, которые вызывают серьезные изменения механических свойств материала (напряжение сдвига, пределы текучести и прочности, твердость). На рисунке 6 представлены диаграммы растяжения для облученных и необлученных железа и никеля [3].

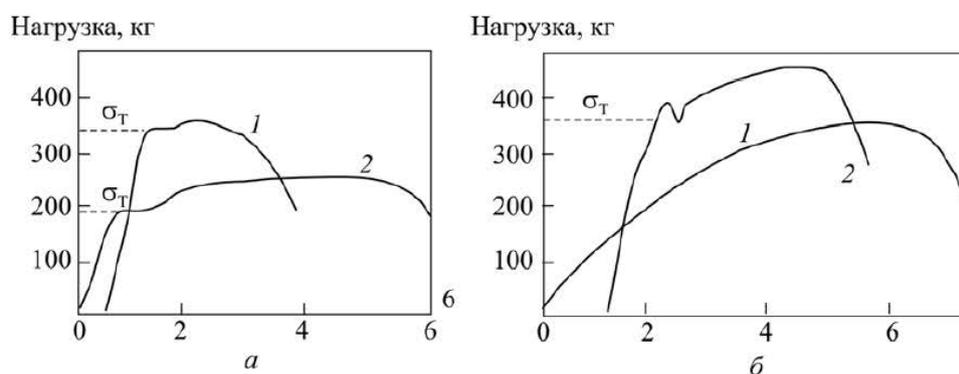


Рисунок 6 – Кривые растяжения для облученных (1) и необлученных (2) нейтронами образцов железа (а) и никеля (б), доза облучения $1.1 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$; σ_T предел текучести [3].

На данный момент существует два объяснения явления радиационного упрочнения, в одном из них упрочнение связывается с тем, что радиационные дефекты являются дополнительными центрами закрепления дислокаций и снижают эффективность действия источников дислокаций, а в другом - с образованием в кристаллической решетке дефектов - барьеров, препятствующих движению дислокаций в своих плоскостях скольжения. В пользу данного объяснения говорят такие факты, как изменение внутреннего трения металла в результате облучения, появление ярко выраженного зуба текучести на диаграмме растяжения (Рисунок 6 (б)).

Во втором механизме, также называемом барьерном, увеличение критического напряжения сдвига или предела текучести металла в результате облучения связывается с трением дислокаций о различные скопления точечных дефектов (например, кластеры, дислокационные петли и вакансионные поры), которые возникают вследствие упругого и контактного взаимодействия названных скоплений с дислокациями [12].

Радиационные дефекты в той или иной мере тормозят движение дислокаций, они затрудняют процесс пластической деформации, что ведет к возрастанию предела текучести, упрочнению кристаллов. Подходя в процессе скольжения к дефекту - препятствию, дислокация цепляется за него, но ее боковые крылья продолжают скольжение. По мере уменьшения

угла между крыльями дислокации возрастает давление на дефект - препятствие. С возрастанием напряжения, действующего на дислокацию, при определенном критическом угле она срывается с препятствия, преодолевает его, распрямляется и продолжает движение. Чем мощнее препятствие, тем меньший критический угол срыва ему соответствует. Радиационные дефектные кластеры располагаются в плоскостях скольжения хаотически, причем их размеры также неоднородны и дислокация часто находит путь легкого скольжения по участкам слабых дефектов - препятствий.

Как правило, радиационное упрочнение всегда сопровождается существенным уменьшением пластичности металлов подвергшихся облучению, так называемым явлением радиационного охрупчивания [4]. Таким образом, ввиду наличия связи между радиационным упрочнением и охрупчиванием, выяснение природы явления радиационного упрочнения позволяет узнать возможные причины радиационного охрупчивания и методы его подавления. Явление радиационного охрупчивания наиболее свойственно поликристаллическим металлам, состоящих из отдельных зерен. Появление во время облучения в зернах различных трансмутантов, особенно инертных газов, ведет к миграции образовавшихся примесей к стокам (границ зерен), приводя к их разупрочнению. Следовательно, уменьшение пластичности облученного материала обусловлено снижением прочности границ зерен в результате образования и роста гелиевых пузырьков, а также выделений других трансмутантов. Но охрупчивание помимо этого усугубляется и радиационным упрочнением материала внутри зерен, речь о котором шла выше. Зерно упрочняется, а границы между зернами разупрочняются.

.

1.3 Облучение протонами циркония и ниобия

В рассматриваемом исследовании образцы чистого Zr (99,8%) были подвергнуты облучению протонным пучком с энергией 3,5 МэВ с плотностью

пучка от 1×10^{13} до 1×10^{15} см^{-2} при температуре 335 К, с глубиной проникновения 68 – 70 мкм. Дифракционный анализ выявил увеличение интенсивности пиков и смещение дифракционных пиков в сторону больших углов [13].

Площадь протонного пучка составила 2×2 см^2 , энергия 3,5 МэВ, облучение проводилось под углом 90° к образцу, ток пучка во всех экспериментах составлял 100 нА.

На рисунке 7 показаны рентгенограммы образцов Zr до облучения и после. Рентгеноструктурный анализ не выявил возникновение новых рефлексов в результате облучения, но были обнаружены изменения в интенсивности рефлексов и в полной ширине на уровне половинной амплитуды (далее FWHM, от англ. full width at half maximum). Изменения для FWHM и интенсивности пиков оказались различны для различных плоскостей отражения. Данные для плоскости (0002) представлены в таблице. Как видно из таблицы, увеличение дозы от 1×10^{13} см^2 до 5×10^{13} см^2 приводит к уменьшению FWHM, но при дальнейшем увеличении дозы приводит к ее увеличению. Наряду с увеличением FWHM были замечены увеличения в интенсивности пика для плоскости (0002). С другой стороны интенсивности пиков для других плоскостей в некоторых случаях показывали уменьшение. Увеличение FWHM вдоль плоскости (0002) с увеличением плотности пучка выше 5×10^{13} см^{-2} вызвано структурной неупорядоченностью, остаточными напряжениями, искажениями зерен и плотностью дислокаций, ввиду облучения протонным пучком.

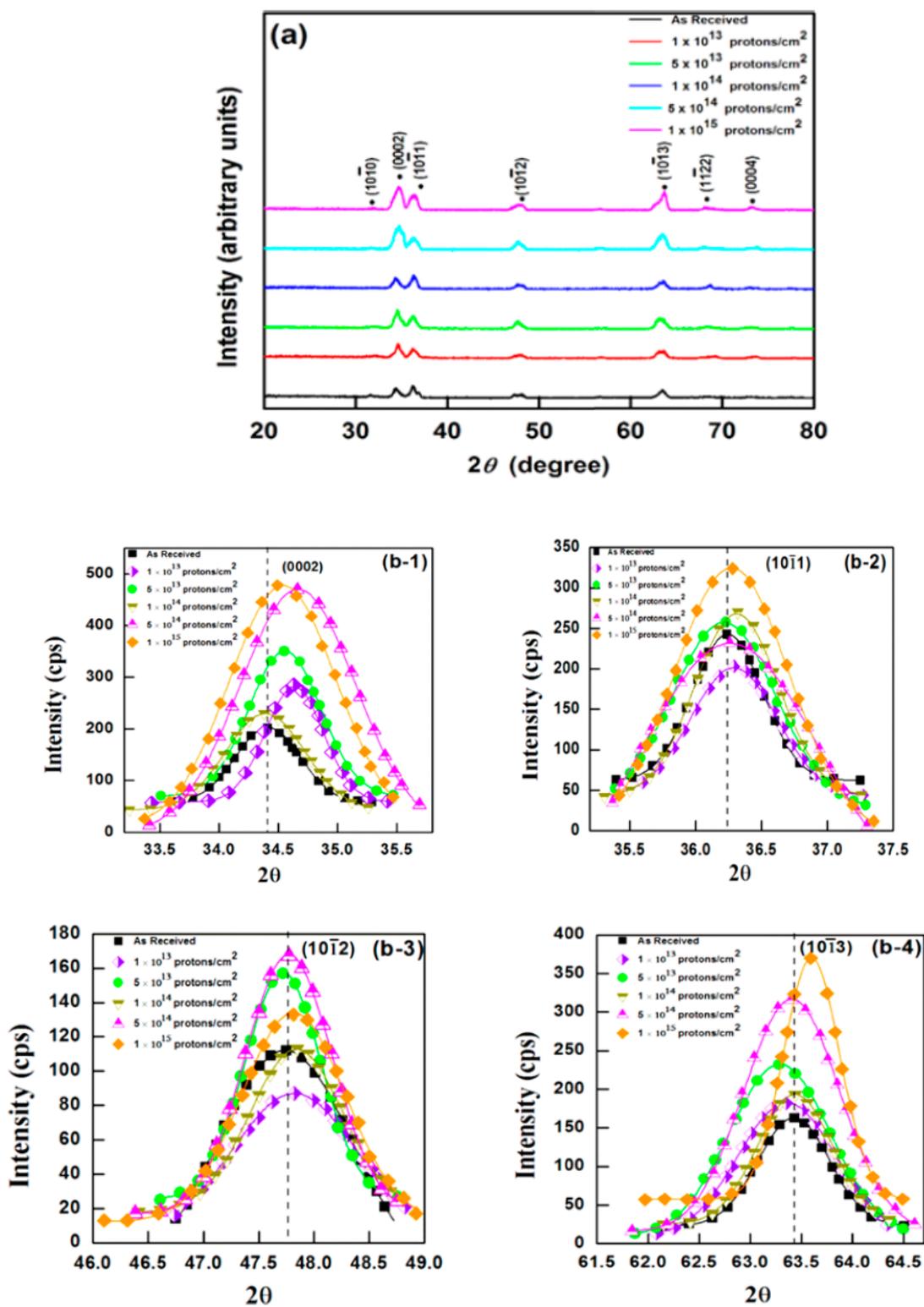


Рисунок 7 – Результаты рентгеноструктурного анализа (а), детальная информация для основных плоскостей отражения (б) [10].

Взаимодействие протонного пучка и облучаемого материала вызывает значительные отклонения атомов от их равновесного положения, вызывая

появление большого количества точечных дефектов, вакансий и междоузельных атомов [14]. С увеличением дозы облучения, структурная неупорядоченность возросла, что вызвало увеличение FWHM в плоскости отражения (0002).

Увеличение плотности пучка выше $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ приводит к уменьшению размера кристаллитов, микронапряжение возрастает, как и плотность дислокаций (Таблица 2). Структурные данные облученных образцов Zr показывают, что при высоких дозах облучения образование структурных неупорядоченностей превалирует над термическим восстановлением.[10]

Таблица 1 – Структурные параметры плоскости (0002) до и после облучения [10].

Доза облучения, см^{-2}	2 θ , градусы	FWHM		Размер кристаллитов, нм	Плотность дислокаций, 10^{14} м^{-2}	Микронапряжение
		Градусы	Радианы			
не облуч	34,30	0,6418	0,01119	13,5	54,8696	2,68
1×10^{13}	34,66	0,5799	0,01011	14,9	45,0430	2,42
5×10^{13}	34,52	0,7180	0,01252	12,1	68,3013	2,99
1×10^{14}	34,28	0,7880	0,1374	11,0	82,6446	3,29
5×10^{14}	34,74	1,1522	0,02009	7,5	177,777	4,82
5×10^{15}	34,02	1,0641	0,01855	8,1	152,415	4,46

В работе [15] образцы из ниобия (99,9% чистоты) в форме диска, предварительно отожженные в течение часа при температуре 1000°C были подвергнуты облучению пучком протонов с энергией 2,5 МэВ и дозой 10^{16} см^{-2} . Далее при помощи метода позитронной аннигиляции было проведено исследование облученных образцов на наличие дефектов и их конфигурации. По результатам исследования было выявлено, что доминантной позитронной ловушкой являются конфигурация из одной вакансии и двух атомов водорода, тем не менее, около 7% позитронов аннигилировали в дефекте вакансии и один атом водорода.

Глава 2. Явление радиационной стойкости у наноразмерных структур

В этой главе будет рассмотрено явление радиационной стойкости и самовосстановления у нанокристаллических (НК) структур, у которых размер структурного элемента (размер зерна, толщина слоя и т.д.) лежит в пределах 1~100 нм. Обзору подвергнутся такие структуры как нанокристаллические металлы и многослойные нанокompозиты.

2.1 Нанокристаллические металлы

К настоящему моменту было проведено множество исследований в области радиационной стойкости у НК материалов. Данные исследования включают в себя широкий обзор радиационно-индуцированных явлений в наноматериалах [16], процессы формации наноструктуры при облучении [17], радиационную устойчивость сталей упрочненных нанодисперсными оксидами [18], потенциал разработки наноматериалов устойчивых к радиации. На предмет радиационной стойкости были исследованы такие металлы как: Ni [19], Mo[20], W[21], а также Fe [22, 23]. На рисунке 8 показаны несколько примеров того как граница зерна поглощает кластеры дефектов, наблюдавшихся непосредственно в процессе облучения НК никеля ионами криптона [19]. В данном исследовании было обнаружено два типа поглощения. В первом случае подвижная дислокационная петля находящаяся вблизи большеугловой границы зерна в течение 49 секунд постепенно уменьшала свой диаметр, затем в течение 0,1 секунды резко мигрировала в сторону границы зерна, где и была поглощена (Рис. 8 (a-d)). Во втором же случае было обнаружено целое скопление дислокационных петель, которые также были поглощены на границе зерна в течение 78 секунд (Рис. 8 (a'-d')). Стоит отметить, что эксперимент по облучению проводился при комнатной температуре.

