

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 ООП/ОПОП Физика
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Тема работы
Анализ влияния термического отжига на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после облучения

УДК 621.793:[669.296:669.293]:539.16.04

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЭФ	Лаптев Роман Сергеевич	канд.тех.наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН, ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	канд.экон.наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ООД, ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	канд.биол.наук, доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЭФ, ИЯТШ	Склярова Е.А.	канд.пед.наук, доцент		

Томск – 2023 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде.
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке.
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах.
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять естественно-научные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
ОПК(У)-2	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов
ОПК(У)-3	Способен использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач.
ОПК(У)-4	Способен понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности.
ОПК(У)-5	Способен использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией.
ОПК(У)-6	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением

	информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
ОПК(У)-7	Способен использовать в своей профессиональной деятельности знание иностранного языка.
ОПК(У)-8	Способен критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости направление своей деятельности.
ОПК(У)-9	Способен получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах и других малых коллективах исполнителей.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
ПК(У)-2	Способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта
ПК(У)-3	Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований
ПК(У)-4	Способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин
ПК(У)-5	Способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований
ПК(У)-6	Способность понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований
ПК(У)-7	Способность участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме
ПК(У)-8	Способность понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования



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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

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

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна

Тема работы:

Анализ влияния термического отжига на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после облучения	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	30.01.2023, 30-90/с

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Объект исследования: наноразмерные металлические многослойные покрытия Zr/Nb.</p> <p>Методы исследования: протонное облучение на ускорителе ЭСГ 2,5 с энергией 1720 эВ, проведение термического отжига на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller, позитронная спектроскопия методом доплеровского уширения аннигиляционной линии с применением пучков позитронов переменной энергии.</p>
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников; – Подготовка наноразмерных металлических покрытий Zr/Nb; – Расчет параметров облучения протонами наноразмерных металлических слоев Zr/Nb; – Облучение многослойных покрытий Zr/Nb протонами; – Измерение импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в



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

	<p>наноразмерных металлических слоев Zr/Nb до и после протонного облучения;</p> <p>– Проведение термического отжига наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после протонного облучения при различных температурах;</p> <p>– Измерение импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb после облучения и отжига;</p> <p>– Анализ результатов импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb после протонного облучения и отжига;</p> <p>– Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;</p> <p>– Раздел «Социальная ответственность»;</p> <p>– Заключение.</p>
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	Былкова Татьяна Васильевна
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЭФ	Лаптев Роман Сергеевич	канд.тех.наук		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна		

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.03.02 Физика
 Уровень образования бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна

Тема работы:

Анализ влияния термического отжига на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после облучения

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
28.11.22	Аналитический обзор литературы	20
23.02.23	Проведение экспериментальной части исследования	25
20.03.23	Анализ результатов	30
25.05.23	Социальная ответственность	10
25.05.23	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
30.05.23	Заключение	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЭФ	Лаптев Роман Сергеевич	канд.тех.наук		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЭФ, ИЯТШ	Склярова Е.А.	канд.пед.наук, доцент		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 105 с., 22 рис., 17 табл., 149 источников, 1 прил.

Ключевые слова: металлические покрытия, многослойные покрытия, облучение протонами, термический отжиг, позитронная спектроскопия.

Объектом исследования являются наноразмерные металлические многослойные покрытия Zr/Nb с толщиной индивидуальных слоёв 50 нм.

Цель работы: анализ влияния термического воздействия на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после протонного облучения.

В ходе исследования проводилось облучение наноразмерных металлических многослойных покрытий Zr/Nb протонами с энергией 1720 кэВ; проводился анализ дефектной структуры полученных покрытий до и после облучения, и после термического отжига посредством позитронной спектроскопии методом доплеровского уширения с использованием пучков позитронов переменной энергии.

В результате исследования установлено, что термический отжиг стимулирует диффузию дефектов в сторону ближайших интерфейсов, где они аннигилируют. При увеличении температуры термического отжига количество дефектов внутри слоев уменьшается, из-за достижения интерфейсов большого количества дефектов и последующей их аннигиляции. Происходит отжиг не только радиационных дефектов, но и дефектов, образовавшихся в ходе получения покрытий. Существует преимущественный центр захвата позитронов вблизи границы раздела.

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

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

Оглавление

Введение.....	10
1 Самовосстановление материалов	13
1.1 Обзор достижений в области материалов, механизмы и характеристики	13
1.1.1 Самовосстанавливающиеся материалы на основе полимеров	14
1.1.2 Самовосстанавливающиеся материалы на основе керамики	19
1.1.3 Самовосстанавливающиеся материалы на основе металлов.....	22
1.1.4 Самовосстанавливающиеся материалы – наноразмерные многослойные металлические покрытия.....	25
1.2 Дефекты в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb	32
1.2.1 Дефекты в ОЦК металлах.....	33
1.2.2 Дефекты в ГПУ металлах	34
2 Материалы и методы исследования	36
2.1 Подготовка образцов	36
2.2 Облучение протонами	37
2.3 Термический отжиг образцов	38
2.4 Метод позитронной аннигиляционной спектроскопии	39
2.4.1 Теоретические основы методов ПАС	39
2.4.2 Метод доплеровского уширения аннигиляционной линии.....	41
3 Результаты и обсуждения.....	44
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	47
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	48
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	49

4.2	Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	53
4.3	Планирование научно-исследовательской работы.....	54
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ..	63
	ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	67
5	Социальная ответственность	69
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	70
5.2.	Производственная безопасность	72
5.2.1.	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	74
5.3.	Экологическая безопасность.....	80
5.4.	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	81
	Выводы.....	83
	Заключение	84
	Список литературы	85
	Приложение 1	101

Введение

Разработанные на сегодня технологии, позволяют человеку совершать действия, которые раньше казались невозможными – связываться с другом, находясь при этом за тысячи километров; перемещаться между континентами за несколько часов; проводить сложнейшие операции, требующие высокой точности и сосредоточенности, с помощью роботов; летать в открытое пространство и изучать Вселенную. Но все данные достижения человечества сопровождаются трагичными моментами: выход из строя техники, аварии, крушения, взрывы и т.п. Одной из причин таких моментов является несовершенство материалов, которые используются при создании объектов. Ионизирующее излучение, водородное охрупчивание, коррозия и другие явления оказывают негативное влияние на физико-механические свойства материалов, которое может привести к их разрушению. Такого итога можно избежать, если бы материалы при повреждении могли сами восстановиться без вмешательства в процесс человека. Это бы не только сделало объекты долговечнее и дешевле, но и безопаснее. Поэтому одним из активно развивающихся научно-исследовательских направлений является создание самовосстанавливающихся материалов.

Одним из возможных способов создания самовосстанавливающихся материалов является нанесение наноразмерного многослойного покрытия (НМП) Zr/Nb. Благодаря несоответствию кристаллических решеток (ГПУ/ОЦК соответственно), полукогерентные и некогерентные границы разделов являются хорошими поглотителями дефектов открытого типа и барьером для движения дислокаций. То есть будет происходить следующий эффект, если один из атомов в одном из слоев будет смещен или будет образован дефект под действием, например, ионизирующего излучения, то

атом из другого слоя материала займёт его место, произойдет самовосстановление.

Но данная ситуация происходит только на интерфейсах, многие дефекты остаются внутри одного из слоев и дальше либо не двигаются, либо продвигаются очень медленно, такое покрытие быстро заполняется дефектами и в последующем не может также хорошо поглощать их, поэтому одним из вариантов обновления такого покрытия может служить отжиг материала. Предполагается, что, нагрев будет стимулировать диффузию дефектов в сторону интерфейсов, тем самым помогая им там аннигилировать.

Для проверки данного предположения эффективнее всего воспользоваться позитронной аннигиляционной спектроскопией, а именно методом доплеровского уширения аннигиляционной линии, поскольку данный метод позволит обнаружить вероятное местонахождение дефектов внутри каждого из слоев системы и поможет определить тенденцию их распределения под влиянием температуры. В связи с тем, что одними из возможных сфер применения систем из Zr/Nb являются термоядерная энергетика и аэрокосмическая промышленность, изучение свойств НМП проводится после образования радиационных дефектов внутри материала из-за облучения его протонами, которое имитируют нейтронное излучение.

