

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

Школа инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.04.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Структурная стабильность многослойных Zr/Nb систем при облучении ионами He ⁺ в широком диапазоне доз

УДК 621.793.1:669.017.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Кроткевич Дмитрий		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Кашкаров Е.Б..	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сечин А.А.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Лидер А. М.	д.т.н.		

Планируемые результаты освоения

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки (специальности)		
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-4), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Способен эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7, ПК-1, ПК-6), СУОС ТПУ (УК-3), <i>CDIO Syllabus</i> (4.7), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> ,
P3	Способен находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7), СУОС ТПУ (УК-3, УК-4, УК-5), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> ,
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-2), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной	Требования ФГОС ВО (ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-4, ПК-5, ПК-7), СУОС ТПУ

	деятельности.	(УК- 4, УК- 5, УК- 6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 4.1, 2.2., 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-7,ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-7), СУОС ТПУ (УК- 2, УК- 6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.	Требования ФГОС ВО (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6,: ПК- 2, ПК-5), СУОС ТПУ (УК- 1, УК- 4), <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Способен планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел и критически оценивать полученные результаты	Требования ФГОС ВО (ОПК-3,ОПК- 5, ОПК- 6,ОПК- 7, ПК-2, ПК-3), СУОС ТПУ (УК- 1, УК- 2), <i>CDIO Syllabus</i> (4.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Школа инженерная школа ядерных технологий _____
 Направление подготовки (специальность) 03.04.02 Физика _____
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики _____

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ81	Кроткевичу Дмитрию

Тема работы:

Структурная стабильность многослойных Zr/Nb систем при облучении ионами He ⁺ в широком диапазоне доз	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	26.05.2020 г., №147-53/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020 г.
--	---------------

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>Объект исследования: Многослойные наноразмерные Zr/Nb покрытия</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>	<p>Обзор литературы. Получение многослойных Zr/Nb систем с различной толщиной слоев Моделирование процесса облучения, подбор режимов облучения Облучение ионами He⁺ в широком диапазоне доз Проведение рентгеноструктурных исследований Проведение измерения электрического сопротивления Анализ результатов</p>

	Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» Раздел «Социальная ответственность» Заключение
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук И.В.
Социальная ответственность	Сечин А.А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
ГЛАВА2. Структурная стабильность многослойных Zr/Nb систем при облучении ионами He ⁺ в широком диапазоне доз	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.09.2019
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Кашкаров Е.Б.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Кроткевич Д.		

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

Школа инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 03.04.02 Физика
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики
 Период выполнения осенне-весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
13.11.2019	Подбор и изучение научно-технической литературы	10
22.01.2020	Получение экспериментальных образцов	10
19.02.2020	Проведение рентгеноструктурного анализа	10
01.03.2020	Измерение электрического сопротивления	10
31.03.2020	Анализ результатов	15
11.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
11.05.2020	Социальная ответственность	15
25.05.2020	Заключение	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Кашкаров Е.Б	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Лидер А.М.	Д.Т.Н.		

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

Студенту:

Группа		ФИО	
ОБМ81		Кроткевич Дмитрий	
Школа	ИЯТШ	Отделение Школа	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кащук Ирина Вадимовна	К.Т.Н доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Кроткевич Дмитрий		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ81	Кроткевич Дмитрий

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

Тема ВКР:

Структурная стабильность многослойных Zr/Nb систем при облучении ионами He⁺ в широком диапазоне доз	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p><i>Многослойные Zr/Nb пленки полученные методом магнетронного распыления с последующим облучением ионами гелия.</i></p> <p><i>Рабочая зона – 106 лаборатория 3 корпуса ТПУ.</i></p> <p><i>Область применения – ядерная и термоядерная энергетика</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p><i>ПНД Ф 12.13.1-03</i></p> <p><i>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ</i></p> <p><i>СанПиН 2.2.4.548-96</i></p> <p><i>СанПиН 2.2.4.3359-16</i></p> <p><i>СанПиН 2.6.1.3289-15</i></p> <p><i>СанПиН 2.2.4.548-96</i></p> <p><i>ГОСТ 12.0.003-74</i></p> <p><i>ГОСТ 12.1.003-83</i></p> <p><i>ГОСТ IEC 61140-2012</i></p> <p><i>ГОСТ Р 12.1.019- 2009</i></p> <p><i>ГОСТ 15484-81</i></p> <p><i>ГОСТ 12.1.004-91</i></p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><i>Были выявлены следующие вредные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <i>- Превышение уровней шума</i> <i>- Отклонение показателей микроклимата</i> <i>- Недостаточная освещенность рабочей зоны</i> <i>- Ионизирующее излучение</i> <p><i>Также были выявлены опасные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <i>- опасность поражения электрическим током, ввиду присутствия электрических установок с высоким напряжением</i>
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p><i>Данное исследование является экологически чистым. Отходами</i></p>

	<i>являются металлические образцы и остатки магнетронных мишеней, которые классифицируются согласно ГОСТ Р 54564-2011</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Наиболее вероятной ЧС является пожар категории (Е). Был проведен расчет первичных средств пожаротушения.</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сечин А.А.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Кроткевич Дмитрий		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 138 с., 33 рисунка, 21 таблица, 58 литературных источников, 1 приложение.

Ключевые слова: многослойные покрытия, ионное облучение, радиационная стойкость, структурная стабильность.

Объектом исследования являются многослойные наноразмерные Zr/Nb покрытия с толщинами индивидуальных слоев 10, 25, 50 и 100 нм, полученные методом магнетронного распыления. Многослойная структура присущая данным покрытиям обладает рядом уникальных свойств, такими как высокие механические свойства и способность к восстановлению структуры при радиационном повреждении. В сочетании со свойствами металлов Zr и Nb, которые как известно широко применяются в ядерной энергетике, многослойные системы, образованные этими металлами должны показывать высокую стойкость в агрессивных радиационных средах. Немаловажно, что многослойные системы, образованные Zr и Nb характеризуются некогерентными и несмешиваемыми слоями, что делает их наиболее перспективным кандидатом в качестве защитного, радиационно-стойкого покрытия в ядерных и термоядерных реакторах следующего поколения.

Целью данной работы является определение оптимальной толщины индивидуального слоя в Zr/Nb многослойных системах, которая бы обеспечила наилучшую структурную стабильность при облучении ионами He⁺ в широком диапазоне доз.

В настоящей работе образцы многослойного Zr/Nb покрытия были подвергнуты облучению ионами He⁺ с энергией 25 кэВ и флюенсом $1 \cdot 10^{16}$ – $1 \cdot 10^{18}$ ион/см². Было проведено компьютерное моделирование с целью расчета проективного пробега имплантированного гелия, также была рассчитана концентрация гелия в покрытии и количество смещений на атом. Был проведен рентгеноструктурный анализ и измерение электрического

сопротивления. Оценено влияние ионного облучения на структурные изменения в покрытиях, а именно присутствие микро- и макронапряжений.

По результатам исследования было определено, что облучение ионами He^+ вызывает различные структурные изменения в многослойных Zr/Nb покрытиях в зависимости от флюенса и толщины слоев. Данные изменения заключаются в реориентации покрытия, особенно слоев Zr, изменении величины микро- и макронапряжения. Также были отмечены изменения в величине электрического сопротивления. Было определено, что при данных условиях облучения наиболее стабильны покрытия с толщиной индивидуального слоя равной 25 нм.

Исследование структурной стабильности многослойных систем, проведенное в настоящей работе, носит важный практический характер на пути внедрения данных покрытий в качестве радиационно-стойких в ядерной и термоядерной энергетике.

В дальнейшем планируется изучение систем с разной объемной составляющей Zr и Nb, исходя из результатов данной работы. Слои Zr и Nb имеют различную повреждаемость, ввиду особенностей возникновения и движения дефектов. Варьируя процент объемной составляющей Zr и Nb можно будет достичь наиболее оптимальное их соотношение. Данное исследование планируется провести с привлечением методик, позволяющих напрямую оценить дефектность структуры, таких как просвечивающая электронная микроскопия и электрон-позитронная аннигиляция. Также планируется провести первопринципные расчеты Zr/Nb систем в условиях радиационного воздействия.

Содержание

Введение.....	15
ГЛАВА 1. Основные сведения о радиационной повреждаемости металлов и многослойных металлических систем	19
1.1 Первичные процессы. Точечные дефекты и их комплексы.....	19
1.2 Радиационно-стимулированные явления в металлах	23
1.2.1 Явление радиационного распухания и порообразования	23
1.2.2 Блистеринг и флекинг	26
1.2.3 Явление радиационного охрупчивания и упрочнения.....	27
1.3 Многослойные металлические наноразмерные системы.....	30
1.3.1 Характеристики многослойных систем образованные различными металлами	35
1.3.2 Влияние толщины индивидуального слоя на радиационную стойкость многослойных систем.....	40
1.4 Влияние ионного облучения на Zr/Nb системы	48
ГЛАВА 2. Структурная стабильность многослойных Zr/Nb систем при облучении ионами He ⁺ в широком диапазоне доз.....	53
2.1 Материалы и методы	53
2.2 Результаты и их обсуждение.....	59
ГЛАВА 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	73
Введение.....	73
3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения..	74
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений	74
3.1.2 SWOT-анализ	76

3.2 Планирование научно-исследовательских работ	78
3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	78
3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	79
3.3 Бюджет научно-технического исследования	82
3.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования ..	83
3.3.2 Расчет амортизации специального оборудования.....	83
3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	85
3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	86
3.3.5 Накладные расходы	87
3.3.6 Бюджетная стоимость.....	88
3.4 Определение ресурсной эффективности исследования.....	88
Выводы по разделу	90
ГЛАВА 4. Социальная ответственность	91
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	91
4.2 Производственная безопасность	92
4.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	93
4.3.1 Производственный шум	93
4.3.2 Микроклимат.....	94
4.3.3 Освещенность.....	96
4.3.4 Ионизирующее излучение	97
4.3.5. Электробезопасность	100
4.4 Чрезвычайные ситуации.....	101
4.4.1 Пожарная безопасность.....	103
4.5 Расчет первичных средств пожаротушения	104

4.6 Охрана окружающей среды	107
Выводы по разделу	108
Заключение	110
Список литературы	112
Приложение I.....	118

Введение

Воздействие высокоэнергетических частиц на металлы, таких как протоны, нейтроны, ионы гелия приводит к интенсивным структурным изменениям, вызванным смещением атомов из их узлов с образованием первичных радиационных дефектов, пар Френкеля. Впоследствии, первичные точечные дефекты, при достаточной концентрации, могут образовывать более сложные дефекты, такие как дислокационные петли, дефекты упаковки, междоузельные и вакансионные кластеры [1]. Последние могут эволюционировать в стабильные поры, а в присутствии трудно растворимых газов образовывать газовые пузырьки. Все эти дефекты приводят к существенной деградации свойств металлов выраженной такими явлениями как радиационное распухание и охрупчивание [2]. Особенно остро данная проблема стоит в ядерной промышленности, где конструкционные материалы воздействию следующих факторов: высокая температура, высокие механические нагрузки, воздействие химически агрессивного теплоносителя и интенсивных потоков излучения.

Остаточная дефектная структура при облучении материалов обуславливается долей «выживших» дефектов в процессе первичной рекомбинации. Таким образом, интуитивно понятно, что при уменьшении количества выживших дефектов будет подавляться рост дальнейшей дефектной структуры. Было обнаружено, что свободные поверхности, границы зерен, гетерофазные границы могут служить эффективными стоками для радиационных дефектов, приводя к эффекту самовосстановления и высокой радиационной стойкости материалов [3,4]. Особенно заслуживают внимания многослойные металлические композиты, ввиду того что путем варьирования металлов образующих многослойную систему, можно получить различные типы границ раздела с исключительными физическими и химическими свойствами.

Для определения эффективности и стабильности многослойной системы, как самовосстанавливающейся системы при радиационном воздействии, можно выделить два основных фактора: когерентность границы раздела и смешиваемость металлов. Когерентность границы раздела будет определять эффективность границы раздела как стока для дефектов. Когерентность границы раздела зависит от типа кристаллической структуры и разницы в параметрах решетки. Некогерентная граница раздела является более эффективным стоком для дефектов, ввиду наличия большого количества дислокаций несоответствия. Добиться некогерентности можно используя металлы с разной кристаллической структурой и/или с большой разницей в параметрах решетки. Смешиваемость слоев определяет морфологическую стабильность системы. При интенсивном воздействии высокоэнергетических частиц может происходить смешивание металлов и как следствие утраты границы раздела как таковой. Таким образом, наиболее эффективными будут некогерентные системы с низкой смешиваемостью слоев.

На данный момент было исследовано множество различных некогерентных и несмешиваемых систем: Cu/W [5, 6], Cu/Mo [7, 8], Cu/Nb [9, 10], Ag/Ni [11], Ag/V [12]. Все данные системы показали высокую радиационную стойкость с сохранением четкой слоистой структуры, тем не менее, существуют работы посвященные исследованию потенциально смешиваемых систем, таких как Ni/Fe [13], Cu/Ni [14], Al/Nb [15], которые показали утрату четкой слоистой структуры при интенсивном облучении заряженными частицами, особенно при малых толщинах слоев. В данном случае выбор потенциально смешиваемых систем обусловлен экономическими и техническими требованиями. Исходя из всего вышесказанного, выбор металлов для построения самовосстанавливающейся многослойной системы для агрессивных радиационных сред должен руководствоваться следующими факторами: высокие механические, термические и антикоррозионные свойства; некогерентная граница раздела;

высокая положительная энтальпия смешивания. С данной точки зрения одной из наиболее подходящих систем может являться пара металлов Zr/Nb.