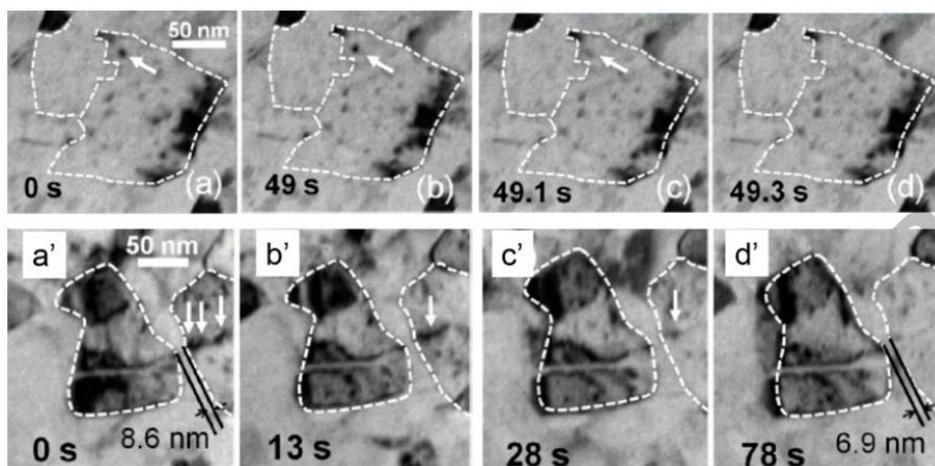


Рисунок 8 – Адсорбция дислокационных петель на границе зерна, в случае одиночной петли (a-d) и их скопления (a'-d'), белыми стрелками отмечены дислокационные петли [19].

В реальных экспериментах довольно трудно, а порой невозможно, оценить влияние структуры и особенностей границы зерна на способность противостоять радиационным повреждениям. При использовании моделирования методом молекулярной динамики становится возможным наблюдение физических механизмов возникновения и аннигиляции дефектов на атомном уровне с пикосекундным временным. Результаты моделирования НК меди облученной собственными ионами [24] представлены на рисунке 9, где отчетливо видно, что границы зерен служат мощным стоком для дефектов. Также в этом исследовании показано, что точечные дефекты и их кластеры имеют тенденцию сформировываться вблизи границ зерен, нежели в их объеме. Что интересно, как показывают исследования в области моделирования методом молекулярной динамики: точечным дефектам легче диффундировать, если граница «перегружена» междоузельными атомами, нежели в «чистой» границе [24].

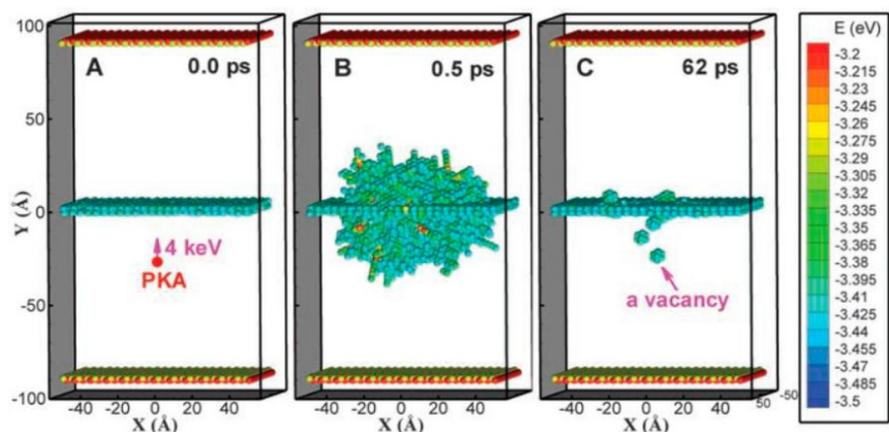


Рисунок 9 – Изображения, полученные в ходе моделирования для Cu при 300К. Цвет атомов зависит от их потенциальной энергии; атомы с энергиями меньше чем 3.43 эВ не показаны. (А) ПВА с энергией 4 кэВ движется перпендикулярно к границе зерна. (В) Через 0.5 пс, каскад столкновений достигает своего максимального размера. (С) Через 62 пс, каскад исчезает, оставляя после себя несколько вакансионных комплексов над и под границей зерна[24].

Роль границы зерна для уменьшения радиационных повреждений особенно значима в случае, когда средний размер зерна приближается к длине свободного пробега междоузельных атомов и вакансий создаваемых в ходе облучения. В исследовании описанном в [25] и [19] наглядно показано как размер зерна влияет на плотность дефектов образованных в ходе облучения. На рисунке 10 (а) изображен график зависимости количества дефектов на nm^2 в зависимости от размера зерна в НК Pd при облучении ионами Kr с энергией 240 кэВ и дозой 2×10^{16} ион/ cm^2 . Рисунок 10 (b) представляет собой график зависимости плотности дислокационных петель на m^3 в крупнозернистом (черная кривая) и НК (красная кривая) Ni, как видно плотность дислокаций для крупнозернистого Ni стремительно возрастает при дозе 0,1 сна и достигает насыщения при $\sim 0,5$ сна. Тем временем плотность дислокаций в НК Ni нарастает постепенно вплоть до значения 5 сна. При дозе 5 сна, средняя плотность дислокационных петель для крупнозернистого Ni в два раза больше чем у НК [26].

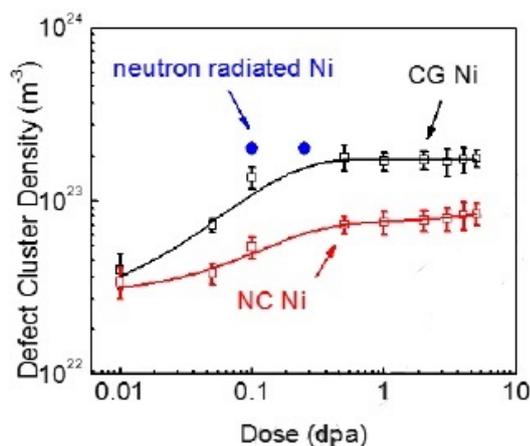


Рисунок 10 – График зависимости плотности дислокационных петель от полученной дозы для крупнозернистого и НК никеля.

2.1.1 Аспекты, влияющие на силу стока дефектов к границе зерна

На конечную величину радиационного повреждения большую роль играет такая величина как мощность стока дефектов. Например, есть свидетельства о том что мощность стока у большеугловых границ зерен больше чем у малоугловых, также было замечено что мощность стока постепенно уменьшается ввиду того что граница зерна не может полностью восстановится после абсорбции большого количества точечных дефектов. Таким образом границы зерен не являются идеальными стоками, особенно в случае долгого воздействия излучения.

Абсорбция точечных дефектов, таких как междоузельные атомы обусловлено наличием избытка свободного объема, большеугловые границы имеют больший избыток свободного объема нежели малоугловые. Также существует фундаментальное предположение о том что не вся поверхность границы зерна может абсорбировать точечные дефекты, а лишь некоторые активные области.

Для учета вышеописанных факторов существует простое аналитическое выражение [26]:

$$k_{gb}^2 = 15f(\theta, \gamma)/R^2$$

где k_{gb} мощность стока на границе зерна, R – радиус зерна, и $f(\theta, \gamma)$ – функция энергии границы зерна (γ) и угла разориентации (θ), $f(\theta, \gamma) = 1$ для идеальных болшеугловых границ зерен и $0 \leq f(\theta, \gamma) \leq 1$ для малоугловых. Стоит отметить, что размерность величины k^2 это см^2 . Величина обратная k обозначает среднее расстояние (средний свободный пробег - λ) которое дефект может пройти до захвата на стоке. Из этого следует, что для наноструктурных материалов величина λ ограничена плотностью стоков для дефектов схожей. Расстояние между стоками в НК материалах представлено размером зерен, для наноразмерных многослойных покрытий толщиной индивидуального слоя [26].

Радиационная устойчивость НК металлов сильно зависит от природы границы зерна и условий облучения [27-31]. В работах [28] и [32] подробно описано влияние на радиационную стойкость таких параметров как: угол разориентации границы зерна, расстояния каскада столкновения до границы зерна, степени повреждения границы зерна и прочих особенностей зерна. Мощность стока как функция различных характеристик зерна подробно описана в работе [29], в которой было проведено исследование по статистической молекулярной симуляции. Из данного исследования следуют утверждения:

- 1) В общем случае, область вокруг границы раздела имеет гораздо меньшую энергию формирования междоузельных атомов и вакансий.
- 2) Малоугловые границы зерен также как и болшеугловые являются эффективными стоками для точечных дефектов. Мощность стока зависит от многих характеристик конкретного зерна, но в общем случае болшеугловые границы зерен более эффективны.
- 3) Энергия формирования точечных дефектов уменьшается с увеличением угла разориентации (Рис. 11).
- 4) Приоритетным дефектом для абсорбции на границе зерна являются междоузельные атомы, таким образом, граница зерна является своего

рода «смещенным» стоком для дефектов. Также характеристики границы зерна (энергия, угол разориентации и т.д.) могут динамически изменяться в ходе продолжительного облучения.

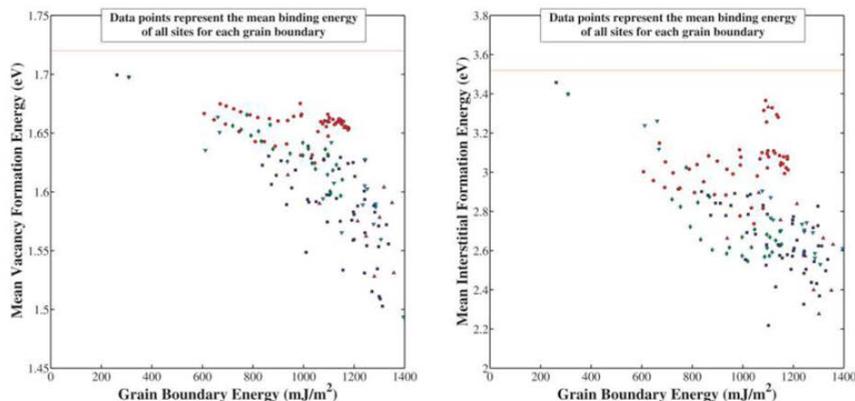


Рисунок 11 – Энергия формирования точечных дефектов в зависимости от энергии границы зерна.

Помимо понимания механизма абсорбции точечных дефектов на границе зерна, необходимо учитывать другой немаловажный аспект возникающий у НК металлов – это явление миграции границы зерна в ходе облучения. Моделирования методом молекулярной динамики показали, что границы зерен могут мигрировать на значительные расстояния в течение нескольких пикосекунд после возникновения каскада столкновений [32-34], предположительно данное явление возникает возникновения термического пика вблизи границы зерна, приводя к росту зерна. Модель радиационно-индуцированного роста зерна была предложена в работе [35], в которой конечный размер зерна главным образом зависит от дозы полученной радиации, поверхностной энергии границы зерна, размера термического пика и начального размера зерна. Также в этой работе были получены изображения ПЭМ для различных НК тонких пленок, в которых наглядно показана эволюция размера зерна в зависимости от полученной дозы облучения (Рисунок 12).

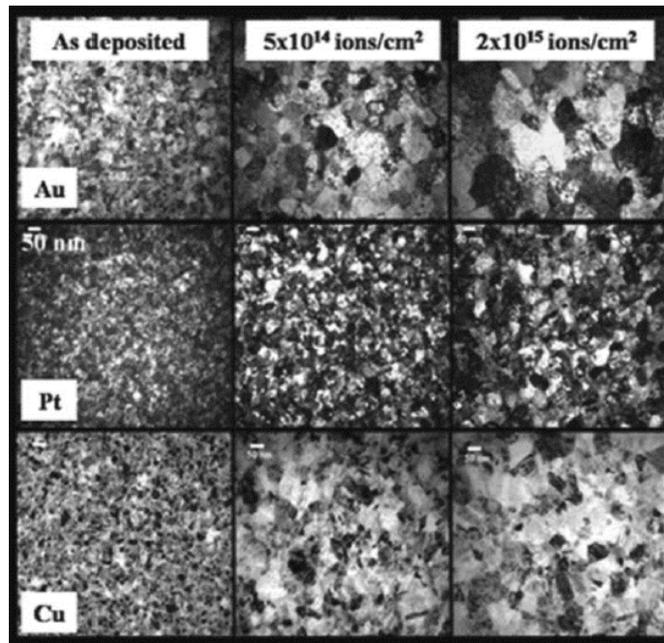


Рисунок 12 – ПЭМ изображения, свидетельствующие о росте зерна в ходе облучения; слева направо: не облученные образцы, 5×10^{14} ион/см², 2×10^{15} ион/см²; сверху вниз: пленка Au облученная ионами Ar (500 кэВ), Pt облученная ионами Ar (500 КэВ) и пленка Cu облученная ионами Kr (500 КэВ).

Тем не менее, воздействие радиации не всегда приводит к увеличению размера зерна у НК металлов, так в работе [36] в образцах НК Ni было зафиксировано измельчение зерна в результате воздействия протонами с энергией 570 МэВ. Было выдвинуто две гипотезы в попытке объяснить данное явление. Измельчения зерна происходит в результате формирования дефектных кластеров, которые в последующем выступают в роли центров зарождения новых зерен; либо в результате большего размера каскада столкновений по сравнению с размерами зерна, что приводит к дефекту упаковки вдоль зерна и последующему разделению на два меньших по размеру зерна [36].

Таким образом эффективность границы зерна как стока для дефектов в НК металлах определяются многими параметрами: размером зерна, характером границы, поверхностной энергией границы; и более того все эти параметры

могут меняться в ходе облучения, увеличивая или уменьшая эффективность стока.

2.2 Наноразмерные многослойные металлические покрытия

В отличие от остальных типов стоков для дефектов граница раздела между двумя слоями в НММ покрытиях обладает рядом уникальных особенностей. При производстве НММ покрытий можно добиться физически когерентной или некогерентной границы раздела, используя металлы с различной кристаллической структурой и/или различными параметрами решетки [37, 38], тип химической связи на границе раздела также может варьироваться [39]. Благодаря особенностям слоистой структуры, НММ покрытия обладают выдающимися механическими свойствами такими как: эластичность, высокий предел прочности и текучести, твердость и т.д. [40, 41]. Благодаря современным методикам нанесения покрытий, толщина индивидуальных слоев может достигать единиц нанометров, создавая возможность изучать влияние размерного эффекта на радиационную устойчивость наноструктурных материалов в целом.

Для описания эффективности границы раздела как стока для дефектов существует выражение:

$$k_{gb}^2 = 12\eta/h^2$$

где k_{gb} мощность стока на границе зерна,

h – толщина индивидуального слоя,

η – множитель учитывающий параметры границы раздела между слоями (величины когерентного напряжения, плотности дислокаций несоответствия, энтальпия смешивания и т.д.).

Данный множитель может быть представлен в виде отношения притока дефектов к реальной поверхности раздела (F^{real}) к притоку дефектов к идеальной поверхности раздела (F^{ideal}) [42, 43]. Значение η высоко (не больше единицы) для некогерентных, несмешиваемых границ раздела и мало для

когерентных, смешиваемых границ раздела. Ко всему, значение η может изменяться с дозой облучения [44].