Таким образом, целью данной работы является анализ влияния термического воздействия на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после протонного облучения.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Расчет параметров облучения протонами наноразмерных металлических слоев Zr/Nb;
2. Облучение наноразмерных металлических слоев Zr/Nb протонами;
3. Измерение импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb до и после протонного облучения;

4. Проведение термического отжига наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после протонного облучения при различных температурах.

5. Измерение импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb после облучения и отжига;

6. Анализ результатов импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb после протонного облучения и отжига.

1 Самовосстановление материалов

Материалы неизбежно получают различные повреждения при их эксплуатации, такие как трещины, расслоение, точечные дефекты, что приводит к снижению производительности. Самовосстанавливающиеся или по-другому «самозалечивающиеся» материалы могут полностью или частично восстанавливаться после повреждения, поэтому «работоспособность» материалов может быть воссоздана до начального состояния. Существуют самовосстанавливающиеся материалы из полимеров, керамики, металлов. У всех из них разные механизмы и характеристики восстановления.

1.1 Обзор достижений в области материалов, механизмы и характеристики

Самовосстанавливающиеся материалы — это искусственные или синтетически созданные вещества, обладающие способностью автоматически устранять повреждения без внешней диагностики проблемы или вмешательства человека [1].

Как правило, материалы со временем разрушаются из-за усталости, условий окружающей среды или повреждений в процессе эксплуатации. Было доказано, что трещины и другие виды повреждений изменяют тепловые, электрические и акустические свойства материалов на микроскопическом уровне, а распространение трещин может привести к необратимому разрушению материала, и таким образом значительно сократит срок их использования [2-5]. Как правило, трещины трудно обнаружить на ранней стадии, а периодические осмотры и ремонт требуют ручного вмешательства. В отличие от них, самовосстанавливающиеся материалы противостоят деградации путем запуска механизма ремонта, реагирующего на микроповреждения [1].

Хотя наиболее распространенными типами самовосстанавливающихся материалов являются полимеры или эластомеры, самовосстановление охватывает все классы материалов, включая металлы, керамику и цементные материалы. Механизмы самовосстановления варьируются от собственного восстановления материала до добавления восстанавливающего вещества, содержащегося в микроскопическом сосуде [6].

Чтобы продлить срок службы материалов и удешевить их использование, за счет того, что не потребуется частная замена деталей в различных механизмах или обновления покрытий, например, требуется создание самовосстанавливающихся материалов и изучение механизмов их самовосстановления.

Идея создания самовосстанавливающихся материалов появилась всего несколько десятилетий назад и активно продвигается сегодня, а при каждодневных новых открытиях и развития современных технологий, у данного направления материаловедения существует шанс сделать большой шаг вперед.

Сложный характер процессов, участвующих в самовосстановлении исходных характеристик материалов, требует понимания многоуровневых молекулярных, микроскопических и макроскопических процессов [7, 8]. В данном литературном обзоре будут рассмотрены основные механизмы получения эффектов самовосстановления в различных веществах и создания на их основе материалов перспективных для использования в разных отраслях промышленности и науке.

1.1.1 Самовосстанавливающиеся материалы на основе полимеров

В последнее время наука о полимерах достигла того уровня, когда стало возможным синтезировать "умные" полимеры, обладающие замечательной, вдохновленной биологией способностью полностью восстанавливать свои первоначальные свойства, в идеале без внешнего воздействия. Такие

полимеры составляют одну из важнейших категорий самовосстанавливающихся материалов - внутренне самовосстанавливаемые полимеры. В этом случае восстановление достигается за счет встраивания внешних полимеризуемых заживляющих или целебных агентов. Во многих случаях эти целебные агенты хранятся в микрокапсулах [8-11].

Концепция внутреннего заживления выглядит следующим образом: микрокапсулированный заживляющий агент внедряется в структурную эпоксидную матрицу, содержащую катализатор, который способен полимеризовать заживляющую жидкость. Тогда, когда в материале образуются трещины в местах воздействия на него, то они разрывают микрокапсулы, высвобождая при этом лечебный вещество в плоскость трещины посредством капиллярного действия. Далее заживляющая жидкость контактирует с катализатором, который случайным образом распределен в матрице объекта, и запускает реакцию полимеризации, которая помогает залечить повреждение путем склеивания поверхностей трещин (см. рис. 1.1) [11-15]. Этот подход был успешно продемонстрирован для заживления трещин и усталостных повреждений в композитных матрицах [16].

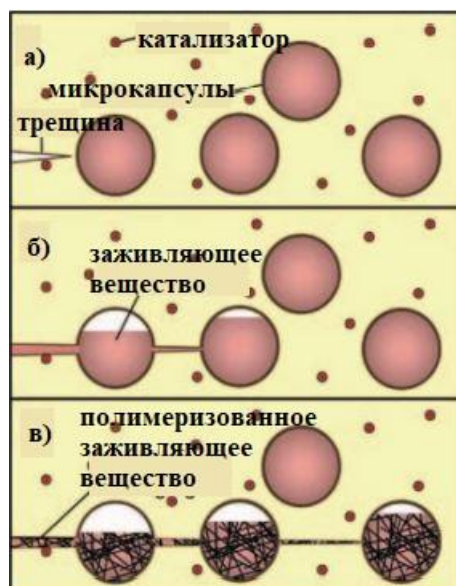


Рисунок 1.1 – Внутренняя система самовосстановления [11]

Также, следует отметить, что правильная инкапсуляция целебного вещества имеет решающее значение для продления реакционной способности

материалов и минимизации их взаимодействия с сыпучими материалами покрытий [11], которые могут быть на них нанесены.

Среди первого поколения самовосстанавливающихся систем этого типа был классический пример, о котором сообщили Уайт и Соттос [11]. В этом исследовании микрокапсулы полимочевины-формальдегида (ПМФ) размером 220 мкм использовались для хранения мономеров дициклопентадиена (ДЦПД). Эти микрокапсулы рассредоточились в матрице покрытия отдельно от катализатора, способного полимеризовать мономеры. Разрыв микрокапсул из-за распространения трещины в покрытии освободил мономеры, которые заполнили трещину и полимеризовали встроенным катализатором для связывания границы раздела трещины. Эффективность заживления составила около 60% от первоначальной нагрузки на трещину. Ряд других новаторских примеров с использованием подобных концепций был позже разработан данной группой [16-18]. Также эта же концепция была применена и к разработке самовосстанавливающегося антикоррозионного покрытия [19]. Преполимеры полидиметилсилоксана (ПДМС) и катализатор диметилдинодеканата (ДМДНД) хранились в микрокапсулах ПМФ (размером ~ 50 мкм) и полиуретане (ПУ; размером ~ 100 мкм) соответственно. Разрыв обеих микрокапсул привел к полимеризации ПДМС (при нагревании при 50 °С) внутри трещины, восстанавливая антикоррозионное покрытие, нанесенного на холоднокатаную сталь.

В научной публикации [20] исследователи использовали эмульсию Пикеринга для получения микрокапсул, содержащих эпоксидное и тетраэтиленпентаминовое (ТЭПА) отверждающее вещество, и встраивали их в покрытие. Когда покрытие было повреждено, эпоксидная смола и аминное отверждающее вещество выливались и реагировали с образованием защитного слоя, покрывающего открытую стальную подложку.

Одним из ограничений, связанных с использованием двухкомпонентных целителей, является неравномерное распределение микрокапсул по всему

покрытию, что затрудняет смешивание и отверждение двух частей в соответствии с желаемыми соотношениями.

Самовосстанавливающиеся материалы, основанные на технологии микрокапсул, могли быстро и эффективно заживлять трещины и применялись в бетоне, органических лакокрасочных материалах [21], электронных компонентах [22] и многих других областях. Однако самым большим недостатком этой технологии является то, что микрокапсулы неравномерно диспергированы в матрице, что приведет к плохой самовосстанавливающейся производительности местных материалов или даже не сможет завершить процесс самовосстановления. Более того, когда заживляющий агент вытекает из микрокапсул, само тело микрокапсулы образует зазор, влияющий на общую производительность материала. Большинство исследований систем заживления на основе микрокапсулятов показывают только разовые показатели самовосстановления, что серьезно ограничивает их практическое применение [23].