Сплавы Zr-Nb широко используются в ядерной промышленности ввиду их механических, коррозионных свойств, малому сечению захвата тепловых нейтронов [16]. Многослойные наноразмерные системы, образованные Zr и Nb, должны обладать преимуществами сплава Zr-Nb и преимуществами некогерентной и несмешиваемой многослойной системы, ввиду того что Zr и Nb обладают различными кристаллическими структурами – ГЦК и ОЦК, а также Zr и Nb обладают положительной энтальпией смешивания – 4 кДж/моль [17]. В последнее время появилось много интересных работ по изучению радиационной стойкости Zr/Nb систем, среди них исследование по гамма-облучению [18], ионами Si [19], ионами He [20]. В данных работах была показана высокая радиационная стойкость Zr/Nb систем. Тем не менее, на данный момент нет четкого ответа, при каких дозах облучения и толщинах слоев Zr/Nb многослойные системы обладали бы высокой стабильностью и способностью к самовосстановлению. Также остаются малоизученными механизмы самовосстановления таких структур и влияния архитектуры и толщины индивидуальных слоев на способность композита к самовосстановлению при радиационных повреждениях.

Таким образом, целью данной работы является: определить оптимальную толщину индивидуального слоя для многослойных Zr/Nb систем, обеспечивающую высокую структурную стабильность, при интенсивном облучении He⁺ в широком диапазоне доз. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Нанесение Zr/Nb на подложку Si путем магнетронного распыления, с толщинами индивидуальных слоев 10, 25, 50 и 100 нм
- 2) Проведение имплантации He⁺ с энергией 25 кэВ с дозами $1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$ ион/см²
- 3) Исследование изменения кристаллической структуры методом рентгеновской дифракции

4) Измерение удельного электрического сопротивления

Анализируя результаты рентгеноструктурного анализа, изменение формы рефлексов и их сдвигов между исходными и облученными образцами, а также соотнося данные изменения с удельным электрическим сопротивлением, можно будет качественно определить степень восстановления у различных покрытий с различной дозой облучения.

Положения на защиту:

1) Многослойные наноразмерные Zr/Nb покрытия с толщиной индивидуального слоя 25 нм обладают наибольшей структурной стабильностью при облучении ионами He^+ с энергией 25 кэВ, флюенсом $1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18}$ ион/см² и потоком $1,44 \cdot 10^{15}$ ион/см².

ГЛАВА 1. Основные сведения о радиационной повреждаемости металлов и многослойных металлических систем

Высокоэнергетические частицы и излучение при воздействии 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 и 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.

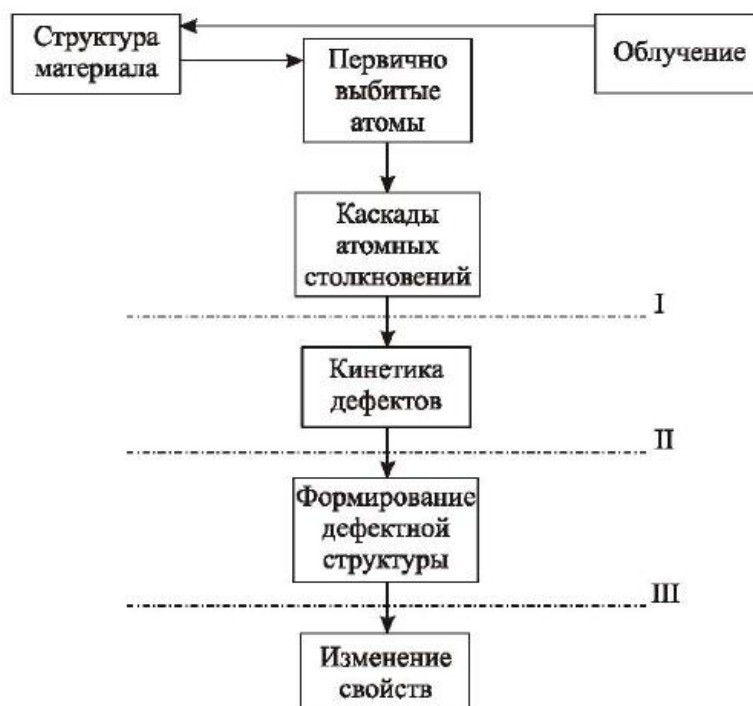


Рисунок 1 – Схема основных стадий радиационной повреждаемости; I- динамическая стадия; II-диффузионная стадия; III-стадия эволюции стоков [21].

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 [21]. 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).

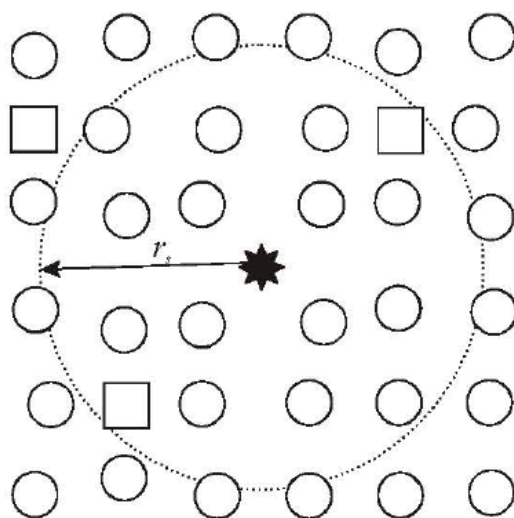


Рисунок 2 – Формирование пар Френкеля при облучении [21].

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. [22]

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 [23]. 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 междуузельной «шубой». Дефекты, избежавшие внутрикаскадной рекомбинации, могут вступать в реакцию с дефектами, образовавшимися в других каскадах [21].

Объединение вакансий и междуузлий при их неравновесных концентрациях в комплексы энергетически выгодно. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при температурах, при которых созданные в неравновесных концентрациях вакансии и междуузельные атомы подвижны, а их равновесные концентрации относительно низки, идет интенсивное объединение однотипных дефектов и образование вакансионных и междуузельных скоплений [24].

Дислокационные петли

Вследствие высокой подвижности междуузельных атомов (энергия миграции 10^2 -10 эВ) даже при низких температурах (10-20 К) они быстро образуют скопления. Ввиду больших искажений вносимых междуузельными атомами развитие трехмерных скоплений энергетически невыгодно, поэтому они образуют только один вид скоплений – дислокационные петли [25]. Минимальным зародышем для образования дислокационной петли служит пара междуузлий.

Наиболее благоприятными местами для зарождения и роста междуузельных дислокационных петель являются структурные несовершенства, такие как дефекты упаковки, плоскости, по которым произошло скольжение, границы двойников и т.д. В ряде случаев наблюдается рост междуузельных 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 междуузельных дислокационных

петель; при высоких температурах их зарождение происходит непрерывно в течение длительного времени облучения [21].

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 [22]. При непрерывном нейтронном и ионном облучении устанавливается характерное для данных условий облучения соотношение между скоростями: зарождения вакансионных петель при разрушении каскадов смещений; растворения вакансионных петель, термической эмиссии вакансий из петель; зарождения и роста междуузельных 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 [26].

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 [21].

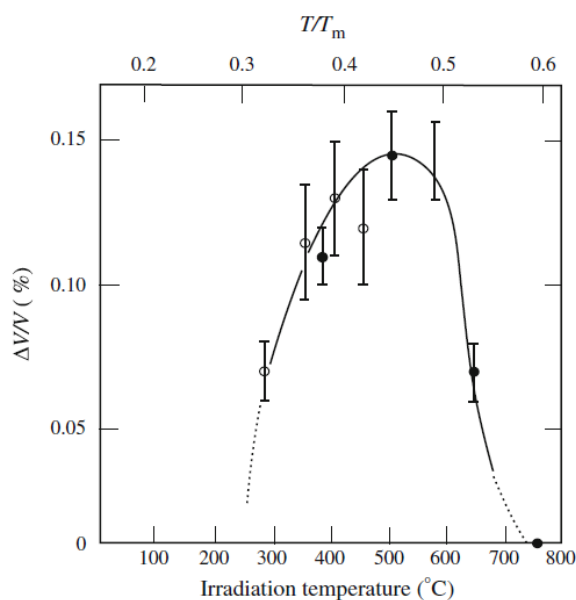


Рисунок 3 – Зависимость радиационного распухания от температуры облучения для никеля облученного нейтронами с дозой 5×10^{19} н/см² [11].

Зависимость распухания материалов от температуры проходит через максимум и дальнейшее увеличение температуры облучения отмечается спад

распухания, ввиду достижения значений температуры, при которой начинается интенсивный отжиг дислокаций. Отмечено что для некоторых металлов и сплавов зависимость распухания от температуры может иметь несколько максимумов [24]. Их появление обусловлено влиянием на радиационное распухание 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 распухания 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)).

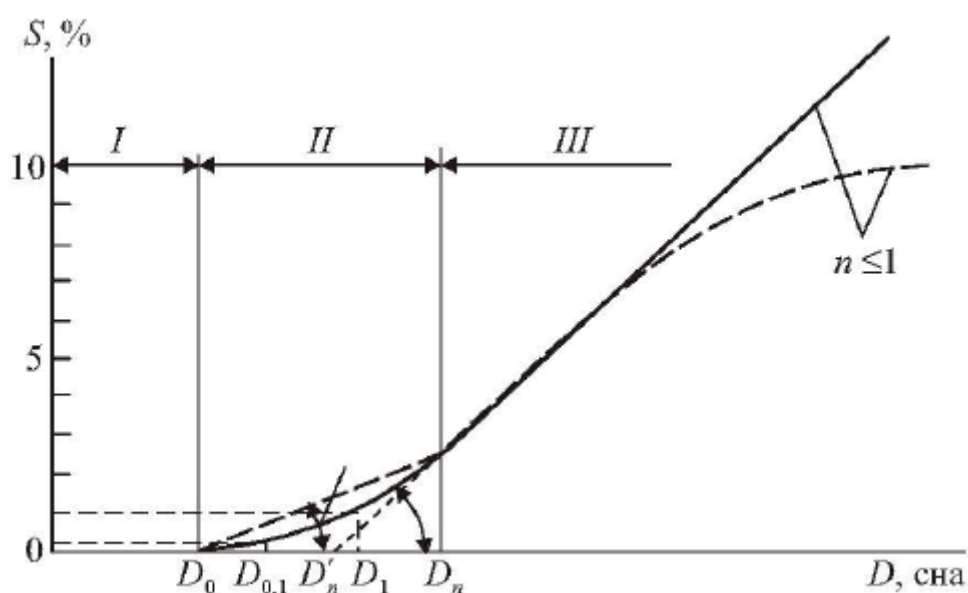


Рисунок 4 – Зависимость распухания металлов от дозы; I-инкубационный период; II-переходной период; III-установившийся период [21].

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 10^6 сна [21].

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 [28, 29].

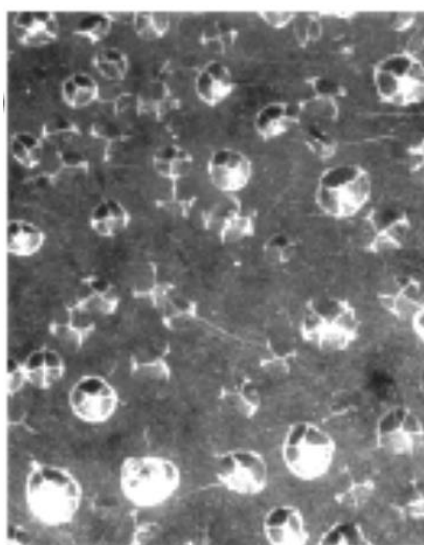


Рисунок 5 – Поверхность вольфрама облученного протонами с энергией 1.75 МэВ и дозой 5×10^{18} ион/см² [28].

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 [21].

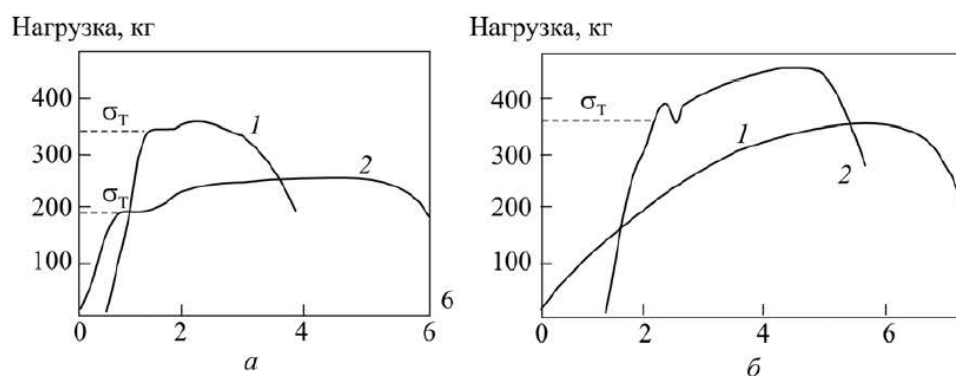


Рисунок 6 – Кривые растяжения для облученных (1) и необлученных (2) нейтронами образцов железа (а) и никеля (б), доза облучения $1.1 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$; σ_T предел текучести [21].

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 [30].

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 [22]. 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, меньшие показатели пластичности у материала подвергнутому облучению объясняется уменьшением прочности границ зерен вследствие образования и роста газовых пузырьков. В итоге, при радиационном воздействии охрупчивание помимо этого сопровождается и радиационным упрочнением материала внутри зерен, речь о котором шла выше.

1.3 Многослойные металлические наноразмерные системы

Одной из наиболее выдающихся характеристик многослойных систем является, несомненно, большая плотность границ раздела. Так, например многослойная система образованная слоями толщиной 10 нм, будет иметь плотность границ раздела равную $1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$. При такой высокой плотности проявляются уникальные качества, такие как высокие механические характеристики, магнитные и оптические свойства. Также, присутствие большого количества границ означает высокую плотность стоков для радиационных дефектов, делая многослойные системы потенциально радиационно-устойчивыми. В отличие от других систем с большой плотностью стоков, таких как нанокристаллические материалы, многослойные системы будут обладать более высокой стабильностью ввиду гетерофазного строения.