В работе [45] было проведено облучение Ag/Ni многослойного покрытия ионами криптона с целью исследования роли границы раздела на абсорбцию радиационно-индуцированных дефектов. Как показано на рисунке 13, дислокационная петля, образовавшаяся в ходе облучения, мигрировала к некогерентной, несмешиваемой ГЦК/ГЦК границе раздела и в дальнейшем абсорбировалась ею.

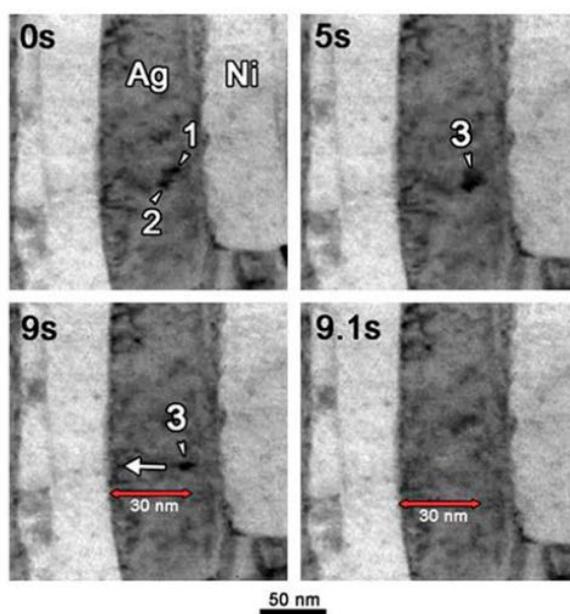


Рисунок 13 – Поведение радиационно-индуцированных дислокационных петель в Ag/Ni многослойном покрытии с дозой облучения 0.131-0.133 с.н.а; дислокационные петли отмечены малыми белыми стрелками, большой белой стрелкой отмечен путь миграции [45].

Из рисунка видно, что две дислокационные петли образовавшиеся в момент времени 0 с, образовали большую петлю, диаметром около 6 нм, спустя 5 с. Данная дислокационная петля была стабильна до момента времени-9 с. Затем в течение 0.1 с петля мигрировала к границе раздела и вскоре исчезла.

В другой работе по компьютерному моделированию для того чтобы оценить роль поверхности раздела в устойчивости к радиационным дефектам в Cu/Nb композите была использована симуляция на атомарном уровне при помощи потенциалов модели погруженного атома (англ. *embedded atom (EAM) potentials*). Данные потенциалы были построены на основе хорошо протестированных потенциалов для меди [46] и ниобия [47].

Симуляция каскадных столкновений была проведена для идеальных кристаллических меди и ниобия и для многослойного наноразмерного Cu/Nb композита, толщина слоя в котором составила 4 нм. Начальная энергия налетающего атома составляла 1.5 КэВ.

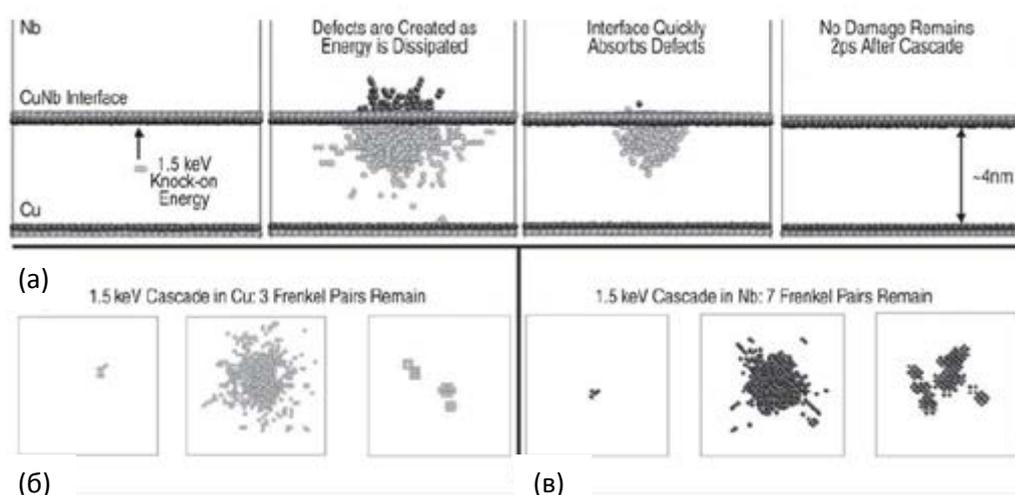


Рисунок 14 – Симуляция каскадных столкновений при энергии 1.5 КэВ в (а) Cu/Nb многослойном композите, (б) идеальной кристаллической меди и (в) идеальном кристаллическом ниобии [1]

Как видно из рисунка 14, симуляция выявила очевидную разницу в радиационных дефектах – парах Френкеля для идеальных кристаллических меди и ниобия и их композита. Все каскадные столкновения в идеальных кристаллах создавали радиационные дефекты (Рисунок 14 (б) и (в)), в отличие от Cu/Nb композита, где их не было замечено (Рисунок 14 (а)), ввиду того что все вакансии и дефекты внедрения были быстро поглощены на границе раздела, где они и рекомбинировали.

Уникальная способность границы раздела Cu/Nb захватывать и рекомбинировать пары Френкеля, причиной тому может служить различие в энергии образования вакансии близи границы раздела и внутри кристаллической решетки, вблизи границы раздела она гораздо меньше. (Рисунок 15) [1].

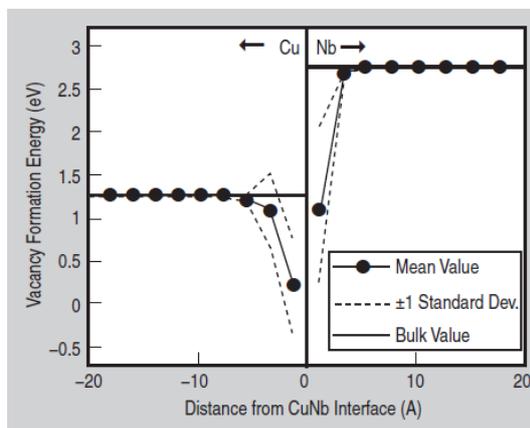


Рисунок 15 – Энергия образования вакансий в зависимости от расстояния от границы раздела в Cu/Nb композите [1].

Исходя из принципа, что границы раздела между слоями являются эффективными стоками для дефектов логично предполагать, что их концентрация будет меньше вблизи границы раздела. Чтобы проверить данную гипотезу в работе [410] группой ученых был проведен эксперимент по облучению многослойного покрытия Cu/Fe, с толщинами индивидуальных слоев 100 и 5 нм, ионами меди в течение 160 секунд с дозой до 1 сна. По результатам эксперимента был построен профиль концентрации дефектов в зависимости от расстояния до границы раздела (Рисунок 16 (а)).

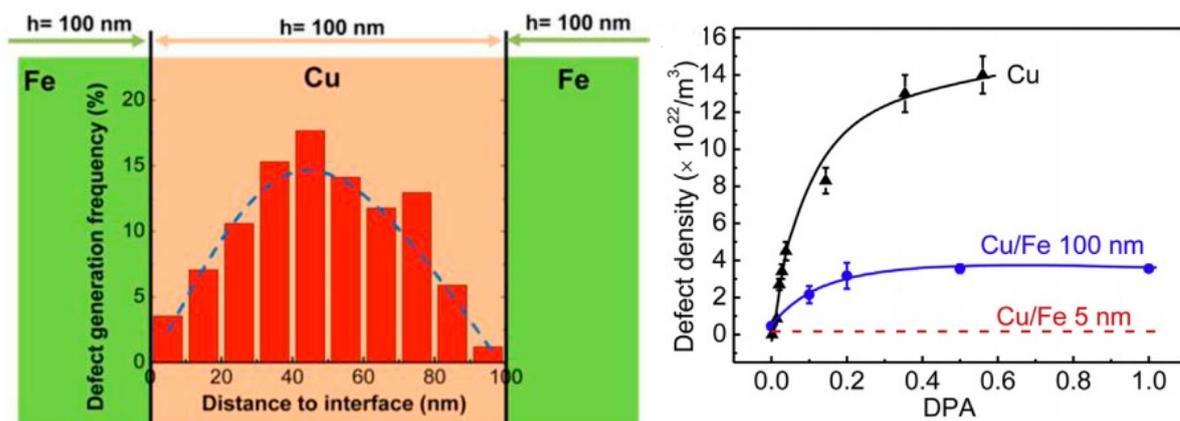


Рисунок 16 – (а) Профиль распределения концентрации дефектов в Cu/Fe многослойном покрытии в результате облучения ионами Cu; (б) зависимость плотности дефектов от полученной дозы.

Как видно из рисунка наибольшая концентрация дефектов наблюдается в середине слоя, а наименьшая вблизи границы раздела. На рисунке 16 (б) представлена зависимость плотности дефектов от полученной дозы, для сравнения представлены результаты для чистой меди. Можно заметить, что в многослойном покрытии Cu/Fe – 100 нм, концентрация дефектов значительно меньше чем в чистой меди, также прослеживается тенденция насыщения при дозе 0.2 сна после которой плотность дефектов остается стабильной. Для покрытия Cu/Fe – 5 нм плотность дефектов была еще меньше и практически никакой зависимости от дозы не наблюдалось.

Глава 3. Влияние облучения протонным пучком на структуру Zr/Nb многослойного покрытия

В данной главе будет дан краткий обзор методам, использовавшимся в исследовании, а также будут представлены результаты исследований.

3.1 Материалы и методы

3.1.1 Параметры образцов наноразмерного многослойного Zr/Nb покрытия

В данной работе исследованию подверглись образцы Zr/Nb металлического многослойного покрытия. Цирконий и ниобий имеют различные кристаллические структуры, ГПУ и ОЦК соответственно, следовательно, данный композит имеет некогерентную, несмешиваемую границу раздела, обеспечивающую высокую радиационную стойкость нанокompозита в целом.

Нанокompозитные покрытия осаждались методом магнетронного распыления Zr (чистота 99,99%) и Nb (чистота 99,99%) мишеней на подложку монокристаллического Si (100). Общая толщина полученных покрытий составила 1350 нм, толщина индивидуальных слоев: 57 нм для Zr и 39 нм для Nb. Многослойная структура была получена путем поочередного открытия и закрытия затворов у каждой из мишени, время подбиралось исходя из скорости осаждения покрытий, которое составляло для Zr 0,1 нм в секунду, для Nb 0,15 нм в секунду, при давлении в камере 0,5 Па. Нанесение происходило в атмосфере аргона, без подогрева подложки. Сводные данные по образцам представлены в Таблице 2.

Таблица 2– Общие данные по Zr/Nb нанокompозиту

Название слоя	Тип кристаллической структуры	Тип границы раздела	Количество индивидуальных слоев	Толщина индивидуально го слоя, нм	Общая толщина покрытия, нм
Zr	ГПУ	некогерентная	14	57	1350
Nb	ОЦК		14	39	

3.1.2 Моделирование в программном пакете TRIM. Расчет глубины пробега протонов в зависимости от энергии пучка.

Пакет программ TRIM (SRIM) предназначен для моделирования физических процессов возникновения каскадов радиационных дефектов при облучении слоистых твердотельных композиций быстрыми протонами, альфа-частицами и ионами с большей массой

Перед непосредственным облучением образцов было проведено моделирование в программном пакете TRIM–2013 с целью определения условий облучения, обеспечивающих торможение основной части протонов в покрытии. Стоит отметить, что имеются некоторые ограничения по выбору энергии пучка, о причинах которых будет сказано позднее.

3.1.3 Облучение протонами на линейном ускорителе ЭСГ-2.5

Облучение образцов пучком протонов проводилось на линейном ускорителе ЭСГ–2,5. Энергия пучка составила 900 кэВ для всех образцов, ионный ток составил 2 и 4 мкА, время облучения варьировалось от 1 до 3 часов. Энергия 900 кэВ была выбрана в виду некоторых машинных

особенностей ускорителя, при низких энергиях, порядка 100-300 кэВ система стабилизации напряжения не позволяет поддерживать стабильность ионного тока пучка. Перед помещением в камеру ускорителя, для торможения протонов (снижения энергии), образцы были обернуты в алюминиевую фольгу толщиной 11 мкм, упрощенная схема представлена на рисунке 17. Как видно из рисунка, образцы помещались под прямой пучок с углом падения 90° , диаметр пучка составил 6 мм.

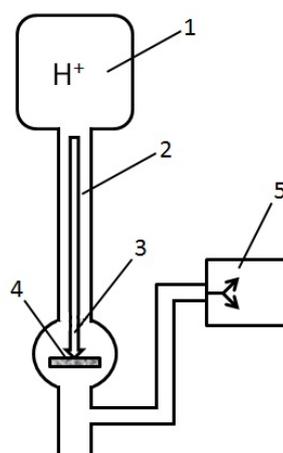


Рисунок 17 – Упрощенная схема расположения образцов в ускорителе ЭСГ-2,5; 1 – источник протонов и ускоряющая система, 2 – ионопровод, 3 – пучок протонов, 4 – образец, 5 – вакуумная система

В таблице 3 представлены параметры облучения – энергия пучка и ионный ток, также представлены дозы и интенсивности облучения.

Таблица 3 – Параметры облучения и дозы, полученные в процессе облучения

Номер образца	Энергия пучка, кэВ	Время облучения, ч	Ионный ток пучка, мкА	Доза облучения		
				протон/см ²	сна	сна/с
1	900	1	2	4.5×10 ¹⁶	0,064	1.78×10 ⁻⁵
2		2		9×10 ¹⁶	0,129	

3		3		1.35×10^{17}	0,193	
4		1	4	9×10^{16}	0,129	3.56×10^{-5}

3.1.4 Оценка дефектной структуры методом измерения электрического сопротивления

Измерение электрического сопротивления до и после облучения является одним из наиболее доступных и используемых методов оценки дефектной структуры проводящих материалов. Как известно электрическое сопротивление зависит от наличия дефектов.

Измерение электрического сопротивления проводилось четырехзондовым методом. Данный метод основан на расчете электрического сопротивления по измерению разности потенциалов в двух точках, расположенных на плоской поверхности, при пропускании через два точечных контакта, расположенных на той же поверхности, электрического тока определенной величины. Блок схема установки приведена на рисунке 18.