Помимо микрокапсулирования самовосстановление механических повреждений в полимерных системах может быть достигнуто за счет использования ковалентных связей или с помощью нековалентных взаимодействий. В первом случае используются различные реакции сшивания, Дильса-Альдера и другие. Нековалентное заживление может быть реализовано за счет образования водородных связей и комплексных соединений, ароматического взаимодействия (π - π -взаимодействия), ионного взаимодействия, сил Ван-дер-Ваальса и других нековалентных взаимодействий. Для заживления могут быть также использованы различные золь-гель процессы. Изменение вязкости при изменении скорости сдвигового течения некоторых олигомерных и полимерных материалов может при определенных условиях придавать им характеристики самовосстановления [24-30].

Реакции так называемого «сшивания» могут быть самоинициированы или вызываться облучением и механическим воздействием на специально

введенные низкомолекулярные соединения или на реакционные группы, связанные с основной цепью макромолекулы.

Примером залечивания с помощью ковалентного сшивания является использование реакций, приводящих к формированию устойчивых связей между ацилгидразиновыми группами на концах макромолекул полиэтиленоксида (ПЭО). Фотографии, иллюстрирующие самозаживляющие свойства геля модифицированного ПЭО, показаны на рисунке 1.2 [31].

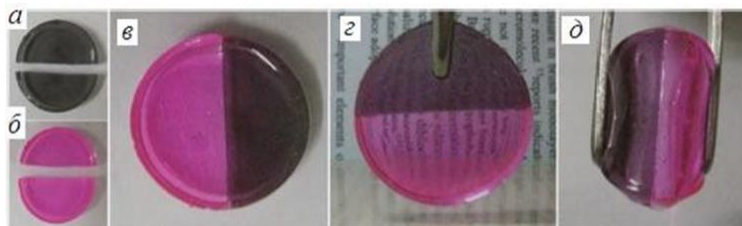


Рисунок 1.2 – Фотографии самовосстанавливающегося геля ПЭО: (а, б) каждый из образцов разделен пополам, (в, г) половинки разноокрашенных образцов соединили вместе, (д) попытка деформирования образца пинцетом через 7 часов после соединения половинок [31, 32]

Два образца геля были окрашены (один – сажой, другой – родамином) и разрезаны. Далее половина образца, окрашенного сажой, была приведена в контакт с половиной, окрашенной родамином. После семи часов при комнатной температуре эти две половины соединились в единый достаточно прочный материал [7, 33, 34].

Реакции циклоприсоединения Дильса-Альдера также могут быть использованы для реализации механизма самовосстановления в полимерных материалах (см. рис. 1.3) [32, 35]. Такие реакции представляют собой согласованное присоединение 4+2, протекающее между 1, 3- диеном и ненасыщенным соединением – диенофилом. Обычно диен содержит электронодонорный заместитель, а диенофил – электроноакцепторную группу. Менее распространён вариант, когда электронообогащённым соединением является диенофил [36]. Реакция Дильса-Альдера используется в таких специально модифицированных материалах, как эпоксидные смолы, полиакрилаты и полиамиды. Образование связей между диеном и диенофилом

после их физического разрыва может стимулироваться внешним излучением на материал или повышением его температуры, однако чрезмерное повышение температуры может приводить к разрушению образовавшихся связей.

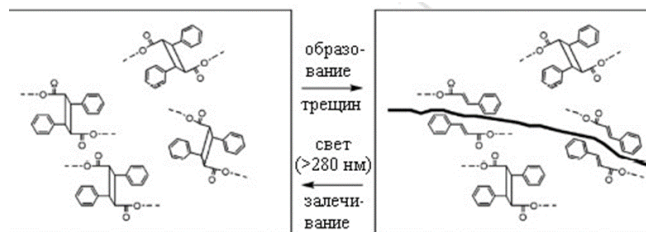


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение реализации механизма самовосстановления посредством реакции циклоприсоединения при облучении материала ультрафиолетовым излучением [32, 35]

Таким образом данный вид материалов, для восстановления которого требуется внешнее воздействие, показывает хорошие восстанавливающиеся свойства. Но они имеют явный недостаток, заключающийся в необходимости наличия внешнего инициирования реакции в виде повышения температуры или направления излучения.

1.1.2 Самовосстанавливающиеся материалы на основе керамики

Керамика - традиционный и перспективный материал для использования при высоких температурах и в коррозионных условиях. Она была разработана для композитных материалов с целью повышения их хрупкости и трещиностойкости; к ним относятся, к примеру, глинозем (Al_2O_3), муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ или $2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SiO}_2$) и карбид кремния (SiC). Отличные прочностные свойства и жаростойкость необходимы в двигателях внутреннего сгорания, поскольку они подвергаются нагрузкам 500-800 Н/мм² и температурам 1000 °С [37]. Однако за последние два десятилетия этому аспекту было посвящено лишь ограниченное число исследований. В начале 2000-х годов самовосстановление структурной керамики было реализовано путем окисления неоксидных заживляющих веществ при высокой

температуре [38-42]. Восстановление механических свойств (статическая прочность, усталостная прочность и вязкость разрушения) предварительно трещиноватого (100-200 мкм) муллита/SiC или композита Al_2O_3/SiC исследовалось при повышенной температуре 900-1400 °С. Процесс нагрева проводился в течение 1-300 ч на воздухе, а в качестве заживляющего вещества использовались наноразмерные частицы SiC. Сообщалось, что меньший размер частиц способствует окислению при низкой температуре, но размер частиц менее 10 нм недостаточен для заполнения трещин. Доставка кислорода в керамических материалах обычно низкая, поэтому процесс окисления занимает относительно много времени (10^2 - 10^3 часа). Кроме того, 0,2 об. % MnO был разработан в качестве активатора в композитах $Al_2O_3/30$ об. % SiC, чтобы способствовать доставке кислорода к заживляющему агенту (см. рис. 1.4) [43].

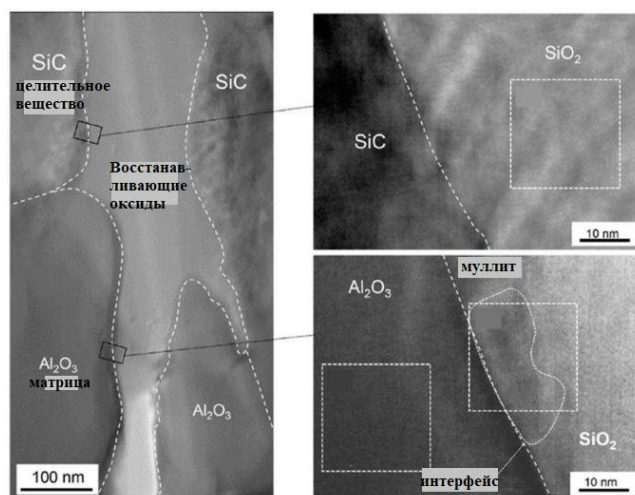


Рисунок 1.4 – Структура пор в композитах Al_2O_3/SiC , залеченных при 1473 К. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения залеченных трещин на границе раздела между SiC и SiO_2 и между Al_2O_3 и SiO_2 [43]

По данным [43], производство оксидов для заполнения трещины ускорялось, необходимая температура нагрева снижалась, а время полного заживления сокращалось в 6000 раз до 10 мин. Эта новая идея, вдохновленная процессом заживления костей, внесла значительный вклад в то, чтобы сделать

самовосстановление хрупких керамических материалов более реалистичным [44].

Самовосстановления наблюдаются также в керамических материалах, содержащих фазы $M_{n+1}AX_n$ (MAX-фаза), где M – переходный металл, A – элемент IIIA или IVA подгруппы периодической системы, X – углерод или азот. Объем оксида обычно превышает объем исходного материала. В итоге микротрещины получают заполненными окислами A - элемента, сформированными из составляющих MAX-фазы во время воздействия высокой температуры в кислородосодержащей атмосфере. Как результат, продукты этих реакций из-за увеличения объема могут быть использованы для заполнения небольших трещин [45-49].