В отличии от остальных типов стоков для дефектов граница раздела между двумя слоями в наноразмерных многослойных металлических покрытиях (НММ) 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 тип химической связи на границе раздела также может варьироваться. Благодаря особенностям слоистой структуры, НММ покрытия обладают выдающимися механическими свойствами такими как: эластичность, высокий предел прочности и текучести, твердость и т.д. [31, 32]. 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:

$$k_{gb}^2 = \frac{12\eta}{h^2} \quad (1)$$

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}) [33, 34]. 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 [35].

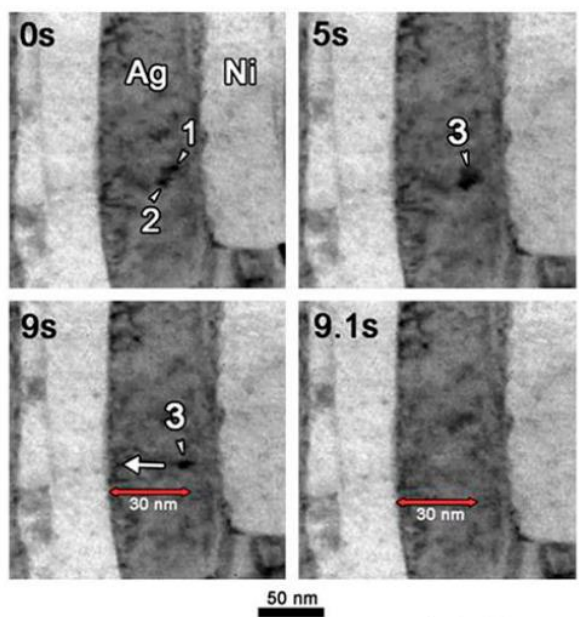


Рисунок 7 – Поведение радиационно-индуцированных дислокационных петель в Ag/Ni многослойном покрытии с дозой облучения 0.131-0.133 с.н.а; дислокационные петли отмечены малыми белыми стрелками, большой белой стрелкой отмечен путь миграции [36].

В работе [36] было проведено облучение Ag/Ni многослойного покрытия ионами криптона с целью исследования роли границы раздела на абсорбцию радиационно-индуцированных дефектов. Как показано на рисунке 7, дислокационная петля, образовавшаяся в ходе облучения, мигрировала к некогерентной, несмешиваемой ГЦК/ГЦК границе раздела и в дальнейшем абсорбировалась ею.

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*). Данная модель была построена на основе хорошо протестированных потенциалов для меди [37] и ниобия [38].

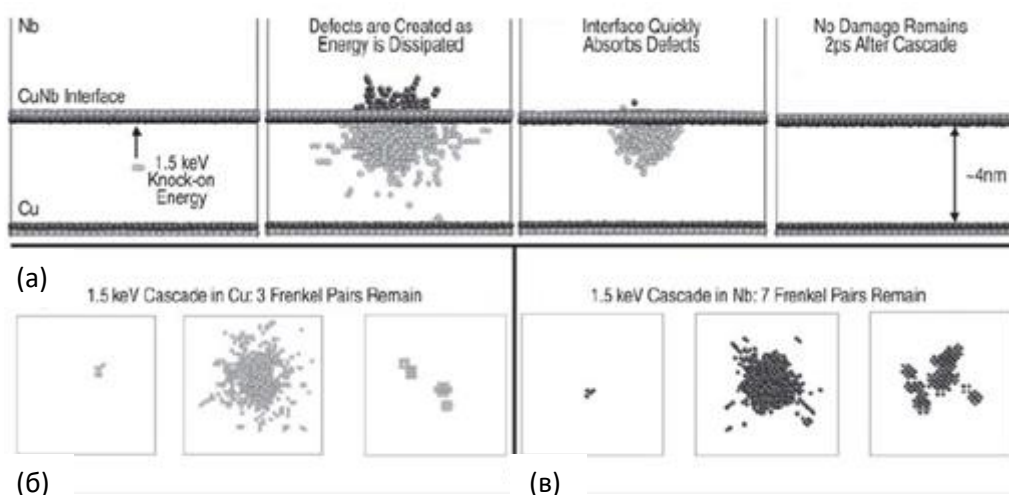


Рисунок 8 – Симуляция каскадных столкновений при энергии 1.5 КэВ в (а) Cu/Nb многослойном композите, (б) идеальной кристаллической меди и (в) идеальном кристаллическом ниобии [39]

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.

Как видно из рисунка 8, 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 9) [1].

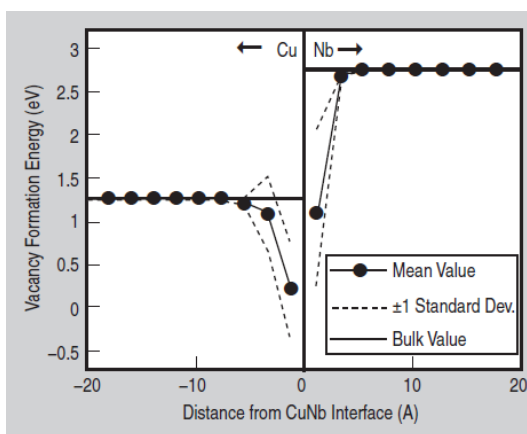


Рисунок 9 – Энергия образования вакансий в зависимости от расстояния от границы раздела в Cu/Nb композите [39].

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 [40] 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 10 (а)).

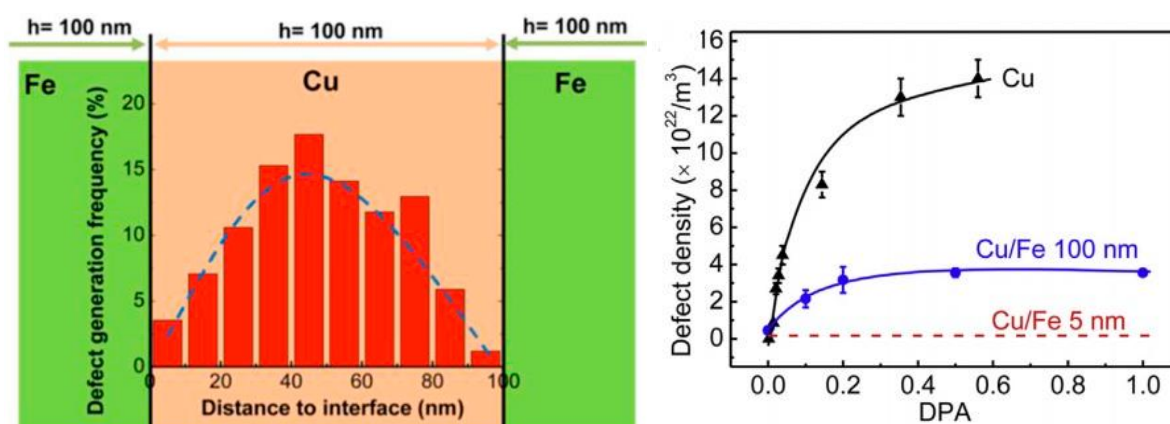


Рисунок 10 – (а) Профиль распределения концентрации дефектов в Cu/Fe многослойном покрытии в результате облучения ионами Cu; (б) зависимость плотности дефектов от полученной дозы [40].

Как видно из рисунка наибольшая концентрация дефектов наблюдается в середине слоя, а наименьшая вблизи границы раздела. На рисунке 10 (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.

1.3.1 Характеристики многослойных систем образованные различными металлами

Выбор того или иного металла при производстве многослойных покрытий должен опираться на искомые свойства покрытия. Подходя к данному вопросу, стоит учитывать область применения данного покрытия. Для таких агрессивных сред как ядерные и термоядерные реакторы, где покрытия подвергаются воздействию экстремальных температур и радиации, выбранные металлы должны обладать как высокими термическими и коррозионными свойствами, так и высокой радиационной стойкостью.

В первую очередь для обеспечения стабильности сформированных покрытий стоит обратить внимание на кристаллическую структуру. Как отмечено в работе [41] разные кристаллические структуры имеют разную сопротивляемость радиационному воздействию. Для металлов с гранцентрированной решеткой (ГЦК), энергия, требуемая для формирования вакансии, составляет 1,1 – 2,7 эВ, для миграции образовавшейся вакансии требуется 0,7 – 1,7 эВ. Существует несколько типов первичных дефектов в ГЦК решетке: гантели с направлением $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$, краудионы и классические тетраэдрические и октаэдрические междоузлия. Энергия миграции для междоузельных комплексов составляет порядка 0,05 – 0,1 эВ, следовательно, междоузлия (и их комплексы) очень подвижны даже при комнатной температуре, тогда как вакансии проявляют большую подвижность при повышенных температурах, это справедливо для всех типов кристаллических структур. Такая резкая разница между вакансиями и междоузлиями оказывает глубокое влияние на накопление и эволюцию радиационных повреждений, и рост пустот в ГЦК металлах и сплавах. В металлах с объемно-центрированной кристаллической структурой преимущественно образуются те же первичные дефекты, что и для ГЦК металлов, энергия формирования вакансии для ОЦК структуры 1,6-3 эВ, миграции 0,5-2 эВ. Также в ОЦК решетке величина избыточного объема при

формировании междоузельного атома равна 0,64 от объема атома, в ГЦК решетке эта величина составляет 1,1 от объема атома [41]. В совокупности два этих аспекта могут говорить о лучшей радиационной стойкости ОЦК металлов. Изучение металлов с гексагональной плотноупакованной структурой (ГПУ) в основном концентрируется на цирконии, так как данный металл очень хорошо себя зарекомендовал себя в ядерной промышленности ввиду хороших коррозионных свойств, высокой радиационной стойкости и низкого сечения захвата тепловых нейтронов. В ГПУ структурах вакансии и междоузлия имеют более сложную конфигурацию, нежели в кубических структурах. Энергия формирования и миграции вакансии в ГПУ структурах приблизительно 0,6-2 и 0,3-1 эВ соответственно. Избыточный объем при формировании междоузлия оценивается в 0,6 – 1,2 от объема атома [42].

Очевидно, что очень важной характеристикой многослойных систем является стабильность границы раздела между слоями. На стабильность границы раздела оказывает сильное влияние такой параметр как смешиваемость слоев, высокая смешиваемость металлов, образующих многослойную систему, при радиационном, термическом или ином воздействии может привести к потере границы как таковой. Таким образом, при подборе металлов для формирования многослойной системы необходимо учитывать способность этих металлов к смешению. Используя правила Юм-Розери [43], которые описывают стремление металлов образовывать твердые растворы и сводятся к следующим основным пунктам:

- Рост разности электроотрицательностей атомов двух металлов $\Delta\chi$ увеличивает их стремление к объединению, как в твердом, так и в жидком состоянии. При этом большим величинам $\Delta\chi$ соответствует более низкое значение растворимости [43].
- При отличии атомных диаметров на 14-15% твердые растворы существуют в ограниченной области концентраций [43].

Также оценить способность к смешиванию может помочь величина энтальпии смешивания ΔH . Для понимания следует рассмотреть формулу (2)

для свободной энергии Гиббса [44], основанной на втором законе термодинамики,

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

где ΔG – изменения свободной энергии Гиббса в результате смешивания, ΔH – энтальпия смешивания, $T\Delta S$ – изменение энтропии при заданной температуре. Как известно уменьшение ΔG является движущей силой фазовых превращений [44], т.е. при $\Delta G < 0$ реакция может происходить самопроизвольно, при $\Delta G > 0$ реакция не может носить самопроизвольный характер. Анализируя формулу (2) легко понять, что член $T\Delta S$ всегда будет приводить к уменьшению величины ΔG , а величина ΔH в зависимости от типа металлов может носить как положительный знак, так и отрицательный. Таким образом, чтобы обеспечить высокую несмешиваемость слоев в многослойных системах, следует выбирать металлы с большей положительной энтальпией смешивания. Для оценки энтальпии смешивания ΔH хорошо подходит полуэмпирический метод Миедымы, подробно с данной методикой можно познакомиться в работе [45]. В таблице 1 представлены величины, характеризующие смешиваемость некоторых изученных многослойных систем. Величины энтальпии смешивания рассчитаны с помощью калькулятора находящегося на сайте «Института металлургии и материаловедения» Польской академии наук [17]. Данные представлены при равной мольной доле каждого металла.

Таблица 1. Характеристики, определяющие смешиваемость слоев для
избранных многослойных систем

Тип многослойного покрытия	Разность электроотрицательности $\Delta\chi$	Разность атомных радиусов, %	Энтальпия смешивания, кДж/моль
Cu/Nb	0,3	10,5	2,52
Cu/W	0,46	6,6	22,33

Fe/W	0,53	9,5	-0,05
Fe/Ni	0,08	0,8	-1,54
Zr/Nb	0,27	10	3,95
Mo/Zr	0,83	14,5	-5,99

Несмотря на потенциальную смешиваемость некоторых систем, работы по их исследованию до сих пор проводятся. Например, в работе [13], где проводилось исследование Fe/Ni многослойного покрытия, главным мотивом выбора именно такой системы был, что изучаемые на данный момент системы не подходят для применения в ядерных реакторах, если учитывать их индуцированную радиоактивность и стоимость. В данном исследовании облучению ионами Fe¹⁰⁺ с энергией 300 кэВ подверглись образцы Fe/Ni покрытия с толщинами индивидуальных слоев от 2 до 10 нм и общей толщиной 100 нм, флюенс при облучении составил $1,7 \cdot 10^{18} - 1,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$, было выбрано три режима облучения с дозой 1, 6 и 12 сна. На рисунке 11 представлена дифрактограмма облученных и необлученных образцов многослойного покрытия Fe/Ni10, Fe/Ni5 и Fe/Ni2. Из графиков отчетливо видно, что сформированное покрытие имеет преимущественно текстуру с ориентацией Ni(111)/Fe(110). Было отмечено, что рефлексы Ni(111), Fe(110) и Ni(200) с увеличением дозы облучения сдвигаются в сторону меньших углов. Образец Fe/Ni2 не показывает отчетливых изменений с дозами меньше 12 сна, однако при достижении дозы 12 сна носят более масштабный характер в отличие от образцов Fe/Ni10, Fe/Ni5.