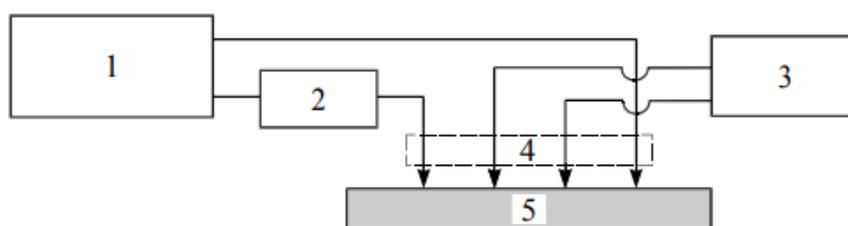


Рисунок 18 – Блок-схема установки по измерению электрического сопротивления; 1 – источник постоянного тока; 2 – устройство для измерения силы и направления тока; 3 – устройство для измерения разности электрических потенциалов; 4 – четырехзондовая головка; 5 – образец.

3.1.5 Рентгеноструктурный анализ. Расчет размера кристаллитов и величины микронапряжения.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) был использован для изучения кристаллической структуры. РСА позволяет выявить наличие новых фаз в результате облучения, а так же присутствие явления аморфизации. Также из результатов можно оценить размер кристаллитов по области когерентного рассеяния (ОКР) и величину микронапряжений.

Рентгеноструктурный анализ был проведен на установке Shimadzu XRD-700S с $\text{CuK}\alpha$ излучением, непосредственно перед облучением и после. Из результатов рентгеноструктурного анализа, используя известное соотношение Дебая–Шеррера (1), были посчитаны размеры кристаллитов для плоскостей Zr (0002) и Nb (110).

$$l = \frac{0.94 \cdot \lambda}{FWHM \cdot \cos\theta} \quad (1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения,

FWHM – величина ширины пика на полувысоте,

θ – угол дифракционного отражения

Микронапряжение для тех же плоскостей было посчитано из соотношения (2).

$$\varepsilon = \frac{0.94 \cdot \lambda}{4 \cdot l} \quad (2)$$

3.6 Анализ механических свойств облученных образцов

Изменение механических свойств металлов в результате их облучения является косвенным критерием присутствия радиационно-индуцированных дефектов. Как известно в случае многослойных покрытий на величину упрочнения также влияют, тип границы раздела и толщины индивидуальных слоев. Метод наноиндентирования является самым распространенным методом определения радиационного упрочнения у наноразмерных многослойных покрытий. Метод наноиндентации позволяет получить так называемые кривые нагружения-разгружения из которых можно определить не только величину твердости, а так же величину модуля Юнга.

Оценка твердости и модуля Юнга, исходных и облученных покрытий проводилось методом наноиндентирования с использованием индентора Берковича. Для того чтобы исключить влияние подложки, глубина индентирования для каждого образца не превышала 10% процентов от толщины покрытия. Нагрузка при индентировании менялась от 1 до 8 мН, время нагружения составило 15 сек.

3.2. Результаты и их обсуждение

3.2.1 Моделирование в программном пакете TRIM-2013

Моделирование проводилось с энергией пучка 900 КэВ, в режиме моделирования полного каскада столкновений, количество событий составило 10^6 (количество налетающих частиц). При такой энергии пучка пробег протонов составлял более 10 мкм, что не соответствует поставленным требованиям. Для снижения энергии пучка было решено обернуть образцы алюминиевой фольгой, толщина которой была подобрана из результатов по моделированию и составила 11 мкм, на рисунке 19 (а) изображен профиль распределения протонов по глубине образцов (распределение по фольге не показано).

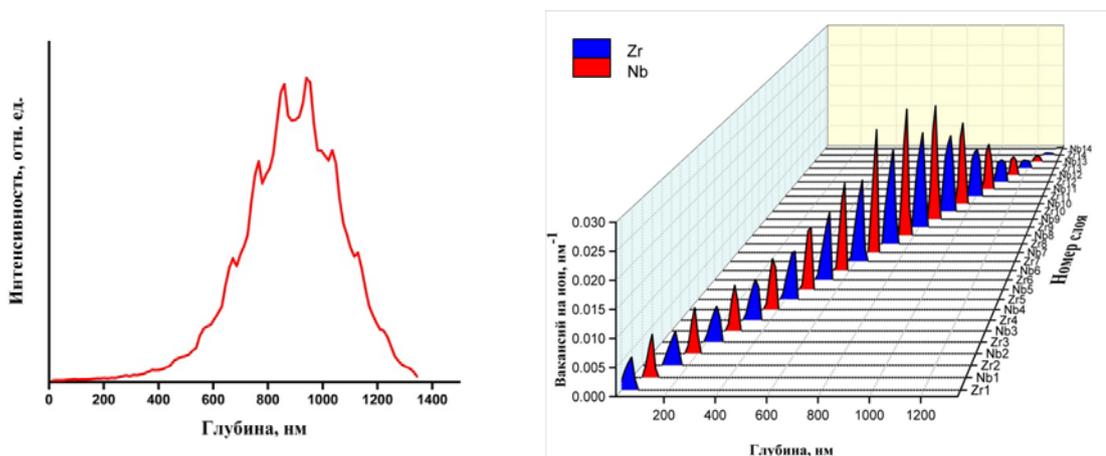


Рисунок 19. Результаты моделирования TRIM–2013, (а) профиль распределения протонов по глубине, (б) послойное распределение вакансий

Также было определено послойное распределение вакансий (Рисунок 19 (б)), что позволило в последующем рассчитать количество смещений на атом (сна).

Исходя из значений ионного тока, времени облучения и данных по распределению вакансий полученных по результатам моделирования стало

возможным определить дозу облучения в размерности протон/см² и что более важно количество смещений на атом, а также скорость образования дефектов (сна/с) (Таблица 3). Определение дозы облучения производилось с помощью следующего выражения:

$$D = \frac{I/e \cdot t}{S} \quad (3)$$

где I – ионный ток пучка,

e – элементарный заряд,

t – время облучения

S – площадь пучка,

Количество смещений на атом можно определить из следующего выражения:

$$d = \frac{D \cdot \vartheta_{p.i.}}{N_{at.}} \quad (4)$$

где D – доза облучения,

$\vartheta_{p.i.}$ – количество производимых вакансий, полученное из моделирования в TRIM,

$N_{at.}$ – атомная плотность металла.

3.2.2 Анализ изменения электрического сопротивления

По результатам измерения электрического сопротивления (рис. 20) было выявлено уменьшение электрического сопротивления, наибольшее уменьшение сопротивления 24% имеет место при облучении в течение 1 часа при токе ионного пучка 2 мкА. Рассчитанное значение дозы составило 0,064 сна.

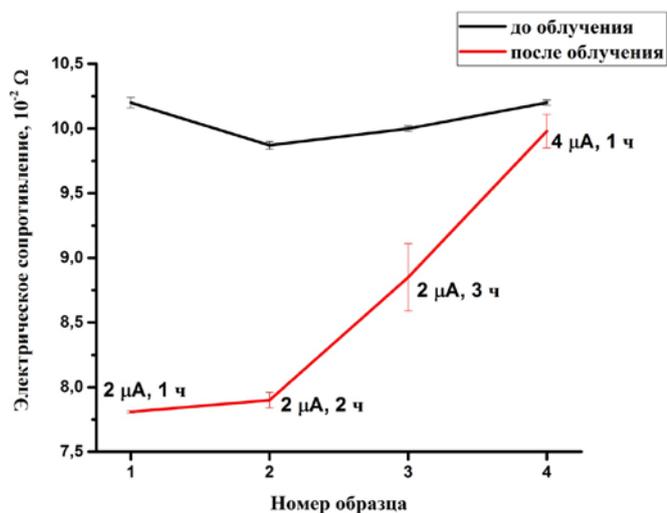


Рисунок 20 – Электрическое сопротивление образцов до и после облучения

Более длительное облучение приводит к обратному увеличению сопротивления, и, при облучении в течение 3 часов (доза – 0,193 с.н.а) падение сопротивления составляет 11% от сопротивления исходного покрытия. Стоит обратить внимание на образцы подвергшиеся облучению протонным пучком с током 2 мкА – 2 часа, и 4 мкА – 1 час. Дозы в этом случае одинаковые и составляют 0,129 сн.а, но скорость образования дефектов для тока 4 мкА в два раза выше, что приводит к кардинальным различиям в значения электрического сопротивления.

3.2.3 Рентгеноструктурный анализ

Представленные на рисунке 21 дифрактограммы показывают, что радиационное воздействие приводит к смещению рефлексов (0002) Zr (б) и (110) Nb (в) вправо, что говорит о присутствии механических напряжений.

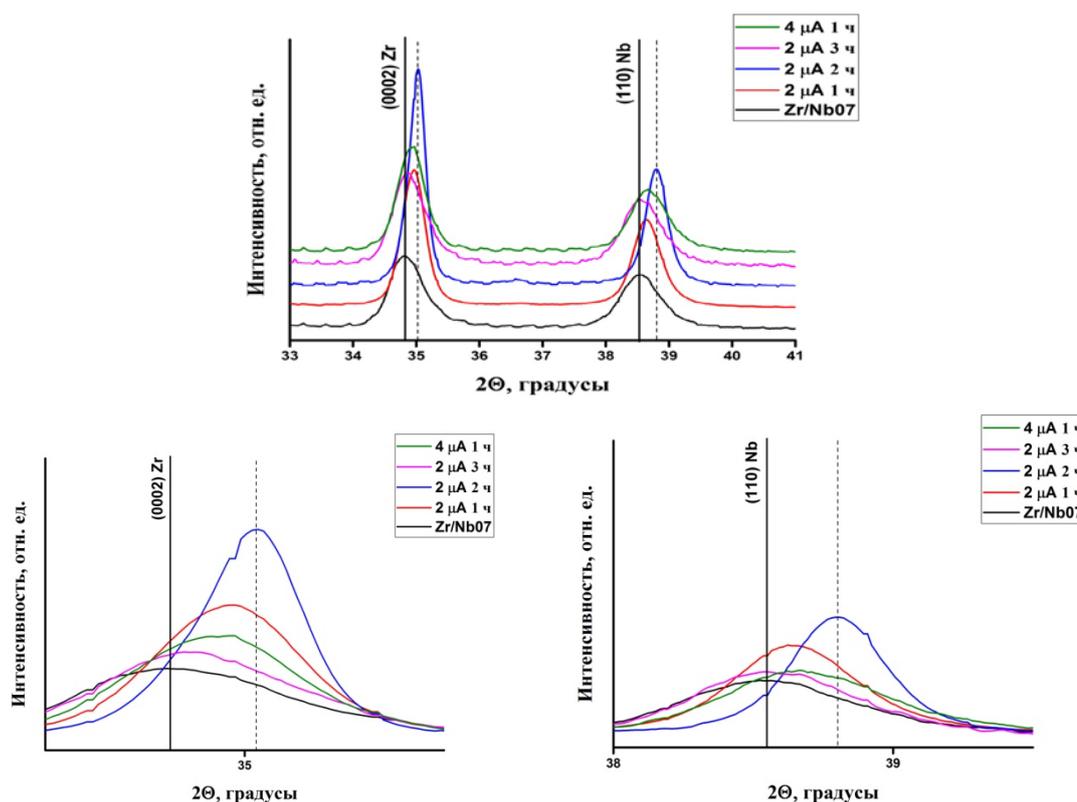


Рисунок 21 – Результаты рентгеноструктурного анализа после воздействия протонным пучком (а), представлены детальные результаты для плоскостей (0002) Zr и (110) Nb (б)

Из результатов рентгеноструктурного анализа была определена ширина пика на полувысоте (FWHM). Для всех режимов облучения отмечено уменьшение значения FWHM, для образца, облученного при токе 2мкА и времени облучения 2 часа величина FWHM оказалась наименьшей, при дальнейшем увеличении времени облучения до 3-ех часов отмечено увеличение значения FWHM (Таблица 4, 5). Размеры ОКР также сильно различались для различных параметров облучения, наибольшее увеличение в размерах ОКР, рассчитанных по формуле (1), было зафиксировано для образцов с током протонного пучка 2 мкА и временем облучения 1 и 2 часа (Таблица 4, 5). Увеличение размера ОКР может быть вызвано смещением атомов из положения равновесия при возникновении каскада столкновений и

подвижностью границ зерен во время облучения, что приводит к упорядочиванию структуры.

Таблица 4 – Структурные данные для плоскости (0002) Zr до и после облучения

Параметры облучения	2 θ , градусы	FWHM, градусы	Размер ОКР (l), нм	Микронапряжение (ϵ)
не облученный	34,85	0,69	12,51	0,0029
2 мкА, 1 ч	34,96	0,47	18,71	0,00194
2мкА, 2 ч	35,01	0,35	25,04	0,00145
2мкА, 3 ч	34,89	0,67	12,93	0,0028
4мкА, 1 ч	34,92	0,55	15,84	0,00229

По формуле (2) было посчитано микронапряжение для плоскостей (0002) Zr и (110) Nb, результаты представлены в таблицах 4, 5. Было установлено, что облучение при токе 2 мкА и времени 1 и 2 часа значительно снижает уровень микронапряжений. Из проведенного рентгеноструктурного анализа можно сделать вывод, что облучение при токе 2 мкА и времени 1 и 2 часа вызывает наибольшее изменение в структуре образцов. Значительно увеличиваются размеры кристаллитов, уменьшаются микронапряжения. Для образцов, облученных при 2 мкА и времени 3 часа и 4 мкА и времени 1 час, значения размера кристаллитов, микронапряжения практически не отличаются от исходных. Стоит отметить, что при токе 4 мкА и времени облучения 1 час изменения меньше чем при токе 2 мкА и времени облучения 2 часа, хотя доза при данных режимах одинакова.

Таблица 5. Структурные данные для плоскости (110) Nb до и после облучения

Параметры облучения	2 θ , градусы	FWHM, градусы	Размер кристаллитов (l), нм	Микронапряжение (ϵ)
не облученный	38,55	0,80	10,93	0,00331
2 мкА, 1 ч	38,65	0,58	15,13	0,00239
2мкА, 2 ч	38,80	0,45	19,57	0,00185
2мкА, 3 ч	38,58	0,79	11,02	0,00329
4мкА, 1 ч	38,69	0,76	11,53	0,00314

3.2.4 Анализ изменения твердости и модуля Юнга

Сформированные наноразмерные многослойные покрытия имеют высокие механические характеристики: твердость 4,9 ГПа и модуль Юнга 128,9 ГПа. Облучение протонным пучком вызвало значительные изменения в показателях механических свойств: твердости и модуля Юнга (Рисунок 22).