Например, в самовосстанавливающейся Ti_2AlC керамике используется эффект заполнения трещины соединениями $\alpha-Al_2O_3$ и TiO_2 , образующимися при высокой температуре в воздушной среде (см. рис. 1.5) [48, 49].

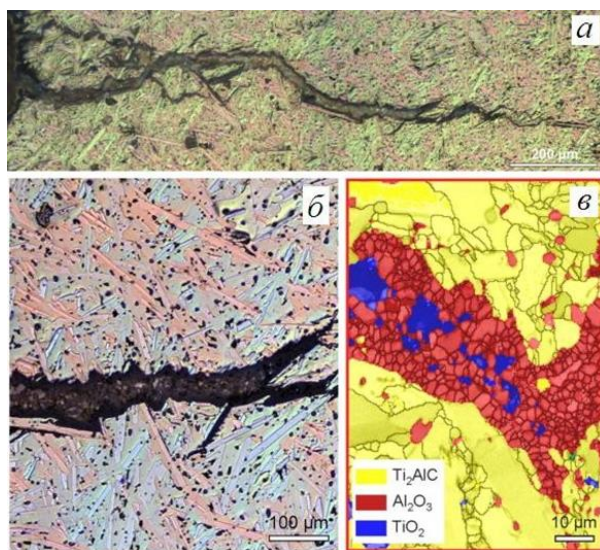


Рисунок 1.5 – Изображение полностью «залеченной» трещины: (а) после выдержки в печи при 1200 °С в течение 100 часов, (б) увеличенное изображение, (в) «картирование» по элементному составу соединений в «залеченной» трещине [48]

Ещё один из примеров «самозалечивания» керамики – самовосстанавливающее окисление SiC-керамики. Активный SiC

наполнитель, внедренный в матрицу, окисляется проникающим кислородом, тем самым образованный SiO_2 полностью заполняет трещину [42, 47].

1.1.3 Самовосстанавливающиеся материалы на основе металлов

Как известно, металл является одним из самых прочных и широко используемых материалов с начала истории человечества до наших дней. Анализируя выше перечисленные методы самовосстановления для других видов материалов, трудно представить себе возникновение самовосстановления в таком твердом материале; это явление было изучено в ряде экспериментов и расчетных работ. Количество публикаций по самовосстановлению в металлах явно меньше, чем по другим материалам, но в последние годы интерес к ним быстро растет [50, 51].

По сравнению с быстрыми и эффективными реакциями в полимерах, атомная связь в металлах сильная; таким образом, требуется высокая энергия для доставки заживляющего агента к трещинам. Способность самозалечивания в металлах заключается в этой основной концепции для различных методов, включая капсулы с залечивающим веществом, атомы сплава, покрытия или электронагрев. В рамках этой концепции наиболее интенсивно изучается осаждение атомов пересыщенного растворителя при высокой температуре. По этой причине температура должна быть достаточно высокой, чтобы способствовать решеточной диффузии растворителей, но не слишком. Если рассматривать в общем, то возможность достижения заживления трещин или пустот в металлах тесно связана с атомной подвижностью атомов растворителя. Полное восстановление механических свойств с помощью этого подхода еще не достигнуто, однако ключевым фактором, позволяющим восстановить трещину, является подвижность атомов растворителя, которые могут заполнить трещину. Подвижность таких атомов стимулируется при повышенной температуре, такой как половина значения температуры плавления. В рамках этой концепции были

использованы ферриты и алюминиевые сплавы, индуцированные золотом, вольфрамом, молибденом, бором и нитридом [52,53,54].

Следует отметить, что механические свойства всех материалов еще не были оценены. Самой важной причиной необходимости лечения конструкции является предотвращение её внезапного разрушения. Прочные металлические материалы должны восстанавливать свою механическую прочность не только путем заполнения полостей, но и посредством химической связи.

Следующие подходы к достижению самовосстановления металлов не являются автономными; они требуют внешнего источника энергии (например, высокой температуры) и не могут быть использованы для восстановления первоначальных механических свойств; таким образом, значение термина "самовосстановление" становится несколько расплывчатым. Независимо от того, какой из методов используется, следует отметить, что несовместимость между заживляющим агентом и заживляемым материалом может вызвать другие проблемы, такие как несоответствие решетки и изменение состава сплава. Тем не менее, имеет смысл обсудить последние достижения в области заживления полостей в металлах.

Один из возможных подходов к заживлению полостей в аустенитных нержавеющей сталях был экспериментально продемонстрирован учёным Шинья и другими [55, 56]. Они сообщили об осаждении нитрида бора (BN) на поверхности полостей ползучести во время ползучести и его благотворном влиянии на свойства разрыва при ползучести. Было сделано предположение, что осаждение BN на поверхности полости ползучести наделяет аустенитную нержавеющую сталь способностью к самовосстановлению при кавитации ползучести с сопутствующим увеличением прочности и пластичности при разрыве при ползучести. Как показано на рисунке 1.6, атомы бора и азота агрегируются на поверхности полости, тем самым подавляя рост полости. Здесь рассматриваются два основных механизма процесса заживления: (1) интерстициальная диффузия заживляющих материалов (B, N) и (2) осаждение атомов на поверхности полости. Важно отметить, что эффективность

заживления может зависеть от подвижности заживляющих материалов, которая может быть ускорена при высоком давлении или температуре.

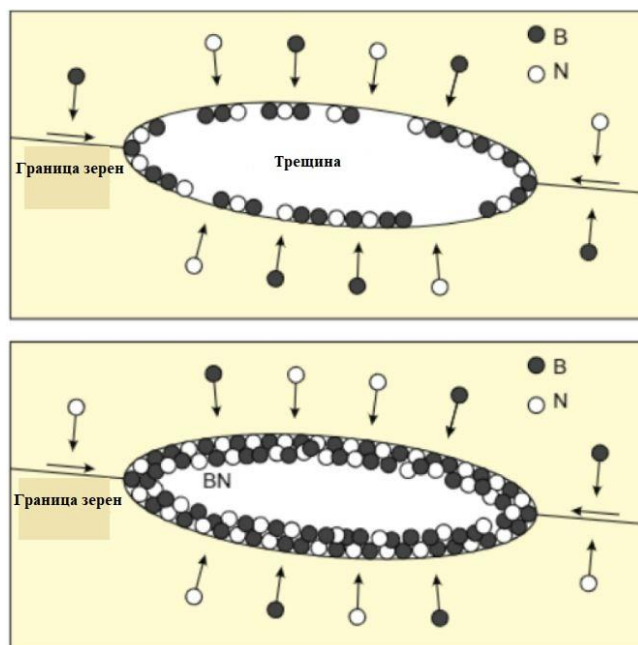


Рисунок 1.6 – Иллюстрация осаждения BN на поверхности трещины в нержавеющей стали [56]

Как правило, этот тип диффузии и осаждения осуществляется при температуре $0,40-0,65 T_{\text{п}}$ (где $T_{\text{п}}$ - температура плавления), чтобы способствовать активации диффундирующих атомов [57].

Исследователь Фанг и другие изучили сплавы Fe-Au, в которых при температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{п}} = 1064\text{ }^{\circ}\text{C}$) для автономного заполнения пустот индуцировались богатые золотом преципитаты. Полости и осаждения в модельном сплаве были количественно проанализированы с помощью синхротронной рентгеновской томографии. Осаждения золота были обнаружены на поверхности полостей, что привело к изменению морфологии трещин. Предсказания модели хорошо согласуются с экспериментальными результатами [58]. Аналогичные исследования были проведены для сплавов Fe-Mo при температурах $540-565\text{ }^{\circ}\text{C}$ для модели потенциального самовосстанавливающегося сплава. Было обнаружено, что многочисленные полости ползучести были заполнены преципитатами Fe_2Mo на границах зерен [59]. Размер осадений составлял несколько микрометров, что означает, что это практичная и эффективная стратегия заполнения реальных трещин в

металлах. При более высокой температуре более многочисленные и плотные осадения заполняют полости ползучести.