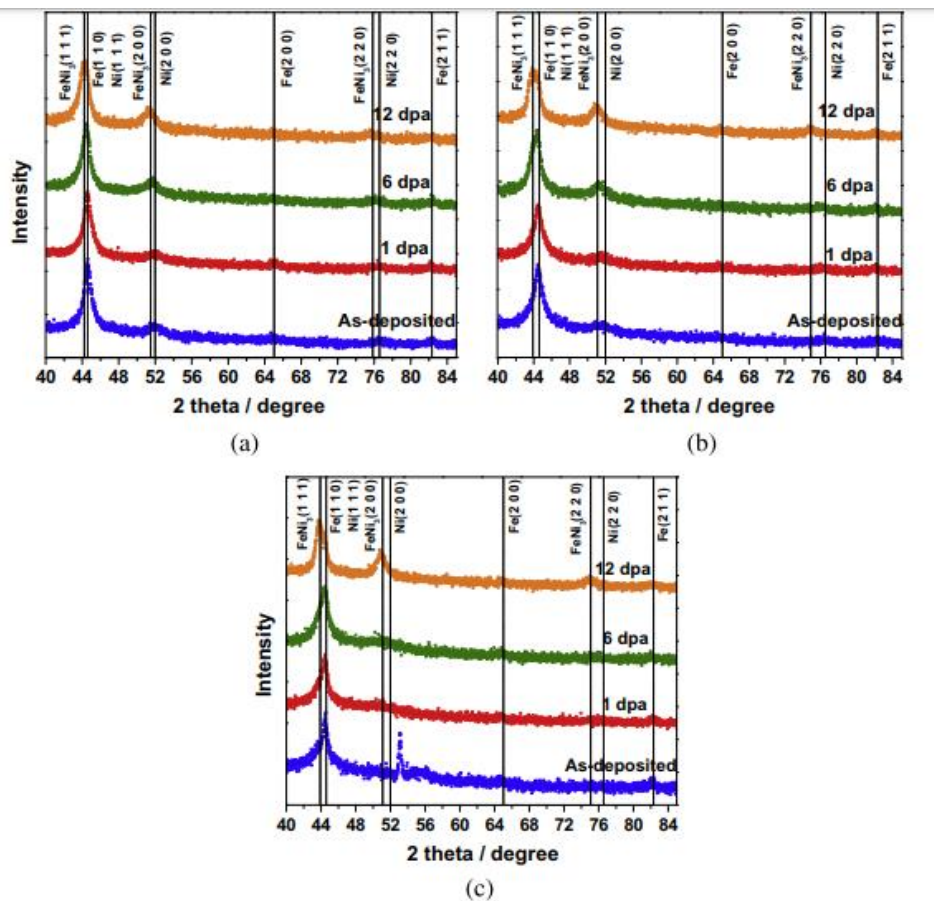


Рисунок 11 – Дифрактограмма облученных с разными дозами образцов Fe/Ni10 (a), Fe/Ni5 (b), Fe/Ni2 (c) [13]

В результате облучения, исходя из графиков на рисунке 11, зафиксировано образование интерметаллида FeNi₃. Очевидно, что формирование интерметаллида связано с высокой смешиваемостью слоев Fe и Ni. Однако несмотря на факт смешивания в целом по работе [13] можно заключить, что Fe/Ni многослойное покрытие имеет свойство к сопротивлению радиационно-индуцированным дефектам, особенно это было заметно для образца с толщиной индивидуального слоя 5нм.

Таким образом, при подборе металлов в качестве кандидатур к формированию многослойных наноразмерных систем, следует учитывать множество факторов, таких как термическая стабильность металлов, коррозионные свойства, смешиваемость металлов. И даже при учете всех факторов выбор может быть неочевиден, ввиду таких причин как

экономическая обоснованность или доступность использования тех или иных металлов.

1.3.2 Влияние толщины индивидуального слоя на радиационную стойкость многослойных систем

В работе [5], где облучению подверглись образцы Cu/W многослойного покрытия, с толщинами индивидуальных слоев от 2,5 до 50 нм, ионами H⁺ с энергией 50 кэВ наглядно показано влияние толщины индивидуального слоя на сопротивляемость радиационным повреждениям. На рисунке 12 показана дифрактограмма (a) и изображение ПЭМ (b,c) многослойных покрытий,

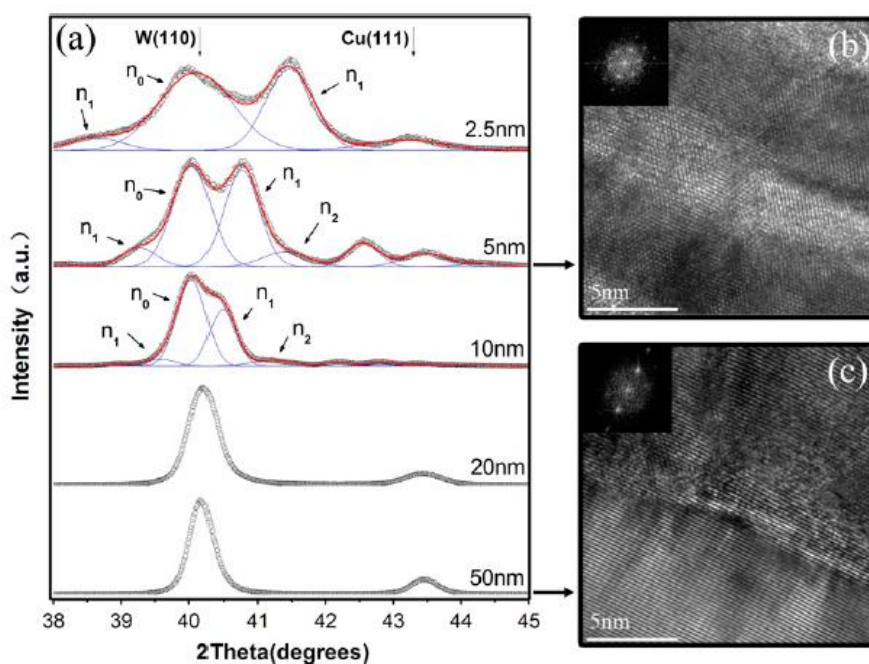


Рисунок 12 – Дифрактограмма не облученных образцов (a), изображение ПЭМ для Cu/W5 (b) и Cu/W50(c)

полученных путем магнетронного распыления. При уменьшении толщины индивидуального слоя отмечается появление спутников n₁, n₂ у пика n₀, как было отмечено для W/Ni [46] покрытия появление спутников предполагает возникновение сверхрешетки.

Флюенс варьировался от $7 \cdot 10^{20}$ до $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$, на рисунке 13 изображен профиль повреждений в смещениях на атом (сна), рассчитанных в программе SRIM2006.

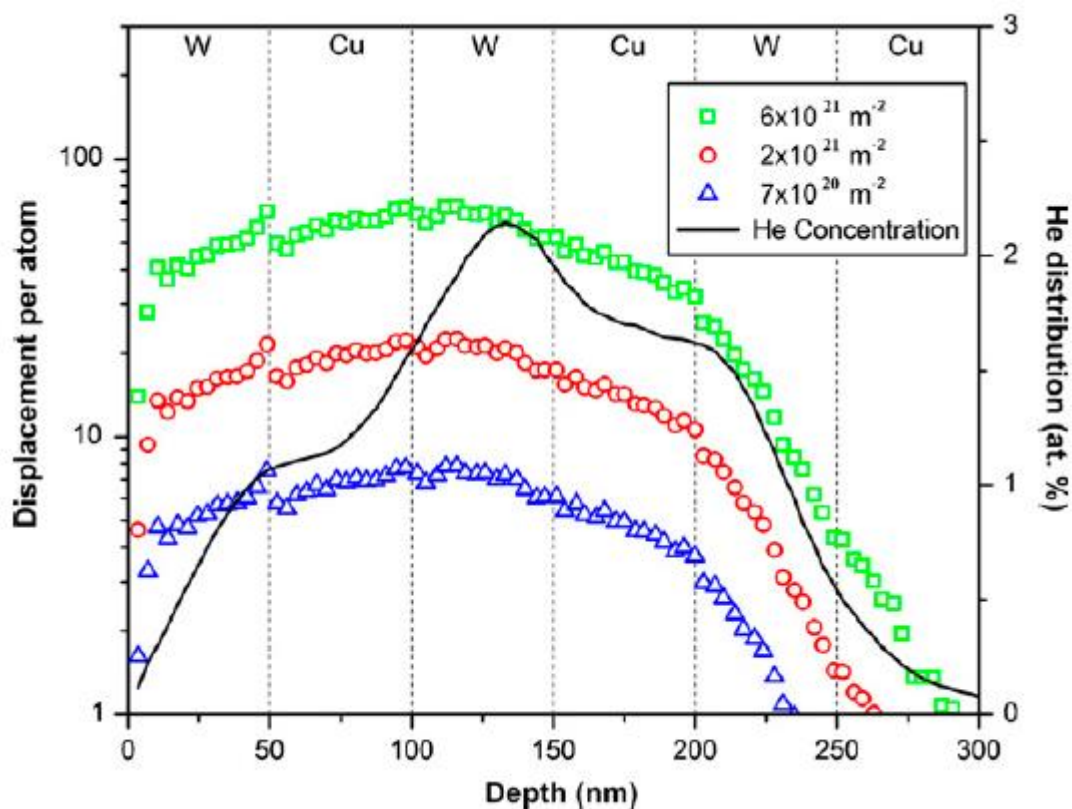


Рисунок 13 – Распределение повреждений по глубине и концентрации гелия, для различных флюенсов, рассчитанных по данным SRIM2006 [5]

Как видно из графика в некоторых местах доза повреждений составляла свыше 70 сна, а концентрация гелия свыше 2 ат. %. Тем не менее, при таких высоких дозах Cu\W покрытие показало высокую радиационную стойкость, причем для разных толщин индивидуальных слоев результаты отличались

Проведенные исследования облученных образцов показали, что наиболее радиационно-стойким оказалось покрытие с толщиной индивидуального слоя 5 нм – Cu/W5. На рисунке 14 (а) показана дифрактограмма и изображения ПЭМ облученного и необлученного образца

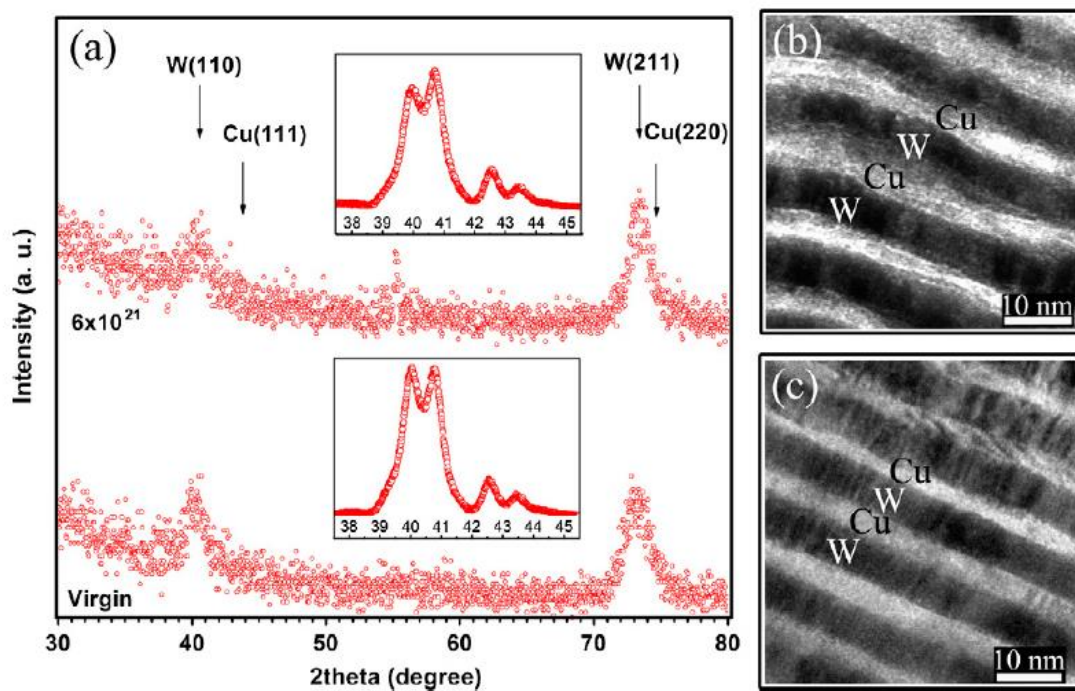


Рисунок 14 – (а) дифрактограмма Cu/W5 многослойного покрытия до и после облучения ионами 50 кэВ He⁺ с флюенсом $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ и изображения ПЭМ облученного (b) и не облученного (c) Cu/W5 многослойного покрытия[5]

Cu/W5, как видно из рисунка при флюенсе $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ не было отмечено существенных изменений в величине FWHM (full width at half maximum – полная ширина на уровне половинной амплитуды) и интенсивности рефлексов, за исключением малого изменения для рефлекса Cu(111) и W(110), у которых отмечено уширение FWHM и позиции рефлекса, как показано на рисунке 3 в увеличенной области от 38 до 45 градусов. Таким образом, результаты показывают, что во время облучения практически не происходило увеличения параметра решетки, также не было замечено увеличение когерентности между слоями. Результаты ПЭМ (рисунок 3 (b, c)) отчетливо показывают, что после облучения сохранилась слоистость структуры, и не произошло смешение слоев.