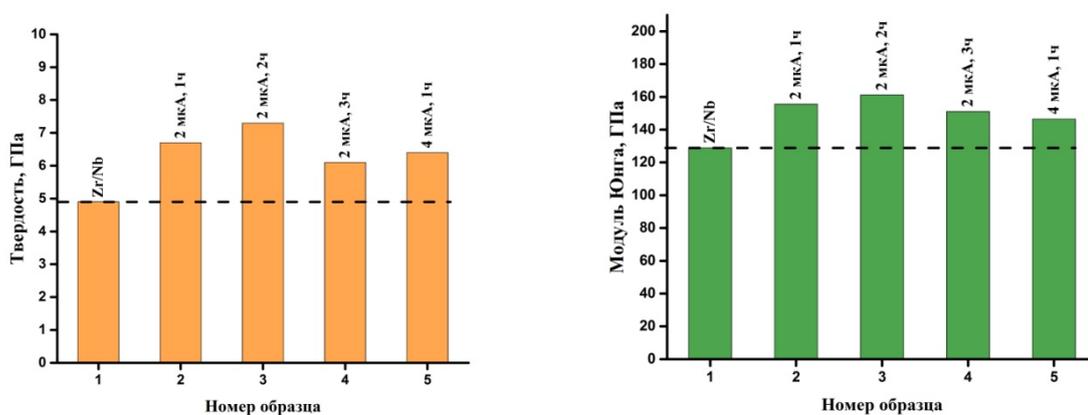


Рисунок 22 – Твердость (а) и модуль Юнга (б) для облученных и не облученных образцов

После облучения протонами наблюдается увеличение твердости и модуля Юнга покрытий: на 37% и 21% (2 мкА, 1 ч), 49% и 25% (2 мкА, 2 ч), 24% и 17% (2 мкА, 3 ч), 48% и 13% (4 мкА, 1 ч) соответственно.

Увеличение показателей твердости и модуля Юнга может быть связано с двумя механизмами упрочнения: радиационное упрочнение и модифицирование границы раздела вследствие стока дефектов к ней.

3.2.5 Обсуждение полученных результатов

По результатам проведенных исследований можно с достаточной степенью уверенности заключить, что в образцах Zr/Nb покрытий произошли

значительные радиационно-индуцированные изменения микроструктуры. Об этом свидетельствуют значительные изменения в величинах электрического сопротивления, смещение рефлексов на дифрактограммах, изменениях в значениях FWHM и как следствие изменение размеров кристаллитов и микронапряжений.

- Для режима ионного тока 2 мкА и времени облучения 1 час (0,064 сна, 1.78×10^{-5} сна/с) было зафиксировано значительное изменение в исследуемых параметрах. Снижение электрического сопротивления на 23,4%, уменьшение значения микронапряжения на 33,1 и 27,8% для плоскостей Zr(0002) и Nb (110) соответственно, увеличение твердости и модуля Юнга на 37 и 21% соответственно.
- Для режима ионного тока 2 мкА и времени облучения 2 час (0,128 сна, 1.78×10^{-5} сна/с) было зафиксировано самое значительное уменьшение значения микронапряжения для плоскостей Zr(0002) и Nb (110), которое составило 50 и 44,1% соответственно; самое значительное увеличение твердости и модуля Юнга на 49 и 25% соответственно. Уменьшение значения электрического сопротивления составило 19,9%
- Увеличение дозы облучения до 0,193 сна (2 мкА, 3 ч, 1.78×10^{-5} сна/с), было зафиксировано падение всех значений относительно дозы 0,128 сна. Относительно же значений до облучения: электрическое сопротивление уменьшилось на 11,5%, значения микронапряжения для плоскости Zr(0002) уменьшилось на 3,4% для плоскости Nb (110) изменений не замечено, увеличение твердости и модуля Юнга составило 24 и 17% соответственно.
- При увеличении интенсивности получаемой дозы до $3,56 \times 10^{-5}$ сна/с (4 мкА, 1ч, 0,128 сна) были выявлены следующие изменения в исследуемых параметрах: уменьшение значения микронапряжения на 21 и 5,1% для плоскостей Zr (0002) и Nb (110) соответственно; увеличение твердости и модуля Юнга на 48 и 13% соответственно. Уменьшение электрического сопротивления составило всего лишь 2,1%.

На рисунке 23 изображен график, демонстрирующий изменение в значениях измеряемых величин (электрического сопротивления, микронапряжения, твердости) в зависимости от дозы и интенсивности облучения протонами.

Для образцов 2 и 3, получившие дозы 0,064 и 0,128 снэ, видно наглядное уменьшение величины микронапряжения и сопротивления с одновременным увеличением твердости. При достижении дозы 0,193 снэ (образец 4) можно заметить резкое падение всех измеряемых величин по сравнению с образцами 2 и 3, данное явление может быть связано с насыщением образца первичными дефектами и их последующим объединением в комплексы. Что приводит к росту микронапряжений, резкому увеличению сопротивления и к эффекту разупрочнения.

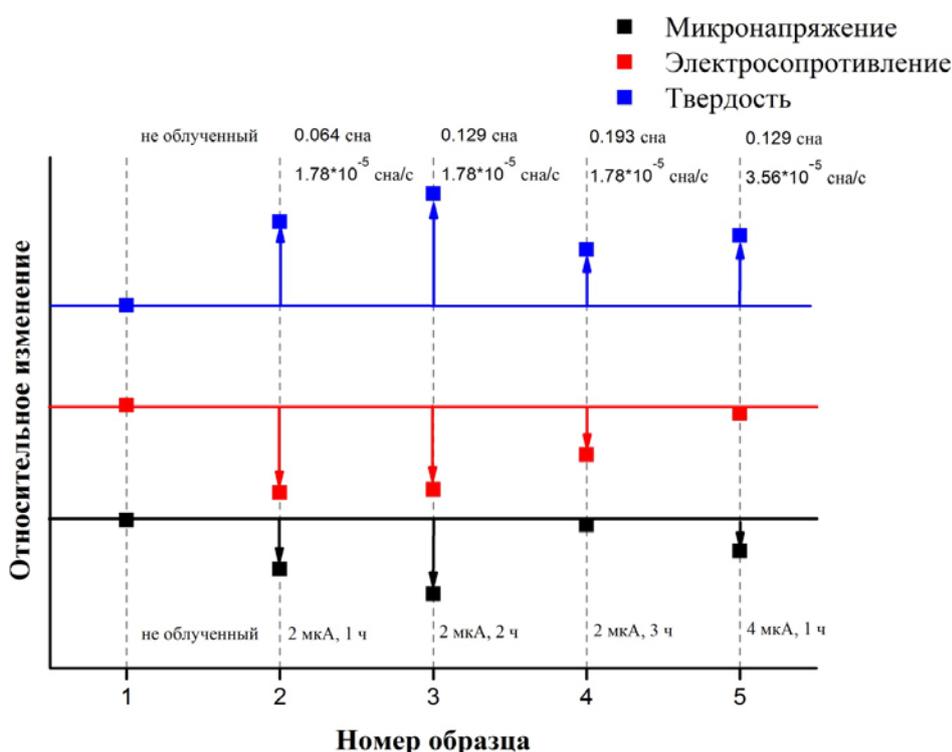


Рисунок 23 – Относительные изменения в значениях электрического сопротивления, микронапряжения и твердости, до и после облучения.

Для образца 5 имеющего самую высокую скорость образования дефектов можно отметить незначительные изменения по отношению к

исходному состоянию. Столь незначительные изменения, скорее всего, вызваны увеличением температуры во время облучения, ввиду повышенной интенсивности излучения, которое приводит к большей подвижности первичных дефектов, особенно вакансий, результатом чего является усиленная рекомбинация дефектов во время облучения.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целесообразность выполнения тех или иных исследований в современном мире определяется коммерческой ценностью работы - ее финансовой выгодностью. Оценка коммерческой ценности (потенциала) исследований является обязательным условием в поиске источников финансирования для проведения научной работы и коммерциализации ее результатов. Это представляет важность для исследовательских организаций, которые должны оценить перспективы проводимых научных исследований. Благодаря такой оценке учёный может рассматривать поиски партнеров для дальнейшего проведения научного исследования, планировать коммерциализацию результатов своих результатов и запуск собственного производства.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В рамках проведенной научной работы было исследовано влияние облучения протонным пучком на структуру и механические свойства наноразмерного многослойного металлического покрытия Zr/Nb. Основой к проведению данного исследования являются уже имеющиеся разработки в сфере многослойных наноразмерных покрытий говорящие об их исключительной радиационной стойкости и выдающихся механических качествах.

На данном этапе, результаты исследования представляют особый интерес для научных групп, занимающихся исследованиями в области взаимодействия наноструктурных некогерентных включений и радиационно-индуцированных дефектов. Потенциальными потребителями результатов исследования является энергетическая отрасль, а именно использование

данного материала для защиты конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов нового поколения. Также потенциальным потребителем является аэрокосмическая отрасль ввиду необходимости использования в ней стойкой к радиации микроэлектроники.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

С целью успешного вывода разработки на рынок, необходимо постоянно и систематически проводить анализ аналогичных товаров конкурирующих групп, т.к. новые разработки постоянно появляются и изменяются с течением времени. Анализ группы конкурирующих товаров необходимо проводить с целью внесения, в научное исследование, важных корректировок и исправлений, целью которых является постоянное повышение конкурентоспособности товара (разработки) на рынке.

Рассматривая вышеописанный анализ с точки зрения ресурсосбережения и ресурсоэффективности, мы получаем группу показателей сравнительной эффективности научной разработки и определяем пути и возможности ее развития и востребованности в обозримом будущем.

Конечным этапом данного исследования является обоснование использования наноразмерных многослойных металлических композитов (Бф) в радиационно-агрессивных средах. Исходя из проведенных сторонних исследований, в роли конкурирующего материала (К1) в данной сфере были выбраны нанокристаллические металлы. Оба этих материала имеют ряд достоинств и недостатков. В таблице 6 представлена оценочная карта для сравнения конкурентоспособности двух данных материалов при их использовании в качестве радиационно-стойких материалов.

Таблица 6 Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _{кф}	К _{к1}
Технические критерии оценки эффективности					
Простота в производстве	0,15	2	4	0,3	0,6
Вариативность производства	0,08	2	3	0,16	0,24
Радиационная стойкость	0,1	5	4	0,5	0,4
Механические свойства	0,1	5	3	0,5	0,3
Возможность создания сложных геометрических форм	0,07	3	4	0,21	0,28
Надежность	0,1	4	3	0,4	0,3
Термоустойчивость	0,1	4	2	0,4	0,2
Экономические критерии оценки эффективности					
Затраты на создание	0,1	3	4	0,24	0,32
Предполагаемый срок эксплуатации	0,15	4	2	0,48	0,24
Уровень проникновения на рынок	0,05	2	3	0,1	0,15
Итого	1	34	31	3,47	3,21

По итогам анализа, представленным в карте сравнения оценок конкурентных разработок, можно сделать вывод, что использование наноразмерных многослойных металлов в качестве радиационно-стойкого материала имеет конкурентное преимущество над нанокристаллическими металлами. Особенно в таких важнейших параметрах как срок эксплуатации, радиационная стойкость, механические качества. Но в то же время имеет

место проигрыш в таких параметрах как простота производства и вариативность производства, который может быть устранен ввиду новых разрабатываемых методик производства.

4.3 SWOT анализ

С целью исследования внешней и внутренней сред разработки применяется анализ комплексный SWOT–анализ научно-исследовательской разработки. Специфика такого анализа характеризуется следующими этапами.

В первую очередь определяются сильные и слабые стороны реализованного, в выпускной работе, проекта. На следующем этапе выявляют возможности проекта, которые включают в себя все предпочтительные ситуации, возникающие в окружающей среде проекта. Последним этапом является выявление угроз для проекта, которые включают в себя все неблагоприятные для проекта ситуации, тенденции или изменения в окружающей среде проекта. В конечном счете, производится анализ интерактивной таблицы в виде записи наиболее коррелирующих слабых и сильных сторон и возможностей.

Итогом данного анализа является матрица SWOT, в которой приведены все составляющие данного проекта.

Таблица 7 – Матрица SWOT

	Сильные стороны: С1: Малый разброс энергии пучка С2: Неразрушающие методы контроля С3: Высокая скорость	Слабые стороны: Сл1: Большие габариты ускорителя Сл2: Длительное время выхода ускорителя на рабочий режим
--	--	---

	<p>проведения рентгеноструктурного анализа</p> <p>С4: Простота измерения электрического сопротивления</p>	<p>Сл3: Большой фактический возраст ускорителя</p> <p>Сл4: Погрешность в измерении электрического сопротивления</p> <p>Сл5: Невозможность определения концентрации дефектов</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1: Использование других типов ионов</p> <p>В2: Изучения влияния термического фактора</p>	<p>Получение достоверной информации в зависимости от типа ионов.</p> <p>Возможность повторного использования образцов.</p>	<p>Сложность реализации и неполнота получаемой информации способствует повышению спроса на конкурентные решения</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1: Несвоевременное финансирование научного исследования при дальнейшем развитии проекта.</p> <p>У2: Развитая конкуренция технологий исследования.</p> <p>У3: Выход из строя устаревшего</p>	<p>Получение патента на полезную модель.</p> <p>Проведение аттестационных испытаний.</p> <p>Изменение ориентированности исследования</p>	<p>Привлечение дополнительных инвестиций для технологии исследования, путем участия в грантах.</p>

оборудования		
--------------	--	--

4.4 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения исследовательского проекта формируется рабочая (научная) группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и 44 преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность группы может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Для дальнейшей оценки экономической эффективности составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и распределение исполнителей по видам работ (таблица 8).