В некоторых металлических материалах также присутствуют механизмы «врождённого самозалечивания» за счёт пассивации поверхности, которые косвенно можно отнести к «самозалечиванию». Например, в таком химически активном металле как алюминий и большинстве сплавов на его основе поверхность металла в атмосфере достаточно быстро переходит в неактивное, пассивное состояние, связанное с образованием тонких и, в то же самое время, прочных поверхностных слоёв соединений, препятствующих коррозии. Таким образом, образовавшиеся участки с ювенильной поверхностью «самозалечиваются» защитной плёнкой [7].

Из вышеупомянутых исследований следует, что пересыщенные растворенные вещества в сплаве могут обеспечить возможность заживления металлических материалов и дальнейшего продления срока их службы при ползучести [44].

1.1.4 Самовосстанавливающиеся материалы – наноразмерные многослойные металлические покрытия

На данный момент в отделении экспериментальной физики ТПУ разрабатывается ещё один способ самовосстановления с помощью наноразмерных многослойных металлических (НММ) покрытий, а именно покрытий из циркония и ниобия.

Определим, чем уникальны НММ покрытия. Они состоят из периодически расположенных слоёв различных материалов нанометровой толщины. Такие слоистые материалы изготавливаются разнообразными газофазными методами – например, осаждением, напылением, либо химическим осаждением паров. Возможно применение и гальванических методов. Эти материалы имеют очень большие значения удельных площадей поверхности раздела. Например, квадратный сантиметр многослойной плёнки

толщиной 1 мкм с толщиной слоёв 2 нм имеет площадь поверхности раздела $\sim 1000 \text{ см}^2$. Как правило, области раздела оказывают сильное влияние на свойства наноматериалов. Эти слоистые материалы имеют высокую твёрдость, зависящую от толщины слоёв, и хорошую износостойкость [60].

Во время изготовления НММ покрытий есть возможность получить физически когерентные или некогерентные границы раздела, за счет использования металлов с разной кристаллической структурой и/или разными параметрами решетки [61, 62], также может различаться тип химической связи на границе раздела [63].

НММ покрытия демонстрируют высокую сопротивляемость, как к усталостным нагрузкам, так и к радиационным дефектам, что делает их уникальными, многофункциональными материалами. Из-за чего активно растёт интерес в их исследовании.

Благодаря ему в ТПУ была проведена атомистическая симуляция, по результатам которой было предположено, что граница раздела Zr/Nb это отличный сток для радиационных точечных дефектов [64].

Вообще, радиационно-индуцированные дефекты и соответствующие изменения механических свойств облученных материалов были тщательно изучены в последние десятилетия для различных многослойных покрытий [65-71]. Эти структуры с различными кристаллическими структурами широко используются в качестве самовосстанавливающихся покрытий при дефектах радиационных точек, где вакансии и поры могут рекомбинировать [72-75]. Основываясь на этой концепции, металлы с различными кристаллическими структурами (ОЦК, ГЦК и ГПУ) были объединены для получения наноразмерных многослойных покрытий (НМП) с повышенной устойчивостью к радиационному повреждению, вызванному ионной и протонной бомбардировкой.

Данное свойство материалы имеют благодаря границам раздела между слоями (интерфейсами), которые служат стоком для дефектов. Сила захвата интерфейсами дефектов зависит от структуры материала и механизмов, с

помощью которых они взаимодействуют между собой. В работе [76] вводится множитель η , который учитывает параметры границы раздела между слоями (величины когерентного напряжения, плотности дислокаций несоответствия, энтальпии смешивания и т.д.). Этот множитель может быть представлен в виде отношения притока дефектов к реальной поверхности раздела (F_{real}) к притоку дефектов к идеальной поверхности раздела (F_{ideal}). По результатам исследования был сделан вывод, что при создании НММ следует не только максимизировать площадь интерфейса на единицу объема, но и контролировать величину η , т.к. материал с высокой плотностью интерфейсов, прочность которых ниже введенного промежуточного значения η_t (значение η , при котором превышает идеальный случай поглощения дефектов на 20%), может быть гораздо менее радиационно-стойким, чем можно было бы ожидать, если бы все интерфейсы были идеальными поглотителями.

Также в одном из исследований [77] выведены выражения для η при различных предполагаемых поведений дефектов на границах раздела. Значение η высоко (не больше единицы) для некогерентных, несмешиваемых границ раздела и мало когерентных, смешиваемых границ раздела. Также значение данного множителя может изменяться с изменением дозы облучения [78].

Хорошие результаты по изучению радиационной стойкости НММ показало исследование [79]. Было проведено облучение Ag/Ni многослойного покрытия ионами криптона с целью исследования роли границы раздела на абсорбцию радиационно-индуцированных дефектов. Как показано на рисунке 1.7, 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.

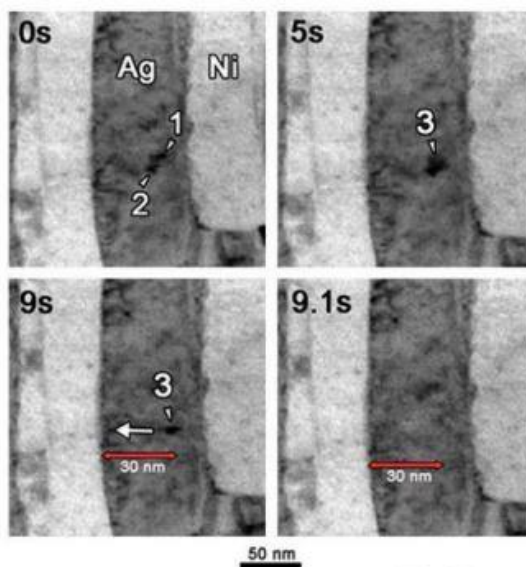


Рисунок 1.7 – Поведение радиационно-индуцированных дислокационных петель в Ag/Ni многослойном покрытии с дозой облучения 0.131-0.133 с.н.а; дислокационные петли отмечены малыми белыми стрелками, большой белой стрелкой отмечен путь миграции [79]

Процесс самовосстановления для наглядности удобно моделировать. 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 (embedded atom (EAM) potentials) [80]. 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.

Было выявлено, что все каскадные столкновения в идеальных кристаллах создавали радиационные дефекты, в отличие от НММ из Cu/Nb, где их не было замечено, ввиду того что все вакансии и дефекты внедрения были быстро поглощены на границе раздела, где они и рекомбинировали.

Способность границы раздела Cu/Nb захватывать и рекомбинировать пары Френкеля, может появляться из-за различия в энергии образования

вакансии близи границы раздела и внутри кристаллической решетки, вблизи границы раздела, которая гораздо меньше [80, 81].

Логично предположить, что концентрация дефектов в НММ будет меньше вблизи границы раздела, т.к. туда стекаются дефекты. Это подтверждает 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 с.н.а. [82].

Был построен профиль концентрации дефектов в зависимости от расстояния до границы раздела (см. рис. 1.8).

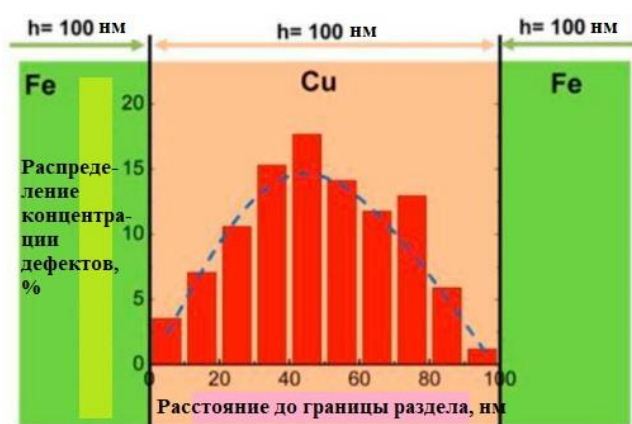


Рисунок 1.8 – Профиль распределения концентрации дефектов в Cu/Fe многослойном покрытии в результате облучения ионами Cu [82]

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

Помимо полученного распределения, были сравнены плотности дефектов в чистой меди и в многослойном покрытии в зависимости от величины дозы. Оказалось, что в НММ Cu/Fe – 100 нм, концентрация дефектов значительно меньше, чем в чистой меди, также прослеживается тенденция насыщения при определенной дозе, 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.