С другой стороны, для Cu/W50 многослойного покрытия (рисунок 15(a)) после облучения наблюдалось уменьшение интенсивности рефлексов и

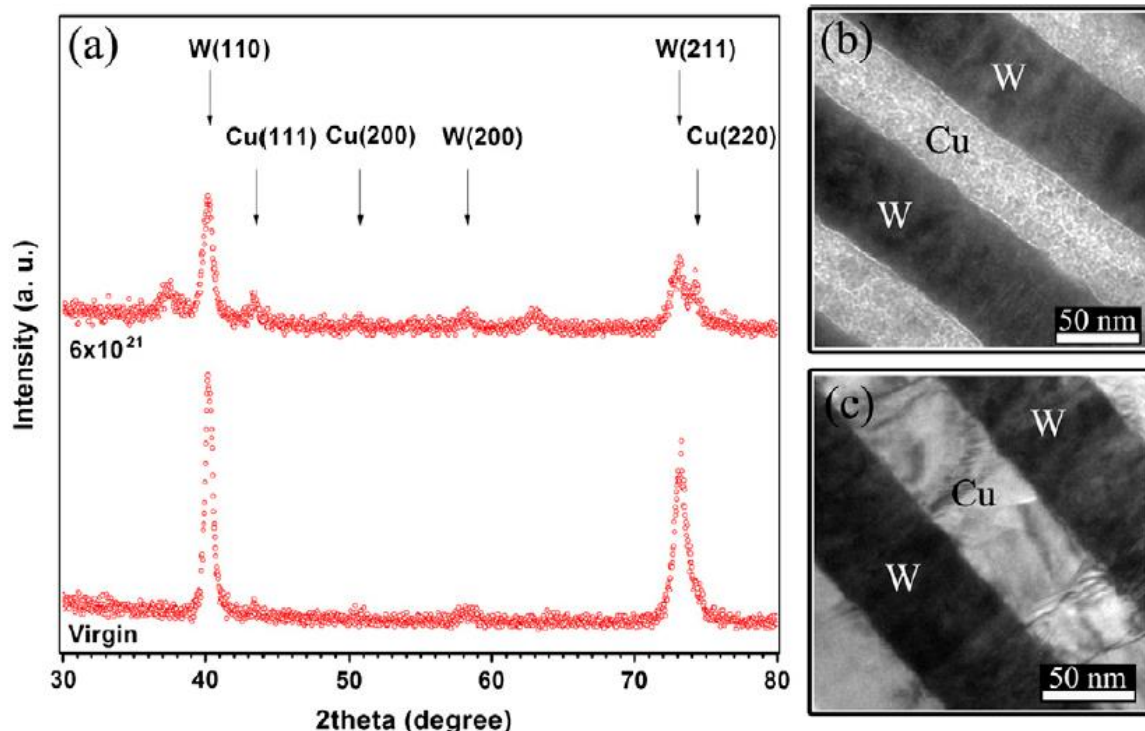


Рисунок 15 – (a) дифрактограмма Cu/W50 многослойного покрытия до и после облучения ионами 50 кэВ He⁺ с флюенсом $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ и изображения ПЭМ облученного (b) и не облученного (c) Cu/W50 многослойного покрытия [5]

увеличение FWHM (флюенс $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$). Уменьшенная интенсивность является признаком разупорядочения в кристаллической решетке из-за индуцированных во время облучения точечных дефектов, а увеличение FWHM часто ассоциируется с микронапряжением из-за возникновения междоузельных атомов в ходе облучения. Результаты на рисунке 1(a) показывают, что для Cu/W50 многослойного покрытия после облучения ионным пучком с флюенсом $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ текстура зерна была частично разрушена, также было отмечено явление аморфизации. Сравнивая рисунки 15 (b) и (c), отчетливо видно, что отсутствует индуцированное облучением смешивание слоев, в связи, с чем можно утверждать, что периодическая многослойная структура в системе Cu/W сохраняется даже после радиационного повреждения до 70 сна.

Также в работе [5] были исследованы покрытия с другими толщинами: 2,5, 10, 20 нм. На рисунке 5 представлен сравнительный график интегрированной интенсивности дифракции, позволяющий наглядно оценить влияние облучения на микроструктуру покрытий.

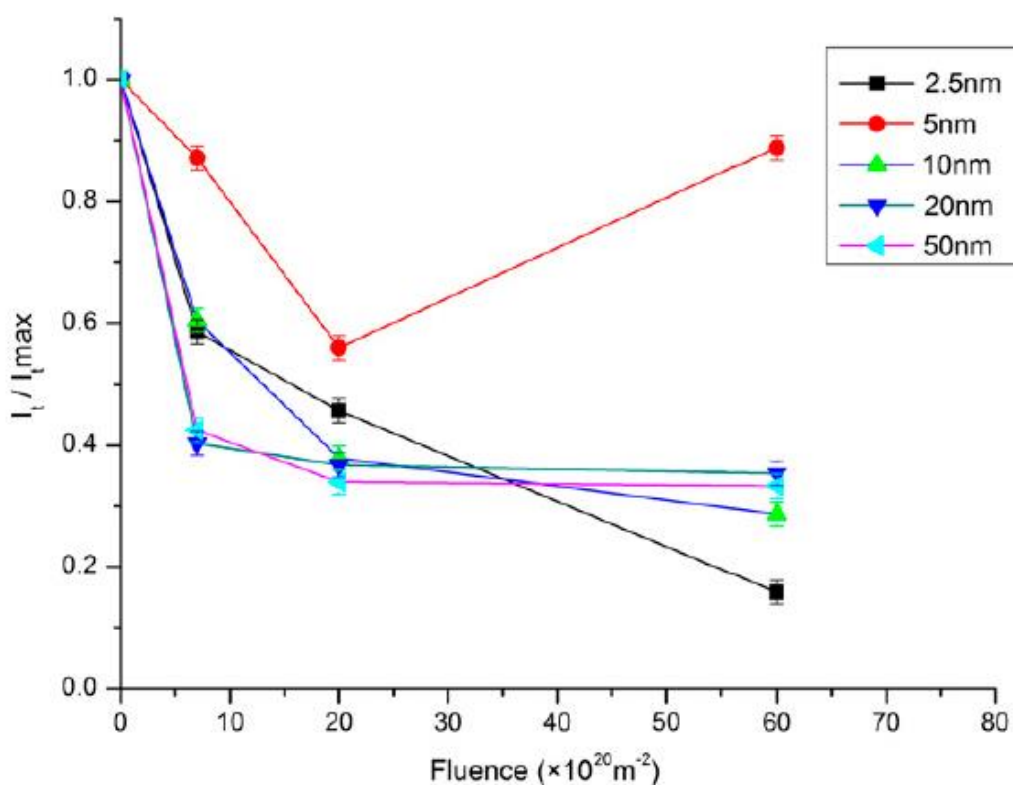


Рисунок 16 – Эволюция величины интеграла от интенсивности дифракции в регионе $38^\circ - 45^\circ$ для Cu/W многослойного покрытия с различными толщинами индивидуальных слоев, облученного ионами He^+ с энергией 50 кэВ [5]

Анализируя рисунок 16 можно выделить три основные тенденции. Для Cu/W2.5, интенсивность убывает при увеличении дозы облучения, данное явление вызвано по всей видимости разрушением зеренной структуры. В случае образцов Cu/W10, Cu/W20 и Cu/W50, интенсивность дифракции уменьшалась, по достижению флюенса $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ и далее практически не изменялась. Однако, для образца Cu/W5 при достижении флюенса $6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$

показатель интегрированной интенсивности возрастает. Это может быть связано с процессом восстановления зеренной структуры Cu/W5 при облучении.

В другой похожей работе [47] были исследованы Fe/W многослойные покрытия с толщинами индивидуальных слоев от 1 до 200 нм, в этом исследовании в отличие от работы [5] было проведено наноиндентирование, благодаря чему можно оценить радиационную повреждаемость через изменение механических характеристик, таких как твердость и модуль Юнга. Облучение проводилось ионами He⁺ с дозой 6 сна. В случае Fe/W наблюдается схожая картина с Cu/W многослойным покрытием, покрытие с меньшими толщинами индивидуальных слоев показывает большую радиационную стойкость (рисунок 17).

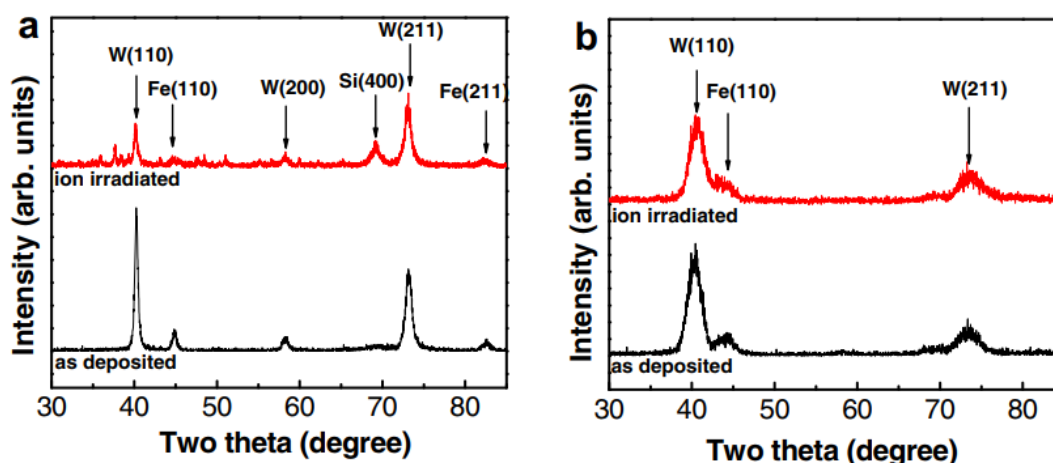


Рисунок 17 – Дифрактограммы Fe/W50 (a) и Fe/W5 (b) до и после облучения [47].

Графики, изображенные на рисунке 5 показывают большую стабильность покрытия с меньшей толщиной индивидуального слоя, однако в обоих случаях наблюдается уменьшение интенсивности и сдвиг рефлексов в сторону меньших углов, что свидетельствует о наличии сжимающих напряжений. В работе [47] это связывают с образованием междоузельных атомов внедрения, как атомов He так и атомов W и Fe. Также, ввиду того, что Fe и W являются

смешиваемыми металлами, выявленные нарушения кристаллической решетки могут быть связаны со смешиванием слоев Fe и W на границе раздела. Рентгенологические исследования показывают, что интенсивность рефлексов Fe (110) и W (110) уменьшаются после облучения ионами He⁺ и наблюдается уширение рефлексов. Снижение пиковой интенсивности является признаком нарушения порядка у кристаллических решеток ввиду возникновения радиационно-индуцированных точечных дефектов, а уширение рефлекса связано с микронапряжениями ввиду образования междоузельных атомов. Исследования ПЭМ показали, что средний диаметр образовавшихся пузырьков в слоях Fe немного больше чем в W. Исходя из выражения $p=2\gamma/r$, где γ это поверхностная энергия, а r радиус пузырька, критическая концентрация He для образования пузырьков пропорциональна γ , которая в свою очередь пропорциональна модулю сдвига [48]. Исходя из этого справедливо предположить, что размеры пузырьков отличаются ввиду разного значения модуля сдвига у Fe и W [49].

На рисунке 18 показана зависимость измеренной твердости облученных и исходных образцов в зависимости от $h^{-1/2}$, где h толщина индивидуального слоя.

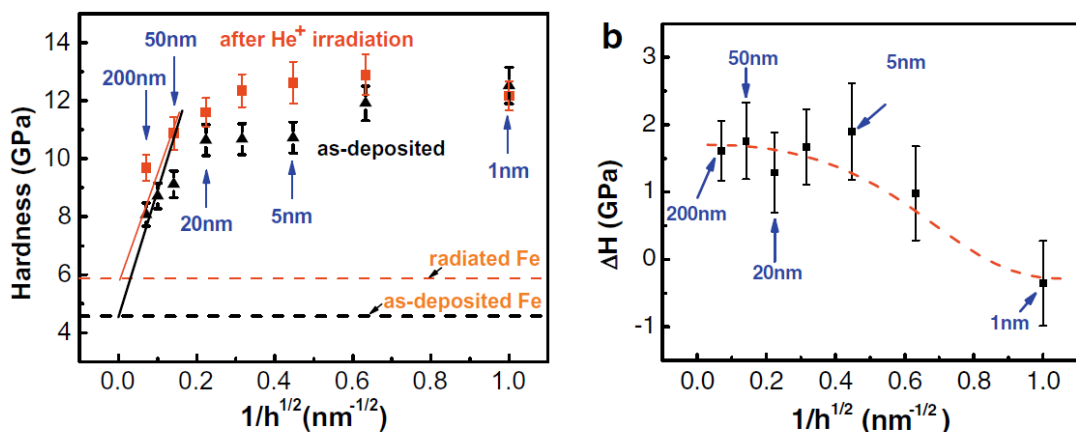


Рисунок 18 – (a) Зависимость твердости от величины от $h^{-1/2}$ для исходного и облученного Fe/W многослойного покрытия (b) График изменения твердости от $h^{-1/2}$ при облучении ионами He⁺ [47]

Для образцов многослойного покрытия, где толщина больше 50 нм твердость имеет линейную зависимость от $h^{-1/2}$, подчиняясь закону Холла-Петча, линейный участок на рисунке 18. С уменьшением толщины индивидуального слоя, твердость покрытия принимает нелинейную характеристику и достигает максимального значения 35,4 ГПа при толщине индивидуального слоя 1 нм. Независимо от толщины покрытия был отмечен эффект радиационного упрочнения. Для сравнения величины радиационного упрочнения приведен график на рисунке 18 (b). Исходя из полученных данных, после облучения ионами He^+ , твердость многослойных покрытий выросла на 1.5 – 2 ГПа при толщине индивидуального слоя больше 5 нм. Радиационное упрочнение имеет меньший эффект при толщине индивидуального слоя 2,5 нм и крайне малое изменение твердости при толщине 1 нм. В работе [48] с эффектом упрочнения при облучении ионами He^+ с тремя возможными причинами: пузырьки He , междоузельные петли, междоузельные внедрения He , и микроструктурная эволюция границы раздела между слоями (например смешивание).