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Этапы работы	№ раб,	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение тех. задания – постановка цели, определение задач	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	2	Изучение специальной литературы по теме работы	Студент
	3	Нанесение покрытий	Студент
	4	Моделирование условий облучения, подбор режимов, подготовка образцов	Студент
	5	Облучение образцов	Руководитель, студент
	6	Измерение электросопротивления	Студент
	7	Проведение рентгеноструктурного анализа	Студент
	8	Оценка адекватности и достоверности результатов	Руководитель, студент

Оценка результатов	9	Составление отчета НИР	Студент
--------------------	---	------------------------	---------

4.5 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Для планирования НИР была выбрана диаграмма Ганта, которая представляет собой тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта.

Для построения диаграммы Ганта необходимо определить длительность каждого из этапов работы (таблица 9).

Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Исп,	Трудоемкость			Длительность в рабочих днях, T_{pi}	Длительность в календарных днях, T_{ki}
		t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож}$, чел-дни		
Составление ТЗ, планирование эксперимента	Руководитель	4	8	5,6	5,6	7
Изучение литературы	Студент	35	55	43	43	52
Нанесение покрытия	Студент	7	14	9,8	9,8	12
Моделирование	Студент	15	20	17	17	21
Облучение образцов	Руководитель, студент	15	25	19	9,5	12
Измерение электросопротивления	Студент	7	14	9,8	9,8	12
Проведение РСА	Студент	7	14	9,8	9,8	12
Оценка результатов	Руководитель, студент	30	40	34	17	21

Составление отчета НИР	Студент	50	55	52	52	64
------------------------	---------	----	----	----	----	----

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

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

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

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

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

Трудоемкость выполняемой работы для руководителя составила 58,6 чел.-дней. для студента 194,4 чел.-дней.

Исходя из ожидаемой трудоемкости 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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (6)$$

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

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

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

Длительность каждого этапа в календарных днях рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (7)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (8)$$

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

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

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

Так, продолжительность выполнения исследования для научного руководителя составила 32,1 рабочих и 47 календарных дней, для студента 168 рабочих и 188 календарных.

Диаграмма Ганта представлена в приложении А.

4.6 Бюджет научно – технического исследования

При планировании бюджета НИР должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета НИР используется следующая группировка затрат по статьям:

- 1) материальные затраты НИР;
- 2) затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- 3) основная и дополнительная заработная плата исполнителей;
- 4) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 5) затраты на научные и производственные командировки;

- 6) контрагентные расходы;
- 7) накладные расходы.

Остановимся более подробно на расчетах основных затрат.

4.6.1 Расчет материальных затрат

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. В эту статью входят затраты на сырье, материалы, используемые в процессе НИР, комплектующие изделия и т.д. В материальные затраты также включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы, Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Материальные затраты на покупку сырья, материалов и комплектующих изделий приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Мишень из циркония	ТПЧ, 100х6мм	1	32375	32375
Мишень из ниобия	ТПЧ, 100х6 мм	1	23901	23901
Всего за материалы				56276
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1970
ИТОГО				58246

4.6.2 Расчет затрат на специальное оборудование

Данная статья включает в себя все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной

аппаратуры, стендов, устройств и механизмов). необходимого для проведения работ. В данной работе использовалось уже имеющееся оборудование. и закупка специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют.

Однако в ходе эксплуатации основного оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями. Так, расчет амортизационных отчислений производился линейным методом, результаты расчетов сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Амортизационные расходы

Наименование прибора	Стоимость, руб.	Срок полезного использования, лет	Норма амортизации, %	Срок эксплуатации, дней	Амортизационные расходы, руб.
Установка «Радуга – спектр»	10500000	15	6,6	10	23411
Установка «Shimadzu XRD-700S»	14800000	15	6,6	10	32998
Комплекс для измерения электросопротивления	115000	7	14	10	549
ИТОГО					56958

4.6.3 Расчет основной и дополнительной заработной платы

Данная статья включает в себя затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в выполнении НИР (включая премии, доплаты), и дополнительную заработную плату.

Для расчета основной заработной платы был сформирован баланс рабочего времени, приведенного в таблице 12.

Таблица 12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	
Количество нерабочих дней	66	66
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (9)$$

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

$M = 10,4$ месяцев, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд.

Основная заработная плата:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (10)$$

где $T_{\text{р}}$ – продолжительность работ

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (11)$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент (для Томска 1,3)

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 13

Таблица 13 – Основная заработная плата

Исполнитель	$Z_{\text{б}}$, руб	$Z_{\text{дн}}$, руб	$T_{\text{р}}$, дней	$Z_{\text{м}}$, руб	$Z_{\text{осн}}$, руб
Руководитель	14584	786	32,1	18959	25216
Студент	9893	533	167,9	12860	89470
ИТОГО					114686

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

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

Размер дополнительной заработной платы для руководителя составил 3278 руб., для студента 11631 руб.

4.6.4 Отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы

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. Для расчета отчислений во внебюджетные фонды воспользуемся формулой:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (13)$$

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

Таблица 14 Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Размер основной заработной платы, руб.	Размер дополнительной заработной платы, руб.
Руководитель	25216	3278
Студент	89470	11631
Коэффициент внебюджетных отчислений	0,271	
Итого: 35120 руб.		

Накладные затраты в виде затрат на электроэнергию представлены в таблице 15. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5,8 рубля за 1 кВт/час.

Таблица 15 Затраты на электроэнергию

Оборудование	Мощность, кВт	Время работы, ч	Сумма, руб.
«Радуга – спектр»	8	19,6	910
Shimadzu XRD-700S	2,5	14,7	213
ЭСГ – 2,5	70	28,5	11571
Комплекс для измерения электросопротивления	0,6	29,4	102
ПК	0,3	158,4	276
Освещение	0,48	250,6	698
Итого			13770

4.6.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Формирование бюджета научно-исследовательского проекта является основой для определения бюджета затрат проекта, и формируется исходя их вышеприведенных расчетов. Результатом является таблица 16 расчетов бюджета затрат НИИ.

Таблица 16 Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб,
1. Материальные затраты НИИ	58246
2. Амортизационные отчисления	56958
3. Затраты по основной заработной плате	114686

исполнителей темы	
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	14909
5. Отчисления во внебюджетные фонды	35120
6. Накладные расходы	13770
7. Бюджет затрат НТИ	293689

4.7 Определение ресурсной эффективности исследования

Интегральный показатель ресурсной эффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (14)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

В качестве возможных вариантов исполнения выберем реализованный способ, а также два альтернативных варианта: вариант с закупкой оборудования у сторонних организаций и последующее выполнение работ по его самостоятельному монтажу и использованию в рамках НТИ, а также вариант с закупкой оборудования и заказом на выполнение работ по его монтажу и вводу в эксплуатацию у сторонней организации. Покупка оборудования у сторонней организации сократила бы рабочее время исполнителей темы, однако, привнесла бы дополнительную статью расхода. Третий представленный вариант также невыгодным в отношении стоимости проекта, В затраты в этом случае войдут основная и дополнительная заработные платы для высококвалифицированных инженеров,

соответствующие отчисления во внебюджетные фонды, а также затраты на оформление для них производственных командировок.

Таблица 17 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп,1 (реализованное исполнение)	Исп,2 (покупка оборудования)	Исп,3 (покупка оборудования и исполнение сторонней организацией)
1, Цена	0,3	4	2	1
2, Удобство в эксплуатации	0,15	5	5	5
3, Точность	0,2	3	4	5
4, Энергосбережение	0,2	3	4	4
5, Надежность	0,15	3	3	4
ИТОГО	1	18	16	19

Проведем расчет интегрального показателя ресурсоэффективности для каждого варианта исполнения:

$$I_{p-исп1} = 3,6$$

$$I_{p-исп2} = 3,4$$

$$I_{p-исп3} = 3,45$$

Таким образом реализованный вариант является самым ресурсоэффективным.

Глава 5. Социальная ответственность

В данном разделе будет рассмотрена организация рабочего места с учетом требований производственной санитарии, техники безопасности и угроз наступления чрезвычайных ситуаций.

В данной бакалаврской работе для облучения образцов многослойного покрытия использовался линейный ускоритель ЭСГ-2.5, дальнейшие исследования образцов (рентгеноструктурный анализ, измерение электрического сопротивления,) и анализ результатов проводились в лаборатории. Таким образом, в данном разделе будут рассмотрены правила работы на ускорителе, выявлены опасные и вредные производственные факторы, а также будут представлены существующие средства и методы защиты.

5.1 Общие правила работы на ускорителе

Все сотрудники, приступающие к работе на ускорителях, должны пройти медицинский осмотр и сдать экзамен по радиационной безопасности. Периодичность прохождения медицинского осмотра и сдачи экзамена – один раз в год.

Перед началом работ руководитель группы обязан проводить устный инструктаж с каждым сотрудником. Периодичность – один раз в квартал.

Все работающие на ускорителе должны быть снабжены индивидуальными дозиметрами и необходимой спецодеждой (халаты, тапочки, нарукавники пленочные, резиновые перчатки, очки защитные).

Перед включением ускорительной установки дежурный оператор должен:

- а) убедиться в отсутствии людей в помещениях, относящихся к радиационно-опасной зоне;
- б) закрыть все защитные двери ;

- в) проверить исправность блокировок ;
- г) подать звуковой сигнал и сообщить голосом по селектору ;
- д) включить световую сигнализацию.

Вход в зал ускорителя может быть разрешен только начальником смены или дежурным оператором.

Все предметы и детали, находящиеся в радиационно-опасной зоне и подвергающиеся активации при работе ускорителя, должны быть маркированы.

Все выносимые из зала ускорителя детали и материалы необходимо проверить на наличие на них наведенной активности. В случае ее обнаружения указанные предметы следует хранить в специальном помещении до уменьшения (распада) наведенной активности до допустимых уровней.

Разборка камеры ускорителя, мишеней, вакуумного тракта и насосов разрешается только при непосредственном контроле службы РБ.

Изменение режима работы ускорителя в сторону увеличения интенсивности не допускается без санкции службы РБ.

Сотрудники, проводящие ремонтные или профилактические работы с деталями ускорителей, имеющими остаточную активность, должны строго выполнять все требования личной гигиены.

Запрещается:

- а) работа в залах ускорителей без спецодежды и индивидуальных дозиметров;
- б) работа сотрудников, не прошедших медицинский осмотр и не обученных правилам безопасного ведения работ и правилам личной гигиены;
- в) входить в помещения повышенной радиационной опасности (зал ускорителя, залы, через которые выводятся пучки) при наличии рабочего режима работы ускорителя;

г) выносить из залов ускорителей приборы, детали и материалы без проверки на наличие на них наведенной активности;

д) отключение дверных блокировок;

е) увеличение режима работы ускорителя (по энергии и току) без санкции службы РБ;

ж) прием пищи, курение в залах ускорительных установок.

5.2 Выявленные вредные и опасные производственные факторы

При выполнении данной работы были выявлены следующие вредные и опасные факторы:

- 1) Производственный шум
- 2) Микроклимат
- 3) Ионизирующее излучение
- 4) Освещенность
- 5) Поражение электрическим током

5.2.1 Производственный шум

Для работы ускорителя необходимо создание условий сверхвысоко вакуума для чего используется вакуумная система, состоящая из пластинчато-роторных и турбомолекулярных насосов, также в лаборатории, где производились последующие исследования, находятся установки с подобными вакуумными системами.

Влияние шума на организм человека является причиной негативных изменений, прежде всего в органах слуховых, нервных и сердечнососудистых систем. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума для работ, требующих концентрации, работы с повышенными требованиями к мониторингу процессов и дистанционным контролем производственных циклов на рабочих местах в лабораториях с шумовым

оборудованием составляет 75 дБ. Области со звуковым уровнем или эквивалентным уровнем шума выше 80 дБ обозначены знаками безопасности в соответствии с ГОСТ 12.4.026. При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной (СКЗ) и индивидуальной защиты (СИЗ).

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; применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения. В качестве материала можно использовать минеральную вату, гипсокартон, стекловату, базальтовую вату, древесное волокно, вспененный полиэтилен и др.

К СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

5.2.2 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.

Терморегуляция – способность организма при изменении микроклиматических условий регулировать теплообмен с окружающей средой, поддерживая температуру тела на постоянном уровне. Регулирование теплообмена осуществляется путем изменения количества вырабатываемого в организме тепла и путем увеличения или уменьшения передачи его в 38 окружающую среду. В комфортных условиях количество вырабатываемого тепла за единицу времени равно отданному теплу. Такое состояние называется тепловым балансом 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 микроклимата производственных помещений установлены оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха с учетом тяжести выполняемой работы и периодов года. В таблице 18 представлены оптимальные параметры микроклимата в производственных помещениях для легкой категории работ, к которой относятся работы, выполняемые сидя и не требующие физического напряжения.

Таблица 18. Оптимальные параметры микроклимата

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

К допустимым микроклиматическим нормам можно отнести параметры, которые способны вызвать изменение теплового состояния организма. При этом не возникает нарушений состояния здоровья, 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 19.

Таблица 19. Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Холодный	15-28	20-80	0,5<
Теплый			

5.2.3 Освещенность

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

1. Выбор системы освещения. Для производственных помещений всех ПЭВМ назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Система комбинированного освещения принимается в основном для помещений ремонта, регулировки, чистки и пайки аппаратуры и приборов, в прочих случаях следует использовать систему общего (равномерного или локализованного) освещения. Для данной рабочей зоны выбирается расчет

общего равномерного освещения.

2. Выбор источников света. Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для выбранного типа освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы, так как они энергетически более экономичны и обладают большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы.

3. Выбор светильников и их размещение. Светильник – прибор, перераспределяющий свет ламп внутри больших телесных углов и обеспечивающий угловую концентрацию светового потока. Выбор типа светильников основывается на светотехнических требованиях, экономических показателях и условиях среды. Для данной рабочей зоны светильник типа ОДОР-2-40, с двумя люминесцентными лампами мощностью 40 Вт каждая и световым потоком 2300 Лм, длина которого 1227 мм, а ширина 265 мм.

Помещение лаборатории, для которого производились светотехнические расчеты, имеет следующие параметры:

$H = 3700$ – высота помещения(мм)

$A = 7000$ – длина помещения(мм)

$B = 5500$ – ширина помещения(мм)

$h_c = 300$ – высота светильников от перекрытия (мм)

$h_{\Pi} = H - h_c = 3400$ – высота подвеса (мм)

$h_p = 800$ высота рабочей зоны (мм)

$h = h_{\Pi} - h_p = 2600$ – расчетная высота

Основным критерием оптимального расположения светильников является величина $\lambda = L/h$ - наилучшее расстояние между осветительными приборами, уменьшение которого удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Для выбранного типа светильника величина λ составляет 1,1.