Большинство проведенных уже исследований были посвящены многослойным системам ГЦК/ОЦК, таким как Cu/Nb [83], V/Ag [84], Cu/W

[85] и Ni/Fe [86], поскольку большое несоответствие параметров решетки интерфейсов ГЦК/ОЦК повышает способность хранить дефекты в НМП [77], как уже отмечалось ранее.

В последнее время КМП на базе систем ГПУ/ОЦК стали привлекать внимание: Mg/Nb [72], Zr/Nb [88-90], Co/Mo [73], Mg/Ti [74], Cu/Zr [91] и др. Большинство исследований НМП на основе ГПУ сосредоточены на взаимосвязи между структурными и прочностными характеристиками наноразмерных слоев, осажденных как на уровень. Однако существует лишь несколько исследований эволюции дефектной структуры НМЦ на основе ГПУ до и после облучения [70, 71]. Многослойная система Zr/Nb считается перспективной для создания радиационно-устойчивых композитных наноматериалов по следующим причинам: и Zr, и Nb являются элементами с низким сечением захвата тепловых нейтронов и широко используются в конструкционных материалах.

То есть в данном случае, цирконий имеет гексагональную-плотноупакованную кристаллическую решетку (ГПУ), а ниобий имеет объемно-центрированную кристаллическую решетку (ОЦК). Идея самовосстановления заключается в том, что благодаря присутствующему высокому расхождению кристаллических решеток некогерентные и полукогерентные интерфейсы систем ГПУ/ОЦК могут быть эффективными поглотителями радиационных или водородных дефектов и барьерами для распространения дислокаций во время деформации [92].

Если один из атомов будет смещен или будет образован дефект, то атом из другого слоя материала займёт его место, произойдет «самоисцеление».

Стоит отметить, что некогерентные и полукогерентные интерфейсы с отличительными кристаллографическими ориентациями, составами и структурами, вероятно, будут иметь разную эффективность поглотителя. В частности, на данный момент, активно исследуется радиационная стойкость НММ Zr/Nb. Исследования облучения НММ Zr/Nb ионами Si [93], C [94], Cu [95] и H [92] также показывают высокую радиационную стойкость таких

нанокompозитов. Таким образом, облучение протонами имитирует нейтронное облучение, делая нанокompозит НМП Zr/Nb потенциальным материалом активных зон термоядерных реакторов. В системе Zr/Nb возможно сопряжение реконструкции (когерентная \Leftrightarrow полукoгерентная \Leftrightarrow некогерентная) в зависимости от индивидуальной структуры слоя и условий облучения. Однако большая часть исследований сосредоточена на экспериментальных исследованиях микроструктуры и свойств наноразмерных многослойных систем. Напротив, только в нескольких исследованиях обсуждались расчеты первых принципов, облученных НМП Zr/Nb. Установление взаимосвязи между типом интерфейса, характеристиками диффузии и локализации ионов и дефектов требуется для до исследования, при образовании протонных дефектов [96].

Одним из эффективных неразрушающих материал методов для изучения механизмов и динамики возникновения, трансформации и устранения дефектов при облучении заряженными частицами может стать метод позитронно-аннигиляционной спектроскопии (ПАС). Благодаря явлению "захвата позитронов дефектами" этот инструмент стал на сегодняшний день наиболее чувствительным инструментом для исследования дефектов открытого объема (open-volume) среди всех существующих методов, традиционно используемых в материаловедении (ПЭМ, РФА и др.) [97]. Эффективность использования метода ПАС для исследования радиационных дефектов и многослойных покрытий была продемонстрирована во многих работах [98-103]. В исследованиях ТПУ используется метод ПАС - доплеровское уширение аннигиляционной линии (ДУАЛ) с использованием позитронного пучка переменной энергии, который реализуется в Лаборатории ядерных проблем имени Дзелепова ОИЯИ в Дубне, Россия [104-106].

1.2 Дефекты в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb

Когда материал попадает под воздействие облучения, он повреждается. Данное явление характеризует радиационная стойкость, то есть склонность материала к образованию дефектов. Также в это понятие входит скорость восстановления первичных дефектов на так называемых центрах аннигиляции [107, 108]. Примерами таких центров могут быть различные виды дефектов: точечные, линейные и поверхностные. Но точечные дефекты, такие как пары Френкеля, образующиеся в результате облучения, могут соединяться и образовывать скопления такого рода дефектов, при этом ухудшая механические свойства материала [109].

Каждому типу дефектов соответствуют свои размеры зоны, в которых происходит их захват. Как и при формировании кластеров дефектов, процесс "самовосстановления" дефектов требует преодоления энергетического барьера. Иными словами, аннигиляция дефектов возможна только после того, как примеси или вакансии пересекут поле напряжений, создаваемое другими дефектами [107]. В этом процессе лучше всего себя показывают границы раздела фаз, границы зерен и дислокации [108]. Такие поглотители вступают во взаимодействие с кластерами и точечными дефектами, образованными в результате облучения, и в значительной степени их устраняют [110].

Разные границы раздела показывают различную эффективность в поглощении дефектов, это связано в первую очередь с видами используемых кристаллических решеток в системе и энергиями взаимодействия с точечными дефектами. Если увеличить суммарную площадь существующих границ раздела, то это приведет к увеличению радиационной стойкости и улучшению механических свойств [111].

Тогда получается, что использование НМП имеет смысл, когда материал подвергается облучению, т.к. чем выше плотность слоёв покрытия и чем сильнее некогерентны фазы, тем большую энергию захвата дефектов имеют границы раздела и тем лучше аннигилируют дефекты [108].

Рассматриваемая система из Zr и Nb, включает в себя гексагонально-плотноупакованную (ГПУ) и объемно-центрированную кубическую (ОЦК) структуры соответственно. Для каждой из них характерны свои дефекты, которые рассмотрим ниже.

1.2.1 Дефекты в ОЦК металлах

Облучение протонами может вызывать образование вакансий и междоузельных атомов в ОЦК-металлах. Протоны могут отдавать энергию атомам решетки, вызывая их перемещение или удаление из своих позиций в решетке, что приводит к образованию вакансий. Для этого нужна энергия около 1.6-3 эВ, для перемещения вакансии требуется энергия меньше, порядка 0,5-2 эВ [110].

В ОЦК также генерируются междоузельные дефекты, т.е. дефекты, связанные с атомами, находящимися между узлами решетки, таких как:

1. Краудионы: краудионы представляют собой линейные скопления атомов, которые образуются путем вставки дополнительных атомов между основными атомами решетки. Они могут возникать вдоль определенных направлений в кристаллической решетке. [112];

2. Гантели — это междоузельные скопления атомов, которые имеют форму гантелей. Они образуются путем вставки дополнительных атомов вблизи узловых атомов внутри решетки. Могут быть ориентированы вдоль различных направлений решетки, таких как $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ [112];

3. Октаэдрические и тетраэдрические собственные междоузельные атомы: октаэдрические атомы располагаются по центру октаэдрической полости, которая окружает междоузельный атом, а тетраэдрические атомы - в центре тетраэдрической полости, окружающей междоузельный атом [113].

Плотность упаковки у ОЦК решетки меньше, чем у ГЦК и ГПУ, из-за чего при появлении междоузельного дефекта, происходящее расширение решетки также меньше - 0,64 Ω (атомных объемов). Тогда создаваемые

напряжения внутри решетки в меньшей степени влияют на изменение механических, этим объясняется повышенная радиационная стойкость по сравнению с материалами, обладающих другим видом решетки [114-116].

1.2.2 Дефекты в ГПУ металлах

Точечные дефекты в ГПУ имеют конфигурацию сложнее, чем в ОЦК, но виды образующихся дефектов такие же.

Энергия, требуемая для создания и перемещения одной вакансии равна 0.6-2 эВ и 0.3-1 эВ соответственно. Объем образования единичных вакансий колеблется от 0,78 до 0,97 Ω [108, 117], что больше, чем у ОЦК, следовательно, Nb имеет лучшую сопротивляемость образованию радиационных дефектов. Диффузия вакансий происходит внутри или вне плоскостей, которые перпендикулярны главной оси (базальные), причем суммарная энергия для образования и миграции дефектов будет меньше для ситуации движения вне плоскостей в Zr, потому что он имеет неидеальное соотношение c/a [118].