Во многих других работах по изучению радиационной стойкости многослойных систем, таких как Cu/Nb [50-52], Ag/V [12], Fe/Cu [53], Zr/Nb [18, 19], Mo/Zr [54], также, как и в рассмотренных работах, многослойные системы показывают большую радиационную стойкость при меньших значениях толщины индивидуального слоя. Однако меньшая толщина индивидуального слоя означает большие требования с шероховатости подложки и большую вероятность уничтожения слоистой структуры в ходе радиационного воздействия. Более того, радиационная стойкость обусловлена не только толщиной индивидуального слоя, но и физическими характеристиками металлов образующих многослойную систему.

1.4 Влияние ионного облучения на Zr/Nb системы

На сегодняшний день существует большое количество работ направленных на изучение свойств различных наноразмерных металлических структур. Однако, работ, посвященных изучению радиационной стойкости и в особенности систем Zr/Nb не так много. Для анализа были выделены три работы, заслуживающие особенного внимания, исследования по ионному перемешиванию [55], облучению ионами Si [19] и ионами He [20].

В работе [55] исследованию подверглись многослойные Zr/Nb системы с толщиной слоев варьирующихся от 4 до 13 нм для Zr и 2 до 12 нм для Nb, с общей толщиной 50 нм. Образцы были облучены ионами Хе с дозами от $3 \cdot 10^{14}$ до 10^{16} см⁻², энергия составила 200 кэВ, ионный ток был равен 1 мкА/ см². В данной работе были выделены четыре образца с разной стехиометрией: Zr₁₉Nb₈₁, Zr₄₀Nb₆₀, Zr₆₈Nb₃₂, Zr₈₈Nb₁₂. В результате облучения был отмечен интересный факт, появление метастабильной кристаллической ГЦК фазы и аморфной фазы. В таблице 2 представлены данные о фазовых превращениях в ходе облучения.

Таблица 2 – Фазовые превращения для Zr/Nb систем с разной стехиометрией при облучении ионами Хе⁺ [55]

Образец	Доза (см ⁻²) обнаруженные фазы		
	$7 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$
Zr ₁₉ Nb ₈₁	ГЦК, a=4,35Å	ГЦК, a=4,35Å	ГЦК, a=4,35Å
Zr ₄₀ Nb ₆₀	-	-	аморфная
Zr ₆₈ Nb ₃₂	ГЦК(1)+ГЦК(2) a(1)=4.4 Å, a(2)=4,73 Å	ГЦК, a=4,35Å	ГЦК, a=4,35Å
Zr ₈₈ Nb ₁₂	-	ГЦК, a=4,8Å	аморфная

Как можно увидеть из таблицы, облучение ионами Xe^+ может приводить к образованию различных типов метастабильных ГЦК фаз даже при относительно малых дозах облучения. Также в данной работе было отмечено, что аморфная фаза является нестабильной и может претерпевать превращение в ГЦК фазу при комнатной температуре. Выбранная плотность ионного тока (1 мкА/см^2) препятствует сильному нагреву образца, следовательно, существует большая вероятность, что при нагреве образцов данные метастабильные фазы могут трансформироваться в стабильные ГПУ для Zr и ОЦК для Nb фазы.

В работе [19] как и в работе [55] для облучения были выбраны тяжелые ионы (Si^+). Для анализа были выбраны два типа покрытий, общая толщина обоих составила $1,35 \text{ мкм}$, однако архитектура слоев отличалась. В одном случае покрытие было представлено равными индивидуальными слоями по 3 нм каждый (Zr/Nb_6), а в другом случае 16 нм и 11 нм (Zr/Nb_{27}) для Zr и Nb соответственно. Похожая композиция была в работе [55], $\text{Zr}_{68}\text{Nb}_{32}$, где в результате наблюдалось появление ГЦК фазы. Покрытия были облучены двумя дозами, $4 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ ион/см². На рисунке 19 изображены дифрактограммы для исходных и облученных образцов.

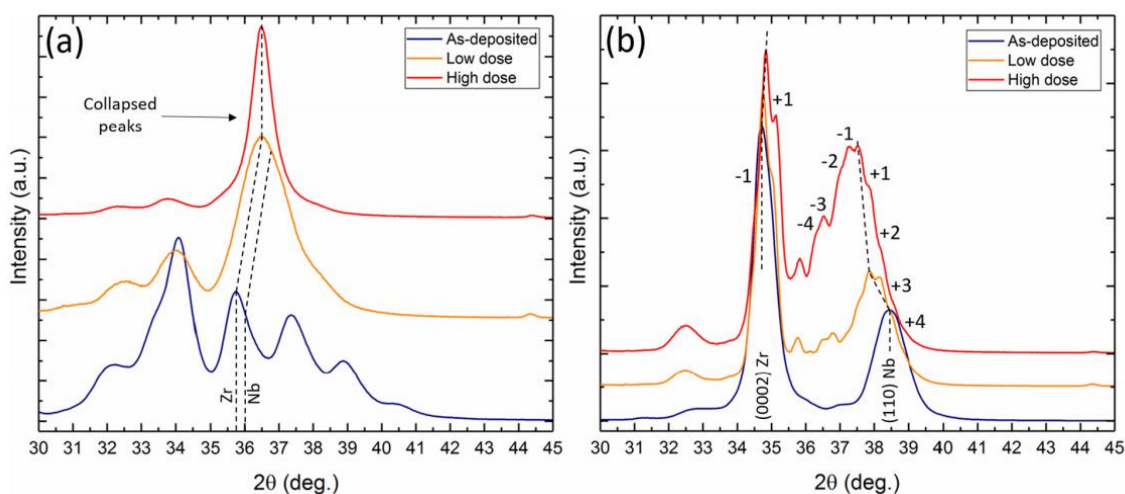


Рисунок 19 – Дифрактограммы Zr/Nb_6 (a) и Zr/Nb_{27} (b), до и после облучения.

Из представленных дифрактограмм видно, что для Zr/Nb_6 (а) облучение ионами Si^+ приводит к уменьшению интенсивности сателлитных рефлексов и к уменьшению ширины главного рефлекса. Уменьшение сателлитных рефлексов свидетельствует о снижении когерентности слоев. Сужение главного дифракционного пика свидетельствует о перекрытии пиков, соответствующих слоям Zr и Nb , что в свою очередь, как отмечают авторы, может связано с маленькой разницей в параметре решетки или с частичной аморфизацией покрытия. Тем не менее, в данной работе не учитывается возможность трансформации фазы Zr с ГПУ в ОЦК структуру, которая может происходить при малых толщинах слоев Zr , что было отмечено в работе [56]. Однако данный факт был отмечен для толщин слоев ~ 2 нм, при интенсивном ионном облучении могут образовываться метастабильные фазы. Исходя из этого вполне вероятно появление метастабильной фазы при чуть больших значениях (3 нм) толщины слоя. Для покрытий Zr/Nb_{27} появление сателлитных пиков было связано с увеличением когерентности. В целом в данной работе было отмечено возникновение неупорядоченных доменов в покрытиях, зон аморфизации, образование нанопустот. Для Zr/Nb_6 было отмечено разупорядочивание структуры на атомном уровне. Тем не менее, для обоих типов покрытия по результатам ПЭМ было отмечено сохранение слоистой структуры.

В работе [20] облучению подверглись покрытия Zr/Nb с толщинами слоев от 5 до 100 нм. Главное отличие данной работы заключается в том, что облучение проводилось ионами He , с энергией 40 кэВ с дозами 10^{16} , 10^{17} и $5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Рентгеноструктурный анализ показал, что при уменьшении толщины слоя наблюдается уширение пиков дифракции для плоскостей $Zr(10-10)$, $Nb(110)$, $Nb(200)$ и $Zr(20-20)$, а так же смещение пиков $Zr(10-10)$ и $Nb(110)$ при облучении. Данные факты указывают на наличие механических напряжений, связанных с высокой плотностью границ раздела, что может приводить к появлению зон аморфизации. С одной стороны, образцы с меньшей толщиной слоя имеют большее количество центров зарождения зон

аморфизации чем образцы с большей толщиной слоя. С другой стороны, образцы с большей толщиной слоя имеют больший объем для роста данных зон. Таким образом, ожидается, что плотность зон аморфизации будет больше у образцов с меньшей толщиной слоя, а размер этих зон будет больше у образцов с большей толщиной. Данное предположение было подтверждено в ходе исследования с использованием ПЭМ. На рисунке 20 представлены изображения ПЭМ и графики плотности и размера зон аморфизации для образцов, облученных с разными дозами.

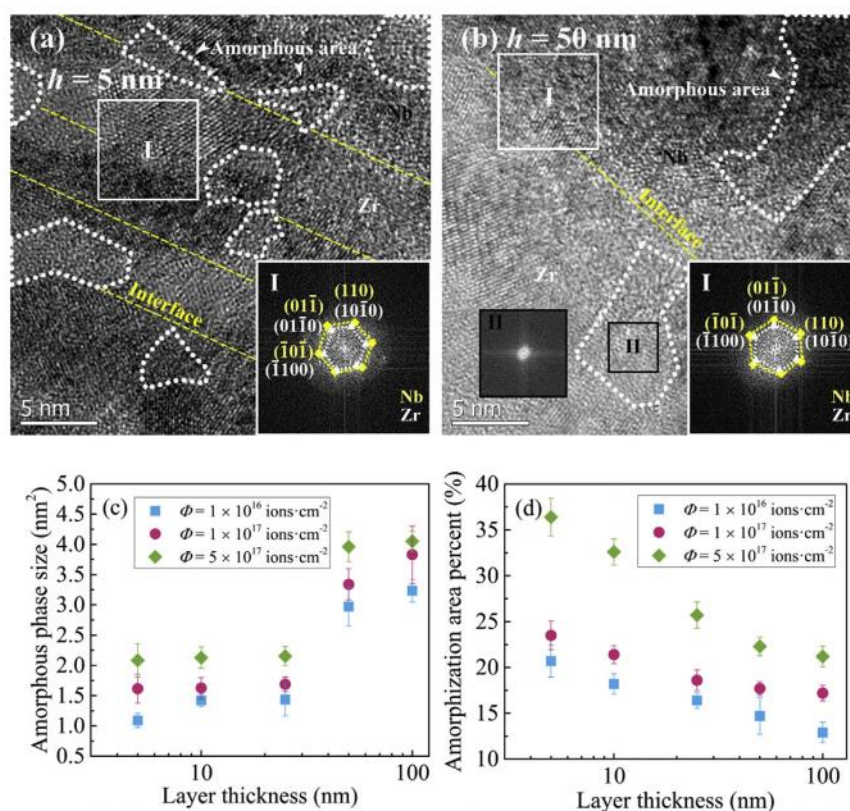


Рисунок 20 – Изображения ПЭМ иллюстрирующие зоны аморфизации для покрытий с толщиной слоя 5 нм (а) и 50 нм (б), статистические результаты распределения зон аморфизации (с, д)

Ввиду того что облучение производилось ионами He, очевидно что происходило образование газовых пузырьков. Как показали исследования, размер и плотность распределения пузырьков также сильно зависят от

толщины слоев покрытия. При меньших толщинах наблюдаются большие по размеру пузырьки, однако при больших толщинах наблюдается увеличенная плотность распределения пузырьков. Стоит отметить, что гелиевые пузырьки образовывались преимущественно в слоях ниобия.

ГЛАВА 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

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.

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;

- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной диссертационной работы – определение оптимальной толщины индивидуального слоя в многослойных Zr/Nb покрытиях, которая бы обеспечивала высокую структурную стабильность покрытий в условиях интенсивного воздействия пучка ионов гелия.

3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

3.1.1 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 4 представлена оценочная карта для сравнения конкурентоспособности двух данных материалов при их использовании в качестве радиационно-стойких материалов.

Таблица 4 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.

3.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4

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 5 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны: С1: Универсальность технологии нанесения покрытий С2: Неразрушающие методы контроля С3: Использование простых и одновременно надежных и достоверных методик исследования С4: Высокие механические и радиационные свойства покрытий</p>	<p>Слабые стороны: Сл1: Невозможность контролировать температуру во время облучения Сл2: Невозможность оценить изменения на атомном уровне Сл3: Высокие требования к шероховатости подложки Сл5: Невозможность определения концентрации дефектов</p>
<p>Возможности: В1: Внедрение технологии в ядерную и термоядерную энергетику В2: Изучения влияния термического фактора В3: Привлечение новых методов анализа: ПЭМ и электрон-позитронную аннигиляцию</p>	<p>В1С1С4: универсальность нанесения и высокие характеристики покрытий должны способствовать скорейшему внедрению в производство В2С2С3: возможность повторного использования образцов и наглядная демонстрация изменений ввиду контроля температуры</p>	<p>В1Сл2Сл3: отсутствие информации об атомном строении и высокие требования к подложке могут затормозить выход разработки на рынок. В3Сл2Сл5: с привлечением ПЭМ и электрон-позитронной аннигиляции станет возможным более тонкое и точное описание изменений в покрытиях</p>
<p>Угрозы: У1: Несвоевременное финансирование научного исследования при дальнейшем развитии проекта.</p>	<p>У1С1С3: ввиду применяемых методик и материалов проект не требует больших инвестиций и может</p>	<p>У1Сл1Сл2Сл5: Привлечение дополнительных инвестиций для технологии</p>

<p>У2: конкуренция технологий исследования.</p> <p>У3: Разработка сплавов с высокой радиационной стойкостью</p>	<p>Развитая</p>	<p>поддерживаться внутренним бюджетом</p> <p>У2С3С4: наша технология исследования отличается высоким качеством с одновременной простотой исполнения</p> <p>У3С4: учитывая механические качества покрытий, они могут быть переориентированы на другой рынок, например защитных, износостойких покрытий</p>	<p>исследования, путем участия в грантах.</p>
---	-----------------	---	---

Таким образом, проведенный SWOT-анализ показал, что на данном этапе технология исследования не лишена недостатков. Тем не менее, данные недостатки легко устраняемы, путем внедрения новых методов исследования. Несомненно, что на мировом рынке достоинства данной разработки должны быть оценены на высоком уровне.