Определим наилучшее расстояние между рядами светильников (L) и оптимальное расстояние от крайних светильников до стены (l):

$$L = h \cdot \lambda = 2860 \text{ (мм)}$$

$$l = \frac{L}{3} = 950 \text{ (мм)}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$N_B = \frac{B}{L} = \frac{5500}{2860} = 1.92 \approx 2$$

Число светильников в ряду:

$$N_A = \frac{A}{L} = \frac{7000}{2860} = 2.44 \approx 3$$

Общее число светильников:

$$N = N_a \cdot N_b = 2 \cdot 3 = 6$$

На рисунке 24 изображен план помещения и расположение светильников.

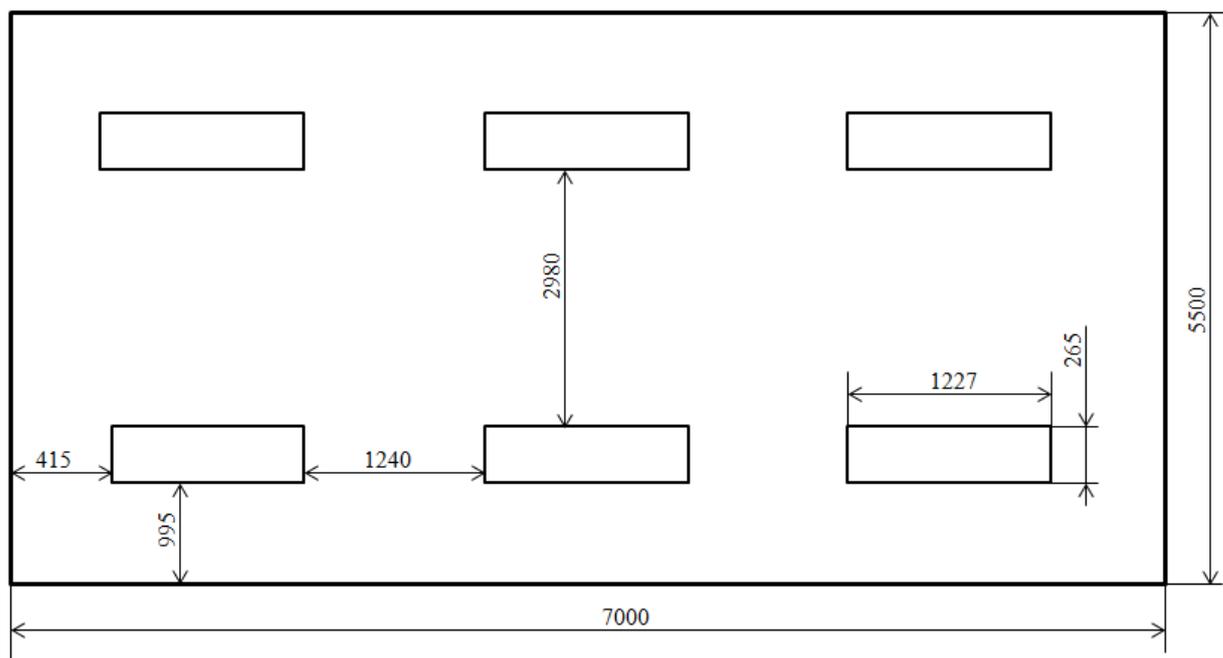


Рисунок 24 – План расположения источников света.

4. Выбор нормируемой освещённости. Основные требования по значениям нормируемой освещённости рабочих поверхностей сформулированы в СНиП 23-05-95. Выбор освещённости основан на таких

условиях как размер объёма различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона. В соответствии с требованиями по работе с ПК, при работе с экраном в сочетании с работой над документами наиболее оптимальной для работы с экраном является освещенность 200 лк.

5. Для произведения расчёта общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности используется метод коэффициента светового потока, который учитывает световой поток, отражённый от потолка и стен. Расчет общего равномерного уровня искусственного освещения горизонтальной поверхности рабочего места производится способом коэффициента светового потока:

$$\Phi_p = \frac{E_n S K_3 Z}{N n} = \frac{200 \cdot 38.5 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{12 \cdot 0.51} = 2076 \text{ (лм)}$$

где E_n – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, $E_n=200$ Лк (Характеристика зрительной работы VI: Грубая (очень малой точности)); S – площадь освещаемого помещения, 38.5 м^2 ; K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли, $K_3=1,5$ (Помещения с малым выделением пыли); Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{\text{ср}}/E_{\text{мин}}$. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1; N – число ламп в помещении, 20; n – коэффициент использования светового потока, 0,51.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

$$i = \frac{S}{h(A + B)} = 1.18$$

Коэффициент отражения стен (свежепобеленное состояние стен с окнами без штор): $\rho_c = 50 \%$;

Коэффициент отражения потолка (свежепобеленное состояние потолка): $\rho_{\text{п}} = 70 \%$

Проверяем выполнение условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{р}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%$$
$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{р}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2300 - 2076}{2300} = 9.7\%$$

Таким образом, освещенность данного помещения находится в оптимальном диапазоне.

Мощность всей осветительной системы составит:

$$P = 12 \cdot 40 = 480 \text{ (Вт)}$$

5.2.4 Ионизирующее излучение

На ускорителе ЭСГ-2.5 при работе с положительно заряженными ионами в помещении с электростатическим генератором в верхней его части возникает высокоэнергетическое, тормозное рентгеновское излучение.

Ионизирующим излучением называется любое излучение, прямо или косвенно вызывающее ионизацию среды (образование заряженных атомов или молекул – ионов). Ионизирующими свойствами обладают космические лучи, природными источниками ионизирующих излучений на земле являются естественно распределенные на ней радиоактивные вещества. Искусственными источниками ионизирующих излучений являются ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц, рентгеновские установки, искусственные радиоактивные изотопы.

Ионизирующее излучение бывает электромагнитным (фотонным) и корпускулярным. К электромагнитному излучению относятся гамма-излучение и рентгеновское излучение. Корпускулярное излучение представляет собой поток частиц с массой покоя отличной от нуля (альфа- и бета- частицы, протоны, нейтроны и др.).

Контакт человека с ионизирующими излучениями представляет серьезную опасность для человека. Опасность этого облучения зависит как от величины поглощенной энергии излучения, так и от пространственного распределения поглощенной энергии в организме человека.

Различные органы и ткани человека обладают неодинаковой радиочувствительностью. Их подразделяют на три группы критических органов. К I группе относят: все тело, гонады и красный костный мозг; ко II группе — мышцы, щитовидную железу, жировую ткань, печень, почки, селезенку, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза и другие органы; кроме органов, относящихся к I и II группам; к III группе — кожный покров, костную ткань, кисти, предплечья, лодыжки и стопы.

Пределы допустимых доз излучения при работе с ионизирующим излучением обозначены в специализированном нормативно правовом акте: «Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» и «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Нормы НРБ-99/2009 сформулированы совместно Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ), Научным комитетом по действию атомной радиации (НКДАР), Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ).

Согласно нормам радиационной безопасности, устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал категории А – лица, работающие с техногенными источниками;
- персонал группы Б – лица находящиеся в области воздействия техногенных источников по условиям работы;
- все население, включая персонал вне сферы производственной деятельности.

Так же для всех категорий облучаемых лиц устанавливаются нормативы предельной дозы равной годовой эквивалентной или

эффективной дозы в организме или тканях. Предельная доза предусматривает условия нормальной работы и предотвращает возникновение детерминированных эффектов, но не включает в себя природного и медицинского облучения. Основные пределы доз для различных категорий населения представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Основные пределы доз от техногенных источников НРБ-99

Нормируемые величины	Предел дозы		
	Персонал		Население
	Группа А	Группа Б	
Эффективная доза за 1 год, мЗв	20	5	1
Эквивалентная доза за 1 год, мЗв:			
в хрусталике глаза	150	37,5	15
коже	500	125	50
кистях и стопах	500	125	50

Помимо годовой предельной дозы на категории накладываются требования предельной дозы облучения за период трудовой деятельности: для персонала 1000 мЗв за 50 лет работы, 70 мЗв для населения за весь период жизни.

К средствам коллективной защиты относятся механизмы защиты рабочих помещений в которых эксплуатируются рентгеновские установки или прочие приборы с ионизирующим излучением. Для обеспечения необходимых защитных качеств, при установке оборудования производят дополнительное укрепление поверхностей стационарными строительными конструкциями из тяжелоатомных материалов, таких как бетон, кирпич и иные строительные материалы способных обеспечивать необходимый уровень защиты от излучения. При проектировании рабочей области учитывается наличие пустот, средств коммуникации и систем

вентиляции помещения, встроенные в толщу стен и такие места оснащают дополнительными мерами защиты.

К средствам индивидуальной защиты рабочего персонала принято относить комплект защитной одежды личного пользования. Различают средства повседневного использования: перчатки, халаты, комбинезоны, спецобувь; и средства кратковременного использования – изолирующие костюмы. Также для защиты жизненно важных органов (желудочно-кишечного тракта, гонад, позвоночника и костей таза) применяют специальные противорадиационные жилеты. Для защиты рук применяют короткие (290 мм) и длинные перчатки из нейринового латекса, при больших дозах излучения из просвинцованной резины с гибкими нарукавниками. Для защиты глаз при мягком α - и β -излучении пригодны обычные стекла, при более высокой энергии β -излучения применяют силикатные и органические стекла. Для защиты от γ -излучения применяют свинцовое стекло и стекло с фосфатом вольфрама. Защитные свойства всех материалов принято рассчитывать в свинцовом эквиваленте, минимальная толщина свинца способная ослаблять излучения так же, как и материал заданной толщины.

На ускорителе ЭСГ-2.5 в качестве защиты от воздействия ионизирующего излучения применяются: предупредительные знаки, защита расстоянием и временем. Также при непосредственной работе ускорителя все операции производятся из пультовой, что исключает попадание персонала под воздействие излучения.

5.2.5 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»).

Всё электрооборудование и приборы должны находиться на специально отведенных местах и заземлены. 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 растет. 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 – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

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 свыше 1000В. По классу опасности помещение относится к помещению с повышенной опасностью поражения электрическим током, ввиду возможности одновременного прикосновения работника к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой. (ПУЭ разд. 1.1.13). В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их

надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Основными электрозащитными средствами в электроустановках напряжением выше 1000 В являются изолирующие штанги, указатели напряжения, а также изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ. К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся диэлектрические перчатки, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления. Освобождение пострадавшего от действия тока напряжением свыше 1000В может быть произведено только одним способом. Это отключение соответствующей части электрической установки специально обученными людьми.

5.3 Чрезвычайные ситуации

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, народному хозяйству и окружающей природной 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 т.д. Природные ЧС могут возникнуть ввиду наводнения, заморозка, урагана и т.д. Рассмотрим по одному примеру ЧС вышеупомянутых типов и соответствующие им действия по обеспечению безопасности.

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 природной среде и материальных потерь в случае их возникновения. Это понятие характеризуется также как совокупность мероприятий, проводимых федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления и организационными структурами РСЧС, направленных на предотвращение чрезвычайных ситуаций и уменьшение их масштабов в случае возникновения (ГОСТ Р22.0.02-94). Комплекс мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера включает меры организационного, организационно-экономического, инженерно-технического и специального характера.

5.3.1 Пожарная безопасность

Одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных ЧС является пожар. Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага. Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. основополагающими законодательными актами в области пожарной безопасности являются Федеральные законы "О пожарной безопасности" и "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности", определяющие общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности регламентирует классификацию зданий по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности. По пожарной опасности помещение и

здание возможно отнести к классу Д, т.е. к помещениям, в которых находятся (обращаются) негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Основными видами защиты различных объектов от пожаров, являются средства сигнализации и пожаротушения. В рассматриваемом здании предусмотрена электрическая пожарная сигнализация, позволяющая быстро и точно указать место возникновения пожара. Сигнализация обеспечивает автоматический ввод в действие предусмотренных на объекте средств пожаротушения и дымоудаления. Также в здании присутствуют пожарные краны, а первичные средства тушения представлены углекислотными огнетушителями ОУ-5.

Особенно опасны пожары возникающие в электроустановках; при возникновении пожара в электроустановке работник, обнаруживший загорание, немедленно сообщает о возникновении пожара по телефону 112 либо по внутренней связи в подразделение по чрезвычайным ситуациям организации (объекта) и лицу, назначенному приказом руководителя организации ответственным за пожарную безопасность, после чего приступить к тушению пожара имеющимися средствами пожаротушения, соблюдая при этом правила охраны труда.

Тушение пожаров в электроустановках осуществляется после снятия напряжения с горящей и соседних установок. В исключительных случаях, когда напряжение с горящих установок снять невозможно, допускается тушение их под напряжением хладоновыми (до 380 В), порошковыми (до 1 кВ) или углекислотными (до 10 кВ) средствами.

Чтобы во время тушения избежать поражения электрическим током, необходимо строго соблюдать безопасные расстояния до электроустановок, использовать в огнетушителях насадки из диэлектрических материалов, а также применять индивидуальные изолирующие средства (диэлектрические калоши, сапоги, перчатки).

На рисунке 25 представлена схема эвакуации в случае возникновения пожара либо другой чрезвычайной ситуации.