В ГПУ решетке междоузельные дефекты могут располагаться вдоль различных плоскостей. Наиболее предпочтительными являются базальные плоскости (0001), т.к. имеют высокую плотность атомов, далее идут плоскости боковых граней (1010). Дефекты в этих случаях будут располагаться вдоль этих плоскостей. В зависимости от конкретного материала и его кристаллической структуры, междоузельные дефекты могут также располагаться вдоль других кристаллографических плоскостей. Например, плоскости межзеренных границ, плоскости дислокаций или специфические плоскости, которые обладают определенными энергетическими или геометрическими свойствами, способствующими локализации междоузельных дефектов [117].

В ГПУ материале после облучения образуются два основных вида кластеров – это междоузельные петли и вакансионные кластеры.

Исходя из исследования [119], где производился расчет энергий связи водорода в слоях металлов Zr/Nb, макро- и микродеформации существуют преимущественно в циркониевых слоях системы Zr/Nb. Т.е локализация водорода происходит в слоях Zr вблизи границ раздела. Следовательно, восстановление материала при повреждении происходит вероятнее всего за счет смещения атомов циркония в дефект в слое ниобия. Это подтверждает ещё то, что ниобий более радиационно-стойкий и накапливает в себе больше дефектов, чем цирконий, из чего последнему выгоднее «делиться» атомами. Тогда, можно сделать вывод, что нанесение слоев в порядке Nb/Zr/Nb/Zr...наилучший вариант для достижения максимального эффекта самовосстановления.

2 Материалы и методы исследования

2.1 Подготовка образцов

Для получения наноразмерного многослойного покрытия на подложку из монокристалла кремния Si с ориентацией (100) магнетронным распылением осаждались Zr и Nb с высоким процентом чистоты (см. рис. 2.1).

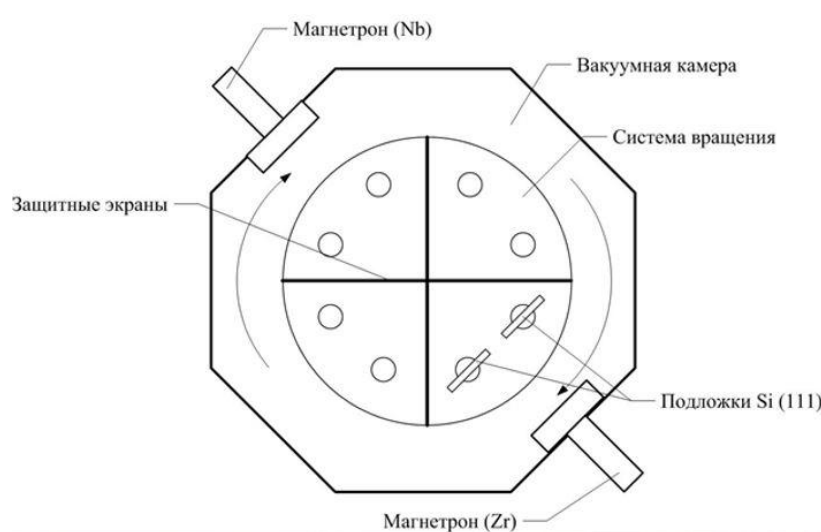


Рисунок 2.1 – Схема процесса нанесения многослойных Zr/Nb покрытий

Толщина нанесенного покрытия – 1 ± 0.1 мкм, каждого слоя – 50 ± 5 нм. Пример полученного покрытия представлен на рисунке 2.2. Напыление происходило с поочередным закрытием и открытием затворов у мишеней.

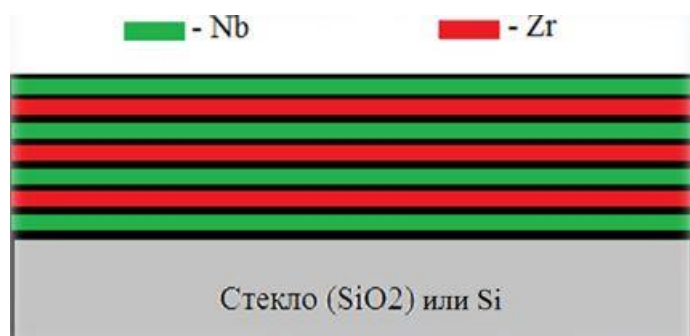


Рисунок 2.2 – Нанесенное наноразмерное многослойное покрытие из Zr/Nb на подложку из монокристалла кремния Si

Давление внутри камеры составляло 0.5 Па, в качестве инертного газа использовался аргон, подогрева подложки не производилось.

2.2 Облучение протонами

Для расчета параметров облучения протонами был использован пакет программ SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter)/TRIM (Transport of Ions in Matter).

Данный пакет программ дает возможность расчёта пробега протонов. На основе программы SRIM лежит метод Монте-Карло. Суть данного метода заключается в розыгрыше через генератор случайных чисел важных для процесса параметров [120].

Компьютер прослеживает траекторию каждого протона, последовательно решая задачу о столкновении двух заряженных частиц. При этом каждый раз регистрируются следующее: потеря энергии на участке свободного пробега, потеря энергии при столкновении с атомом мишени, угол отклонения от первоначального направления, вылет атома мишени из узла (энергия отдачи больше энергии смещения).

В данном случае: моделирование проводилось для многослойных систем Zr/Nb с толщиной отдельных слоев 50 нм. Общее число падающих частиц составляло $5 \cdot 10^5$, пучок протонов с энергией 1720 кэВ направлялся перпендикулярно поверхности через алюминиевый поглотитель толщиной 33 мкм. Согласно SRIM указанные параметры протонного облучения позволяют получить брегговский пик максимум которого находится в области $\sim 85 \pm 30$ нм. На рисунке 2.3 изображен полученный брегговский пик с указанием расположения алюминиевого поглотителя и границы раздела между 1 и 2 слоями покрытия.

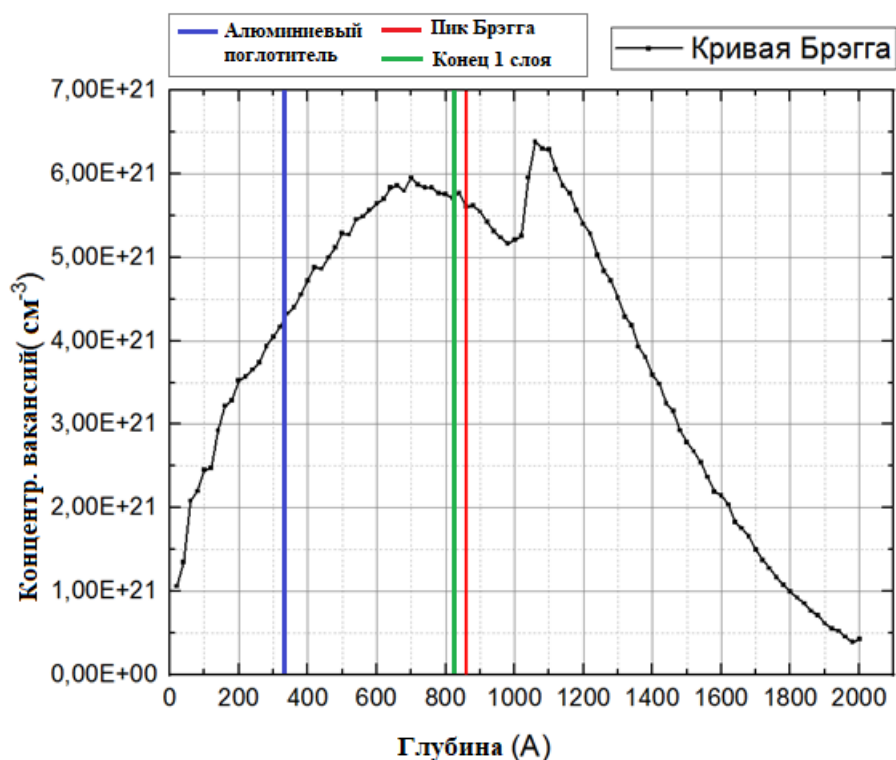


Рисунок 2.3 – Кривая Брэгга

В качестве элементов облучения выбраны протоны, т.к. дефектообразование при протонном облучении схоже с дефектообразованием при облучении быстрых нейтронов [121].