3.2 Планирование научно-исследовательских работ

3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения исследовательского проекта формируется рабочая (научная) группа, в состав которой могут входить инженеры, техники, научные, сотрудники, преподаватели и лаборанты, численность группы может варьироваться. Каждый исполнитель получает соответствующую должность исходя из запланированных работ.

Для дальнейшей оценки экономической эффективности составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и распределение исполнителей по видам работ (таблица 6).

Таблица 6 – 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
	2	Изучение специальной литературы по теме работы	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Нанесение покрытий	Инженер
	4	Моделирование условий облучения, подбор режимов, подготовка образцов	Инженер
	5	Облучение образцов	Руководитель, Инженер
	6	Измерение электросопротивления	Инженер
	7	Проведение рентгеноструктурного анализа	Инженер
Оценка результатов	8	Оценка адекватности и достоверности результатов	Руководитель, Инженер
	9	Составление отчета НИР	Инженер

3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

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 $t_{ож}$ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (7)$$

где $t_{ожi}$ – 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.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (8)$$

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

$t_{ожi}$ – 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:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (9)$$

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

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

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (10)$$

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

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

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

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Для планирования НИР была выбрана диаграмма Ганта.

Для построения диаграммы Ганта необходимо определить длительность каждого из этапов работы (таблица 7).

Таблица 7 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Исп,	Трудоёмкость			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

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 8).

Таблица 8. Диаграмма Ганта

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



- научный руководитель



инженер

3.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

3.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

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.

Материальные затраты на покупку сырья, материалов и комплектующих изделий приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Мишень из циркония	ТПЧ, 100х6мм	1	39500	39500
Мишень из ниобия	ТПЧ, 100х6 мм	1	30700	30700
Монокристаллический кремний Si(111)	d = 100 мм	4	750	3000
Баллон гелия	марка 6.0	1	28000	28000
Всего за материалы				101200
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				3036
ИТОГО				104236

3.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (11)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

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

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таблица 10 – Амортизационные расходы

Наименование прибора	Стоимость, руб.	Срок полезного использования, лет	Норма амортизации, %	Срок эксплуатации, дней	Амортизационные расходы, руб.
Экспериментальная установка по напылению	9500000	15	6,6	0.5	26388
Установка «Shimadzu XRD-700S»	14800000	15	6,6	0.3	24666
Комплекс для измерения электросопротивления	115000	7	14	0.3	410
ИТОГО					51464

3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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 11.

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
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:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (13)$$

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:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (14)$$

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

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (15)$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад;

k_p – районный коэффициент (для Томска 1,3)

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 12

Таблица 12 – Основная заработная плата

Исполнитель	$Z_б$, руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , дней	Z_m , руб	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	31000	1670	32,1	40300	53607
Инженер	12300	663	167,9	12860	111240
ИТОГО					164847

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot k_{доп}, \quad (16)$$

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

Размер дополнительной заработной платы для руководителя составил 6433 руб., для инженера 13348 руб.

3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (17)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, равный 30 % (ст. 425, 426 НК РФ)

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Размер основной заработной платы, руб.	Размер дополнительной заработной платы, руб.
Руководитель	53607	6433
Студент	111240	13348
Коэффициент внебюджетных отчислений	0,3	
Итого: 55388 руб.		

3.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 14 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
51464	104236	164847	19781	55388	395716

Величина накладных расходов определяется по формуле (18):

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр}, \quad (18)$$

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

3.3.6 Бюджетная стоимость

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Структурная стабильность Zr/Nb многослойных систем при облучении ионами He⁺ в широком диапазоне доз» по форме, приведенной в таблице 15.

Таблица 15 – Группировка затрат по статьям

Наименование статьи	Сумма, руб,
1. Материальные затраты НИР	104236
2. Амортизационные отчисления	51464
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	164847
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	19781
5. Отчисления во внебюджетные фонды	55388
6. Накладные расходы	79143
7. Бюджет затрат НТИ	474859

3.4 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 – бальная 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 монтированию и использованию в рамках НТИ, а также вариант с закупкой оборудования и заказом на выполнение работ по его монтажке 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 16 – 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.

Выводы по разделу

По результатам выполнения целей раздела можно заключить следующее:

- 1) Анализ конкурентной способности реализовываемой технологий и проведение SWOT – анализа показали, что объект исследований и данный вариант реализации НИР имеет ряд преимуществ по сравнению с конкурентами.
- 2) Для четкого планирования проведения НИР был разработан график для руководителя и студента. Согласно расчетам, для выполнения работ потребуется 173,5 рабочих дней, из которых инженер работал 167,9 дней, руководитель – 32,1 день.
- 3) Общие затраты на исполнение НИР составили 474859 руб.
- 4) Значение интегрального показателя ресурсоэффективности для данного исполнения работы составляет 3,6, что делает данный проект наиболее ресурсоэффективным по отношению к другим вариантам исполнения.

ГЛАВА 4. Социальная ответственность

В данной работе исследуется структурная стабильность многослойных Zr/Nb покрытий в условиях интенсивного воздействия потока ионов He⁺ в широком диапазоне доз. Данные разработки радиационно-стойкого покрытия призваны обеспечить защиту конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов будущего поколения. Данная работа выполнена используя научную аппаратуру НИ ТПУ.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

При выполнении данной работы работник (студент) имеет согласно статье 91 ТК РФ нормальную продолжительность рабочего времени – 40 часов в неделю. В течение рабочего дня работнику должен предоставляться перерыв для отдыха и питания (ст. 108 ТК РФ) в размере 1 часа согласно правилам внутреннего распорядка. Согласно статье 14 федерального закона N 426-ФЗ, вид работы относится ко второму классу вредности. Тем самым, работник имеет право на ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск (ст. 117 ТК РФ) и повышение оплаты труда согласно статье 147 ТК РФ.

Для комфортной работы необходимо, чтобы работник имел свободный доступ к любой из частей экспериментальных установок, обеспечен всеми нужными инструментами и средствами СИЗ и СКЗ (ПНД Ф 12.13.1-03). Должна поддерживаться средствами кондиционирования воздуха оптимальная температура для данного времени года (СанПиН 2.2.4.3359-16). Значительная часть данной работы выполняется на ПЭВМ, тем самым работник должен быть обеспечен рабочим столом, ПЭВМ и помещением соответствующим правилам СанПиН 2.2.4.548-96.

4.2 Производственная безопасность

Данная работа предполагает использование экспериментальной установки для напыления покрытий, источника ионов «ПИОН-1М» для облучения образцов, установки «Shimadzu XRD 7000S» для рентгеноструктурного анализа, ПЭВМ и слаботоочного оборудования «Keithley» для измерения электрического сопротивления и анализа результатов. В Таблице 17 представлены выявленные вредные и опасные факторы.

Таблица 17. Вредные и опасные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Осаждение пленок Zr/Nb и облучение ионами He, НОЦ Б. П. Вейнберга, Научный парк ТПУ, ауд. 101	1)Отклонение показателей микроклимата в помещении 2)Превышение уровней шума 3)Недостаточная освещенность рабочей зоны 4)Ионизирующее излучение	1)Электрический ток 2)Пожарная опасность	1)ГОСТ 12.0.003-74 2)ГОСТ12.1.003-83 3)ГОСТ ИЕС 61140-2012 4)ГОСТ Р 12.1.019-2009 5)СанПиН 2.2.4.548-96 6)СанПин 2.2.4.3359-16 7)ГОСТ 15484-81 8)СанПиН 2.6.1.3289-15 9) ГОСТ 12.1.004-91
Рентгеноструктурный анализ и анализ результата , ОЭФ, 3 корп. ТПУ, ауд 106	1)Отклонение показателей микроклимата в помещении	1) Электрический ток 2)Пожарная опасность	

	2)Превышение уровней шума 3)Недостаточная освещенность рабочей зоны 4)Ионизирующее излучение		
Измерение электросопротивления, ОЭФ, 3 корп. ТПУ, ауд 123	1)Отклонение показателей микроклимата в помещении 2)Недостаточная освещенность рабочей зоны	2)Пожарная опасность	

4.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

4.3.1 Производственный шум

Для работы установки для напыления необходимо создание условий высоко 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.

4.3.2 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			

4.3.3 Освещенность

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

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

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры:

- при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300лк, а комбинированная - 750лк; аналогичные;

- при выполнении работ средней точности - 200 и 300лк соответственно.

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

4.3.4 Ионизирующее излучение

При использовании источника ионов «ПИОН-1М» возникает неиспользуемое рентгеновское излучение. Также в установке «Shimadzu XRD 7000S» присутствует рентгеновская трубка.

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 III 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 вентилирования 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,

спецодежда; 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.

4.3.5. 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.

4.4 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.

4.4.1 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 В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами

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 33 представлена схема эвакуации в случае возникновения пожара либо другой чрезвычайной ситуации.

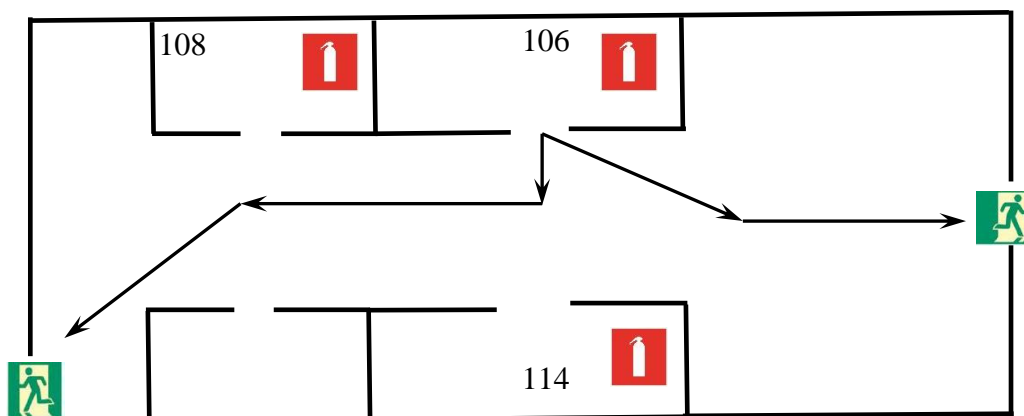


Рисунок 33 – План эвакуации рабочих из помещения лаборатории

4.5 Расчет первичных средств пожаротушения

Проведем расчет первичных средств пожаротушения для лаборатории 106 3 корпуса ТПУ.

Для того, чтобы рассчитать количество огнетушителей на данный отдел необходимо:

- 1) Отнести помещение, занимаемое данным отделом к определенной категории помещений. Существует шесть категорий помещений (Таблица 21);
- 2) Оценить предполагаемый класс пожара. Бывают следующие классы:
 - А - пожары твердых веществ, в основном органического происхождения ;
 - Б - пожары горючих жидкостей и плавящихся твердых веществ;
 - С - пожары газов;
 - Д - пожары металлов и их сплавов;
 - Е - пожары, связанные с горением электроприборов;

Таблица 21 – Нормы оснащения помещения ручными огнетушителями

Категория помещения	Предельная защищаемая	Класс пожара	Пенные и водные огнетушители	Порошковые огнетушители вместимостью, л			Хладоновые огнетушители	Углекислотные огнетушители вместимостью, л	
				2	5	10		2	5(8)
А,Б,В (горючие газы и жидкости)	200	А	2++	-	2+	1++	-	-	-
		Б	4+	-	2+	1++	4+	-	-
		С	-	-	2+	1++	4+	-	-
		Д	-	-	2+	1++	-	-	-
		(Е)	-	-	2+	1++	-	-	2++
В	400	А	2++	4+	2++	1+	-	-	2+
		Д	-	-	2+	1++	-	-	-
		(Е)	-	-	2++	1+	2+	4+	2++

Г	800	В	2+	-	2++	1+	-	-	-
		С	-	4+	2++	1+	-	-	-
Г, Д	1800	А	2++	4+	2++	1+	-	-	-
		Д	-	-	2+	1++	-	-	-
		(Е)	-	2+	2++	1+	2+	4+	2++
Общественные здания	800	А	4++	8+	4++	2+	-	-	4+
		(Е)	-	-	4++	2+	4+	4+	2++

Примечание к таблице: Знаком «++» обозначены рекомендуемые к оснащению объектов огнетушители. Знаком «+» - огнетушитель, применение которых, допускается при отсутствии рекомендуемых. Знаком « - » - огнетушители, которые не допускаются для оснащения данных объектов.

Кроме этого нужно учитывать следующие факты:

- Комплектование импортного огнетушителя производится согласно условиям договора на его поставку;
- При комбинированных очагах пожара предпочтение при выборе огнетушителя отдается более универсальному по области применения;
- В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должны размещаться не менее двух ручных огнетушителей.
- Помещения категории Д могут не оснащаться огнетушителями, если их площадь не превышает 100 кв. м.
- Огнетушители, отправленные с предприятия на перезарядку, должны заменяться соответствующим количеством заряженных огнетушителей.
- При защите помещений ЭВМ, телефонных станций, музеев, архивов и т. д. следует учитывать специфику взаимодействия огнетушащих веществ

с защищаемыми оборудованием, изделиями, материалами и т. п. Данные помещения следует оборудовать хладоновыми и углекислотными огнетушителями.