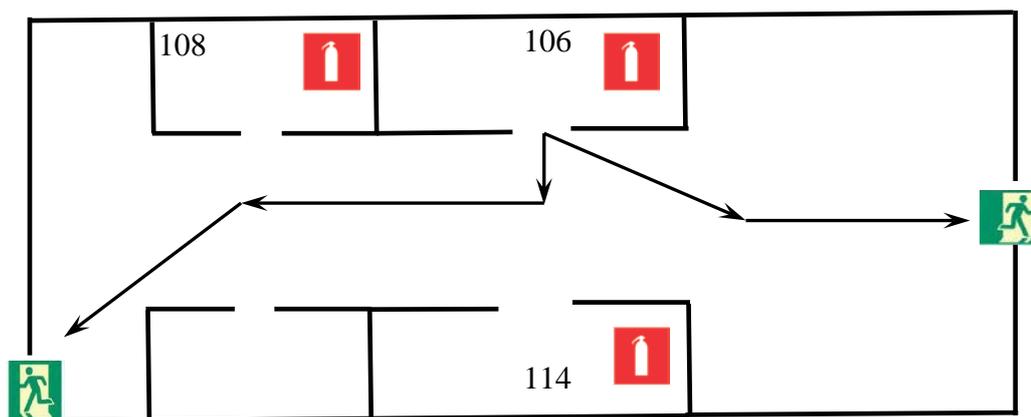


Рисунок 25 – План эвакуации рабочих из помещения лаборатории

5.3.2 Чрезвычайные ситуации природного характера

В качестве чрезвычайной ситуации природного характера рассмотрим резкое понижение температуры воздуха окружающей среды. Такое чрезвычайное природное событие может привести к нарушению производственного процесса, недопустимому изменению микроклимата рабочих помещений, транспортным авариям и т.д. В связи с этим необходим ряд мер, который позволит избежать возможных аварийных ситуаций и различных нарушений рабочего процесса.

- а) для предотвращения проблем с водоснабжением, вследствие замерзания труб, необходимо обеспечить качественную теплоизоляцию труб и установить средства подогрева воды в трубе, наиболее простым является электроподогрев.
- б) Для обеспечения бесперебойной работы предприятия при аварии на электрических сетях, необходимо иметь автономный источник электроэнергии (бензиновые, дизельные генераторы).
- в) Также при низких температурах возможны проблемы с транспортом. Необходимо организовать для развоза рабочих. Для предотвращения проблем с транспортом предприятия необходимо проводить регулярные ТО, желательно чтобы в нерабочее время транспортные средства находились в

теплом помещении. При особо низких температурах во время простоя не рекомендуется глушить двигатель.

г) В случае аварии на теплосетях необходимо предусмотреть наличие обогревателей различных типов, в том числе газовых в случае перебоев с электроснабжением.

5.3.3 Диверсия

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще.

Диверсия заключается в разрушении или повреждении взрывом, поджогом или иным способом предприятий, сооружений, путей и средств сообщения, средств связи либо другого государственного или общественного имущества.

Для обеспечения безопасности работника, предотвращения хищений и проникновения посторонних лиц на предприятие следует использовать ряд мер безопасности:

1. Организовать контрольно-пропускной пункт.
2. Установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.
3. Установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.

5.4 Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды представляет собой комплекс мер, направленный на ограничение негативного воздействия человеческой деятельности на природу.

В данной работе отходами являются металлические лабораторные образцы. Утилизация металлических отходов состоит из нескольких технологических операций, включающих в себя:

1. демонтаж конструкций и сбор металлических отходов;
2. транспортировку отходов на перерабатывающее предприятие;
3. проверка металлических отходов (в т.ч. дозиметрическая);
4. отделение отходов чёрных металлов от отходов цветных металлов;
5. отделение различных примесей неметаллического характера;
6. заключительный контроль отходов;
7. переработка.

Одним из экологически вредных факторов является неподобающая утилизация люминесцентных ламп, используемых в системе освещения рабочего помещения.

Люминесцентные лампы содержат от 3 до 5 мг ртути и относятся к 1 классу токсичных отходов. Следовательно, такого типа лампы требуют особые условия хранения, эксплуатации и утилизации. Ввиду этого, при утилизации отходов, последние должны быть рассортированы, и в случае их токсичности или другой опасности должны быть переданы специальным организациям, занимающихся их утилизацией.

5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

1. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
2. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

4. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение"
5. ГОСТ 12.4.120 "Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты от ионизирующих излучений. Общие технические требования"
6. ОСП-2002 "Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности"
7. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
8. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
9. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
10. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
11. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.

Заключение

В ходе проделанной работы образцы наноразмерного многослойного металлического Zr/Nb покрытия были подвергнуты облучению пучком протонов на линейном ускорителе ЭСГ-2.5. Экспериментально определена зависимость изменения величины электрического сопротивления, механических свойств, значения микронапряжения и размера ОКР для различных доз и интенсивностей облучения. Из проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) Дозы облучения 0.064, 0.129 и 0.193 сна приводят к уменьшению величины электрического сопротивления, увеличению показателей твердости и модуля Юнга, уменьшению величины микронапряжения и увеличению ОКР. Относительно доз 0.064 и 0.129 сна, для дозы 0.193 сна отмечается меньшее изменение величин электрического сопротивления, твердости, модуля Юнга, размеров ОКР и микронапряжения.
- 2) Увеличение интенсивности при неизменной дозе облучения 0.129 сна приводит к практически нулевому (~2%) уменьшению величины электрического сопротивления и к значительно меньшему изменению значений твердости, модуля Юнга, размеров ОКР и микронапряжения

Список литературы

1. Misra A. et al. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites //JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2007. – Т. 59. – №. 9. – С. 62-65.
2. Frutos E. et al. Length-scale-dependent mechanical behaviour of Zr/Nb multilayers as a function of individual layer thickness //Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Т. 632. – С. 137-146.
3. Углов В. В. Радиационные эффекты в твердых телах: пособие для студентов физ., хим., фак. и ак. радиофизики и компьютер. технологий, обучающихся по спец. 1-31 04 01" Физика (по направлениям)" и 1-31 04 02" Радиофизика". – 2011.
4. Кирсанов, В. В. Радиационные дефекты и связанные с ними эффекты/ В. В. Кирсанов // Соросовский образовательный журнал. Сер. физика. 2001. Т. 7, № 10. С. 88-94.
5. Буренков А. Ф. Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах/ А. Ф. Буренков [и др.]. М., 1985. 248 с.
6. Зеленский В. Ф. Радиационные дефекты и набухание металлов / В. Ф. Зеленский, И. М. Неклюдов, Т. П. Черняева. Киев, 1988. 296 с.
7. Сокурский Ю.Н. Электронная микроскопия радиационных дефектов и структурных превращений в металлах и сплавах // Там же. – С. 142-157
8. Ибрагимов Ш. Ш. Радиационные повреждения металлов и сплавов / Ш. Ш. Ибрагимов, В. В. Кирсанов, Ю. С. Пятилетов. М., 1985. 240 с.
9. Was G. S. Fundamentals of radiation materials science: metals and alloys. – Springer, 2016. – С. 415
10. Гусева М. И. Радиационный блистеринг / М. И. Гусева, Ю. В. Мартыненко //Успехи физических наук. 1981. Т. 135, вып. 4. С. 671-691.

- 11.Бондаренко Г. Г. Радиационный блистеринг материалов / Г. Г. Бондаренко. М., 1986. 52 с.
- 12.Домкус, А. П. Механические напряжения в имплантированных твердых телах / А. П. Домкус, Л. Пранявичус. Вильнюс, 1990. 158 с.
- 13.Rafique M. et al. Effects of 3.5 MeV proton irradiation on pure zirconium //Metals and Materials International. – 2016. – Т. 22. – №. 3. – С. 443.
- 14.Jelani M. et al. Mechanical behaviour of excimer laser irradiated polycrystalline zirconium //Physica Scripta. – 2014. – Т. 89. – №. 2. – С. 025703.
- 15.Procházka I. et al. Defect studies of H⁺ implanted niobium //Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Т. 645. – С. S69-S71.
- 16.S.J. Zinkle, G.S. Was, Materials challenges in nuclear energy, Acta Materialia, 61 (2013) 735-758.
- 17.S.J. Zinkle, 1.03 - Radiation-Induced Effects on Microstructure* A2 - Konings, Rudy J.M, in: Comprehensive Nuclear Materials, Elsevier, Oxford, 2012, pp. 65-98.
- 18.S.J. Zinkle, K. Farrell, Void swelling and defect cluster formation in reactor-irradiated copper, Journal of Nuclear Materials, 168 (1989) 262-267.
- 19.M.A. Nastasi, J.W. Mayer, SpringerLink (Online service), Ion implantation and synthesis of materials.
- 20.S.J. Zinkle, J.T. Busby, Structural materials for fission & fusion energy, Materials Today, 12 (2009) 12-19.
- 21.G.R. Odette, M.J. Alinger, B.D. Wirth, Recent Developments in Irradiation-Resistant Steels, Annual Review of Materials Research, 38 (2008) 471-503.
- 22.S. Ukai, M. Fujiwara, Perspective of ODS alloys application in nuclear environments, Journal of nuclear materials, 307 (2002) 749-757.

23. M.S. El-Genk, J.-M. Tournier, A review of refractory metal alloys and mechanically alloyed-oxide dispersion strengthened steels for space nuclear power systems, *Journal of Nuclear materials*, 340 (2005) 93-112.
24. L.L. Hsiung, M.J. Fluss, S.J. Tumey, B.W. Choi, Y. Serruys, F. Willaime, A. Kimura, Formation mechanism and the role of nanoparticles in Fe-Cr ODS steels developed for radiation tolerance, *Physical Review B*, 82 (2010) 184103.
25. M. Alinger, G. Odette, D. Hoelzer, On the role of alloy composition and processing parameters in nanocluster formation and dispersion strengthening in nanostructured ferritic alloys, *Acta Materialia*, 57 (2009) 392-406.
26. Zhang X. et al. Radiation damage in nanostructured materials // *Progress in Materials Science*. – 2018.
27. A. Hirata, T. Fujita, Y. Wen, J. Schneibel, C.T. Liu, M. Chen, Atomic structure of nanoclusters in oxide-dispersion-strengthened steels, *Nature materials*, 10 (2011) 922
28. G.R. Odette, D.T. Hoelzer, Irradiation-tolerant nanostructured ferritic alloys: Transforming helium from a liability to an asset, *Jom*, 62 (2010) 84-92.
29. E.A. Marquis, Core/shell structures of oxygen-rich nanofeatures in oxide-dispersion strengthened Fe-Cr alloys, *Appl Phys Lett*, 93 (2008).
30. G.R. Odette, Recent progress in developing and qualifying nanostructured ferritic alloys for advanced fission and fusion applications, *Jom*, 66 (2014) 2427-2441.
31. C.A. Williams, P. Unifantowicz, N. Baluc, G.D. Smith, E.A. Marquis, The formation and evolution of oxide particles in oxide-dispersion-strengthened ferritic steels during processing, *Acta Materialia*, 61 (2013) 2219-2235.
32. E. Aydogan, N. Almirall, G. Odette, S. Maloy, O. Anderoglu, L. Shao, J. Gigax, L. Price, D. Chen, T. Chen, Stability of nanosized oxides in ferrite

- under extremely high dose self ion irradiations, *Journal of Nuclear Materials*, 486 (2017) 86-95.
- 33.A. Anders, Metal plasma immersion ion implantation and deposition: a review, *Surface and Coatings Technology*, 93 (1997) 158-167.
- 34.P.K. Chu, S. Qin, C. Chan, N.W. Cheung, L.A. Larson, Plasma immersion ion implantation—A fledgling technique for semiconductor processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 17 (1996) 207-280.
- 35.J.F. Gibbons, Ion implantation in semiconductors—Part II: Damage production and annealing, *Proceedings of the IEEE*, 60 (1972) 1062-1096.
- 36.Nita N., Schaeublin R., Victoria M. Impact of irradiation on the microstructure of nanocrystalline materials // *Journal of Nuclear Materials*. – 2004. – T. 329. – C. 953-957.
- 37.T. Höchbauer, A. Misra, K. Hattar, R. Hoagland, Influence of interfaces on the storage of ion-implanted He in multilayered metallic composites, *Journal of applied physics*, 98(2005) 123516.
- 38.S.I. Rao, P.M. Hazzledine, Atomistic simulations of dislocation–interface interactions in the Cu-Ni multilayer system, *Philosophical Magazine A*, 80 (2000) 2011-2040.
- 39.S. Choudhury, D. Morgan, B.P. Uberuaga, Massive interfacial reconstruction at misfit dislocations in metal/oxide interfaces, *Scientific reports*, 4 (2014).
- 40.J.S. Koehler, Attempt to Design a Strong Solid, *Physical Review B*, 2 (1970) 547-551.
- 41.Y. Liu, D. Bufford, H. Wang, C. Sun, X. Zhang, Mechanical properties of highly textured Cu/Ni multilayers, *Acta Materialia*, 59 (2011) 1924-1933.
- 42.M. Demkowicz, R. Hoagland, B. Uberuaga, A. Misra, Influence of interface sink strength on the reduction of radiation-induced defect

- concentrations and fluxes in materials with large interface area per unit volume, *Physical Review B*, 84 (2011) 104102.
43. A.P. Sutton, R.W. Balluffi, H. Lüth, J.M. Gibson, *Interfaces in Crystalline Materials and Surfaces and Interfaces of Solid Materials, Physics Today*, 49 (1996) 88.
44. B.P. Uberuaga, L.J. Vernon, E. Martinez, A.F. Voter, The relationship between grain boundary structure, defect mobility, and grain boundary sink efficiency, *Scientific Reports*, 5 (2015) 9095.
45. K. Yu, C. Sun, Y. Chen, Y. Liu, H. Wang, M. Kirk, M. Li, X. Zhang, Superior tolerance of Ag/Ni multilayers against Kr ion irradiation: an in situ study, *Philosophical Magazine*, 93 (2013) 3547-3562.
46. Foiles S. M., Baskes M. I., Daw M. S. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys // *Physical review B*. – 1986. – T. 33. – №. 12. – C. 7983.
47. Johnson R. A., Oh D. J. Analytic embedded atom method model for bcc metals // *Journal of Materials Research*. – 1989. – T. 4. – №. 5. – C. 1195-1201.
48. Y. Chen, N. Li, D. Bufford, J. Li, K. Hattar, H. Wang, X. Zhang, In situ study of heavy ion irradiation response of immiscible Cu/Fe multilayers, *Journal of nuclear materials*, 475 (2016) 274-279.

Приложение А

Таблица А1 – Календарный план – график проведения НИР

№	Вид работ	Ис - и	Т _к , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ										
				сен.	окт.	ноябрь	дек.	январ.	фев.	март	апр.	май		
1	Составление технического задания	Р	7											
2	Изучение литературы	С	52											
3	Нанесение покрытия	С	12											
4	Моделирование	С	21											
5	Облучение образцов	Р, С	12											
6	Измерение электросопротивления	С	12											
7	Проведение РСА	С	12											
8	Оценка результатов	Р, С	21											
9	Составление отчета НИР	С	64											

- научный руководитель
 - студент