- На объекте должно быть определено лицо, ответственное за приобретение, ремонт, сохранность и готовность к действию огнетушителей.

Входными параметрами для расчета первичных средств пожаротушения будут:

- 1) Площадь помещения не более 200 м² (35,3 м²);
- 2) Класс предполагаемого пожара Е.

Ввиду того, что в лаборатории присутствует достаточное количество электрооборудования, был выбран класс предполагаемого пожара Е.

Исходя из данных таблицы 21, в лаборатории необходимо разместить 2 углекислотных огнетушителя вместимостью 5(8) литров. Огнетушители должны быть размещены в доступном месте и в пределах 20-30 метров от предполагаемого места возникновения пожара. Отвечающим требованиям огнетушителем является – огнетушитель углекислотный ОУ-5.

4.6 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 и отработанные мишени из циркония и ниобия (ГОСТ Р 54564-2011)

Утилизация металлических отходов состоит из нескольких технологических операций, включающих в себя:

1. 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.

Выводы по разделу

По результатам выполненной работы были сделаны следующие выводы:

- 1) Исполнитель данного проекта (студент) должен работать согласно ТК РФ по нормальному рабочему времени, хотя с учетом вредных и опасных факторов имеет право на прибавку к заработной плате и выделение дополнительных дней отпуска.
- 2) Были выявлены следующие вредные и опасные факторы: отклонение показателей микроклимата в помещении, превышение уровней шума, недостаточная освещенность рабочей зоны, ионизирующее излучение, поражение электрическим током, пожарная опасность
- 3) Был проведен анализ выявленных опасных и вредных факторов. Предложены меры по их устранению.

- 4) Был проведен расчет первичных средств пожаротушения в лаборатории, по результатам которого помещение лаборатории должно быть укомплектовано углекислотными огнетушителями ОУ-5.

Заключение

В работе исследована структурная стабильность многослойных покрытий Zr/Nb с различной толщиной индивидуального слоя при облучении ионами He⁺. Были получены образцы покрытия с толщинами индивидуальных слоев равными 10, 25, 50 и 100 нм. Облучение образцов проводилось ионами He⁺ с энергией 25 кэВ и флюенсом $1 \cdot 10^{16}$ - $1 \cdot 10^{18}$ ион/см². По данным моделирования SRIM в зависимости от флюенса количество смещений на атом составило 0,2 – 20,1 сна при концентрации имплантированного гелия 0,018 - 1,744 ат%. По данным проведенного рентгеноструктурного анализа и измерение электрического сопротивления можно сделать следующие выводы:

- исходные покрытия имеют преимущественную ориентацию, соответствующую плотноупакованным плоскостям Zr(002) и Nb(110), однако у покрытий с толщиной индивидуального слоя 10 нм отмечаются присутствие спутных рефлексов, вызванными градиентом механического напряжения;
- при больших дозах облучения ввиду перераспределения напряжений в слоях Zr отмечены изменения формы спутных рефлексов у покрытий с толщиной индивидуального слоя 10 нм;
- для покрытий с толщиной индивидуального слоя 50 и 100 нм происходит реориентация кристаллитов в слоях Zr при облучении с высокими дозами ($3 \cdot 10^{17}$ и $1 \cdot 10^{18}$ ион/см²);
- для всех покрытий характерно нарастание макронапряжений при увеличении дозы, причем данные напряжения противоположны по знаку в слоях Zr и Nb;
- изменение удельного электрического сопротивления носят стохастический характер, так для покрытий с толщиной слоя 50 и 100 нм зафиксировано как уменьшение, так и увеличение электрического сопротивления при изменении дозы. Для покрытий с толщинами слоев 10 нм отмечено увеличение (около 3%) сопротивления для всех доз облучения, для покрытий с толщиной слоя 25 нм электрическое сопротивление изменяется незначительно.

Наибольшую стабильность при воздействии ионного пучка He^+ демонстрируют покрытия Zr/Nb с толщиной индивидуального слоя 25 нм, что связано с особенностями повреждаемости индивидуальных слоев Zr и Nb. При данной толщине покрытий в выбранных режимах облучения достигается оптимальное состояние системы, при котором дефектная структура изменяется незначительно.

Список литературы

1. Ullmaier H., Schilling W. Radiation damage in metallic reactor materials //Physics of modern materials. Characterization of materials, defects and mechanical properties. – 1980.
2. Zinkle S. J., Was G. S. Materials challenges in nuclear energy //Acta Materialia. – 2013. – Т. 61. – №. 3. – С. 735-758.
3. Zhang X. et al. Interface-enabled defect reduction in He ion irradiated metallic multilayers //Jom. – 2010. – Т. 62. – №. 12. – С. 75-78.
4. Beyerlein I. J. et al. Radiation damage tolerant nanomaterials //Materials today. – 2013. – Т. 16. – №. 11. – С. 443-449.
5. Gao Y. et al. Radiation tolerance of Cu/W multilayered nanocomposites //Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Т. 413. – №. 1. – С. 11-15.
6. Callisti M., Karlik M., Polcar T. Bubbles formation in helium ion irradiated Cu/W multilayer nanocomposites: Effects on structure and mechanical properties //Journal of Nuclear Materials. – 2016. – Т. 473. – С. 18-27.
7. Li N. et al. The influence of interfaces on the formation of bubbles in He-ion-irradiated Cu/Mo nanolayers //Philosophical Magazine Letters. – 2011. – Т. 91. – №. 1. – С. 18-28.
8. Zhang J. Y. et al. Size-dependent plastic deformation characteristics in He-irradiated nanostructured Cu/Mo multilayers: Competition between dislocation-boundary and dislocation-bubble interactions //Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 673. – С. 530-540.
9. Höchbauer T. et al. Influence of interfaces on the storage of ion-implanted He in multilayered metallic composites //Journal of applied physics. – 2005. – Т. 98. – №. 12. – С. 123516.
10. Zhernenkov M. et al. Design of radiation resistant metallic multilayers for advanced nuclear systems //Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 104. – №. 24. – С. 241906.

11. Yu K. Y. et al. Comparisons of radiation damage in He ion and proton irradiated immiscible Ag/Ni nanolayers //Journal of Nuclear Materials. – 2013. – T. 440. – №. 1-3. – C. 310-318.
12. Wei Q. M. et al. Suppression of irradiation hardening in nanoscale V/Ag multilayers //Acta Materialia. – 2011. – T. 59. – №. 16. – C. 6331-6340.
13. Chen F. et al. Investigation of structural stability and magnetic properties of Fe/Ni multilayers irradiated by 300 keV Fe¹⁰⁺ //Journal of Nuclear Materials. – 2014. – T. 452. – №. 1-3. – C. 31-36.
14. Mao S. et al. Quantitative comparison of sink efficiency of Cu–Nb, Cu–V and Cu–Ni interfaces for point defects //Acta Materialia. – 2015. – T. 82. – C. 328-335.
15. Li N. et al. He ion irradiation damage in Al/Nb multilayers //Journal of Applied Physics. – 2009. – T. 105. – №. 12. – C. 123522.
16. Kondo R. et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast Zr–Nb alloys //Acta biomaterialia. – 2011. – T. 7. – №. 12. – C. 4278-4284.
17. Debski A., Debski R., Gasior W. New Features of Entall Database: Comparison of Experimental and Model Formation Enthalpies/Nowe Funkcje Bazy Danych Entall: Porównanie Doświadczalnych I Modelowych Entalpii Tworzenia //Archives of Metallurgy and Materials. – 2014. – T. 59. – №. 4. – C. 1337-1343.
18. Callisti M., Lozano-Perez S., Polcar T. Structural and mechanical properties of γ -irradiated Zr/Nb multilayer nanocomposites //Materials Letters. – 2016. – T. 163. – C. 138-141.
19. Callisti M., Karlik M., Polcar T. Competing mechanisms on the strength of ion-irradiated Zr/Nb nanoscale multilayers: Interface strength versus radiation hardening //Scripta Materialia. – 2018. – T. 152. – C. 31-35.
20. Liang X. Q. et al. Size-dependent microstructure evolution and hardness of He irradiated Nb/Zr multilayers under different ion doses //Materials Science and Engineering: A. – 2019. – T. 764. – C. 138259.

21. 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.
22. 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.
23. Буренков А. Ф. Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах/ А. Ф. Буренков [и др.]. М., 1985. 248 с.
24. Зеленский В. Ф. Радиационные дефекты и набухание металлов / В. Ф. Зеленский, И. М. Неклюдов, Т. П. Черняева. Киев, 1988. 296 с.
25. Сокурский Ю.Н. Электронная микроскопия радиационных дефектов и структурных превращений в металлах и сплавах // Там же. – С. 142-157
26. Ибрагимов Ш. Ш. Радиационные повреждения металлов и сплавов / Ш. Ш. Ибрагимов, В. В. Кирсанов, Ю. С. Пятилетов. М., 1985. 240 с.
27. Was G. S. Fundamentals of radiation materials science: metals and alloys. – Springer, 2016. – С. 415
28. Гусева М. И. Радиационный блистеринг / М. И. Гусева, Ю. В. Мартыненко // Успехи физических наук. 1981. Т. 135, вып. 4. С. 671-691.
29. Бондаренко Г. Г. Радиационный блистеринг материалов / Г. Г. Бондаренко. М., 1986. 52 с.
30. Домкус, А. П. Механические напряжения в имплантированных твердых телах / А. П. Домкус, Л. Пранявичус. Вильнюс, 1990. 158 с.
31. Y. Liu, D. Bufford, H. Wang, C. Sun, X. Zhang, Mechanical properties of highly textured Cu/Ni multilayers, Acta Materialia, 59 (2011) 1924-1933.
32. Zbib H. M. et al. Analysis of plastic deformation in nanoscale metallic multilayers with coherent and incoherent interfaces // International Journal of Plasticity. – 2011. – Т. 27. – №. 10. – С. 1618-1639.

- 33.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.
- 34.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.
- 35.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.
- 36.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.
- 37.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.
- 38.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.
- 39.Misra A. et al. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites //JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2007. – T. 59. – №. 9. – C. 62-65.
- 40.Chen Y. et al. In situ study of heavy ion irradiation response of immiscible Cu/Fe multilayers //Journal of nuclear materials. – 2016. – T. 475. – C. 274-279.
- 41.Wolfer W. G. Fundamental properties of defects in metals //Comprehensive nuclear materials. – 2012. – T. 1. – C. 1-45.
- 42.Hu W. et al. Analytic modified embedded atom potentials for HCP metals //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2001. – T. 13. – №. 6. – C. 1193.

43. Барабаш О. М., Коваль Ю. Н. Структура и свойства металлов и сплавов //Справочник. К: Наукова думка. – 1986. – С. 20
44. Смирнов Е.А. Термодинамика фазовых превращений в металлах и сплавах. Учебное пособие. М.: МИФИ, 1998. – С. 4-6
45. Mousavi M. S., Abbasi R., Kashani-Bozorg S. F. A thermodynamic approach to predict formation enthalpies of ternary systems based on miedema's model //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2016. – Т. 47. – №. 7. – С. 3761-3770.
46. Bagchi S. et al. Thickness dependent effect of swift heavy ion irradiation in W/Ni superlattice multilayers //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Т. 42. – №. 14. – С. 145414.
47. Li N. et al. He ion irradiation damage in Fe/W nanolayer films //Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Т. 389. – №. 2. – С. 233-238.
48. Trinkaus H., Singh B. N. Helium accumulation in metals during irradiation—where do we stand? //Journal of Nuclear Materials. – 2003. – Т. 323. – №. 2-3. – С. 229-242.
49. Anderson P. M., Hirth J. P., Lothe J. Theory of dislocations. – Cambridge University Press, 2017.
50. Demkowicz M. J., Hoagland R. G. Structure of Kurdjumov–Sachs interfaces in simulations of a copper–niobium bilayer //Journal of Nuclear Materials. – 2008. – Т. 372. – №. 1. – С. 45-52.
51. Bhattacharyya D. et al. A transmission electron microscopy study of the effect of interfaces on bubble formation in he-implanted Cu-Nb multilayers //Microscopy and Microanalysis. – 2012. – Т. 18. – №. 1. – С. 152-161.
52. Lach T. G. et al. Role of interfaces on the trapping of He in 2D and 3D Cu–Nb nanocomposites //Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Т. 466. – С. 36-42.
53. Kong-Fang W. et al. Modification of Fe/Cu multilayers under 400 keV Xe²⁰⁺ irradiation //Chinese Physics C (HEP & NP). – 2008. – Т. 32.

54. Wu S. H. et al. Effect of He-irradiation fluence on the size-dependent hardening and deformation of nanostructured Mo/Zr multilayers //International Journal of Plasticity. – 2018. – T. 111. – C. 36-52.
55. Jin O., Liu B. X. Non-equilibrium solid phases formed by ion mixing in the Zr-Nb system with positive heat of formation //Journal of Physics: Condensed Matter. – 1994. – T. 6. – №. 6. – C. L39.
56. Thompson G. B. et al. Phase stability of bcc Zr in Nb/Zr thin film multilayers //Acta materialia. – 2003. – T. 51. – №. 18. – C. 5285-5294.
57. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM–The stopping and range of ions in matter (2010) //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – T. 268. – №. 11-12. – C. 1818-1823.
58. Konobeyev A. Y. et al. Evaluation of effective threshold displacement energies and other data required for the calculation of advanced atomic displacement cross-sections //Nuclear Energy and Technology. – 2017. – T. 3. – №. 3. – C. 169-175.

**Приложение I
(справочное)**

Structural stability of multilayered Zr/Nb systems under He⁺ irradiation in a wide dose range

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ81	Кроткевич Дмитрий		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Кашкаров Е. Б.	к. ф.-м. н.		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Диденко А.В.	к. ф. н.		