Само облучение протонами проводилось на электростатическом ускорителе ЭСГ-2.5, в ОИЯИ (Дубна, Россия) пучком протонов с диаметром 5 мм и энергией 1720 кэВ. Погрешность стабилизации энергии составляла 0.02 %.

2.3 Термический отжиг образцов

Термический отжиг образцов осуществлялся на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller (см. рис. 2.4). Данная установка состоит из компьютера с программным обеспечением, контроллера управления, горизонтальной печи для нагрева образцов и камер для образцов: малой и большой. Комплекс позволяет изучать сорбцию/десорбцию газов в автоматическом режиме. Установка позволяет насыщать образцы водородом из газовой среды [122].



Рисунок 2.4 – Автоматизированный комплекс Gas Reaction Controller в ТПУ

Образцы помещались в реакционную камеру, камера вакуумировалась и нагревалась до заданной температуры со скоростью $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Температуры отжига составляли 100, 200, 300 $^{\circ}\text{C}$. После завершения отжига образцы охлаждались в вакууме до комнатной температуры.

2.4 Метод позитронной аннигиляционной спектроскопии

2.4.1 Теоретические основы методов ПАС

На данный момент позитроны активно используются при изучении разных структурных и электронных свойств материалов и процессов, происходящих в них [123]. Изучение природы появления, превращения и исчезновения дефектов это одни из самых актуальных вопросов в физике твёрдого тела и материаловедении.

В бездефектной области электронная структура отличается от структуры дефектной области, в следствие чего, меняются характеристики электрон-позитронной аннигиляции, или по-другому, изменяются характеристики временного и импульсного распределения аннигиляционных фотонов. По этим различиям делают выводы об изменении электронной структуры и о дефектах структуры исследуемых образцов. Если будет создано достаточно полное представление о поведении различных дефектов, то будет выполнено нужное условие для управления структурно-чувствительными свойствами, то есть свойствами кристаллов, которые сильно зависят от наличия дефектов [124].

Когда в кристалле существуют структурные дефекты, то позитрон притягивается к локальным образованиям атомов, которые характеризуются тем, что присутствует избыточный отрицательный заряд или повышенное сродство с позитроном. Данные дефекты носят название позитронно-чувствительные. Первым типом дефектов являются вакансионные кластеры, вакансии и другие различные локальные свободные объемы. Если происходит связанное состояние, то вероятно появление атома позитрония [125]. Позитроний – это водородоподобный атом позитрон-электрон, который образует позитрон с электронами окружения при попадании в исследуемый материал [126].

Вообще, позитрон – это античастица электрона, обладающая массой ($0,511 \text{ МэВ}/c^2$) и имеющая положительный заряд. После того, как позитрон помещают в твёрдое тело, происходит термализация (в течении $\sim 3 \text{ пс}$), то есть он быстро теряет начальную кинетическую энергию. Далее он случайным образом движется в кристаллической решётке и задерживается в междоузельном пространстве, в следствие отталкивания от положительно заряженных ионов, а притяжение к электронам проводимости существует больше всего в междоузельном пространстве.

В случае столкновения позитрона и электрона, они аннигилируют, освобождая при этом энергию, равную полной энергии этих частиц. Это процесс происходит, когда позитрон замедляется в веществе, тогда энергия двух частиц становится равной их энергиям покоя $1,022 \text{ МэВ}$ [124, 125]. Аннигиляция этих частиц происходит из-за электромагнитного взаимодействия. После аннигиляции позитрона и электрона появляется виртуальный фотон, который может образовывать разные частицы с энергией меньшей или равной сумме энергий позитрона и электрона [127].

Тогда выходит, что аннигилирующие электрон-позитронные пары излучают пары фотонов с общей энергией $2m_0c^2$, где $m_0c^2 = 0,511 \text{ МэВ}$. Именно эти аннигилирующие фотоны применяются в позитронной аннигиляционной

спектроскопии, чтобы определить свойства электрона, которые участвуют в аннигиляционном процессе [128].

2.4.2 Метод доплеровского уширения аннигиляционной линии

Измерение импульсного распределения аннигиляции позитронов производилось методом доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ). Данный метод дает информацию о распределении импульсов электронов и о химическом составе среды, окружающей нанообъекты, в месте аннигиляции.

Основы метода опираются на энергии регистрации аннигиляционных квантов. В дефектах — свободных полостях, позитрон свободно «живет», упруго отражаясь от стенок полости, пока не аннигилирует с электроном одного из атомов стенки. В идеальной структуре позитрон рассеивается на атомах среды как упруго, так и неупруго. Неупругое рассеивание увеличивает разброс позитронов по энергии и, соответственно, величину доплеровского уширения аннигиляционных гамма-квантов.

Данный метод работает на вычислении параметров формы, так называемых параметров S и W (см. рис. 2.5).

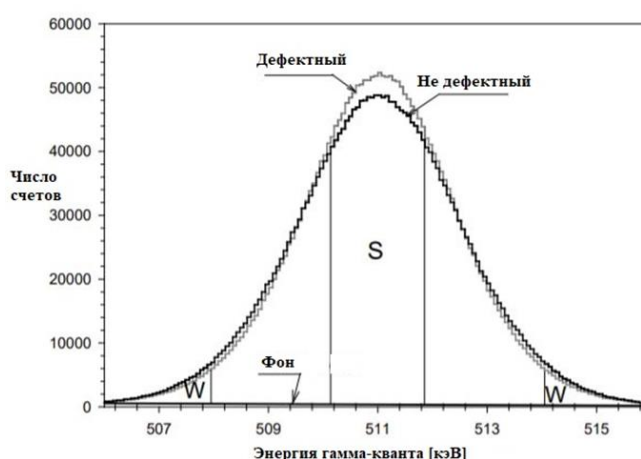


Рисунок 2.5 – Линии аннигиляции с отмеченными областями, определяющие параметры S и W, измеренные в нержавеющей стали. Серая линия исходит от дефектного образца, а черная линия представляет недефектный образец

Параметр S определяет долю аннигиляции позитронов с низкоимпульсными электронами. Он тесно связан с концентрацией дефектов в материале. Он определяется как отношение площади поверхности под центральной частью линии 511 кэВ к общей площади поверхности под этой линией. Области обычно выбираются так, чтобы их отношение было приблизительно 0,5. Значение параметра S для захваченного в дефекте позитрона меньше, чем для образца без дефекта из-за меньшей вероятности аннигиляции с высокоимпульсными электронами ядра при занятии вакансии позицию. Другими словами, менее дефектный образец дает меньшее уширение линии 511 кэВ и большее значение параметра S значение параметра. Второй параметр, так называемый W определяется как отношение площади поверхности под крыловидной частью линии 511 кэВ к общей площади поверхности. Он связан с аннигиляцией позитронов с высокоимпульсными электронами и предоставляет информацию о химическом окружении дефекта. Оба параметра S и W рассчитываются после уменьшения фона. Расчеты производятся с помощью специального компьютерного программного обеспечения.

В качестве прибора для измерений была выбрана установка LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) находящаяся на территории ОИЯИ в г.Дубна. Реализуемый метод основан на инжекторе медленных позитронов, который имеет две уникальные особенности: высокая монохроматичность потока позитронов и возможность задания конкретной энергии позитронов, т.е. можно зная энергию позитронов, рассчитать на какую глубину проникает пучок, где и происходит аннигиляция.

Чтобы добиться монохроматичности пучка используют созданный в ОИЯИ (Объединённый институт ядерных исследований) Криогенный Источник Медленных Монохроматических Позитронов (КРИММП), он является ключевым элементом инжектора медленных позитронов. В нём используется позитронно-активный изотоп ^{22}Na . Его позитроны имеют очень широкий энергетический спектр с наибольшей энергией 545 кэВ (см. рис. 2.6).

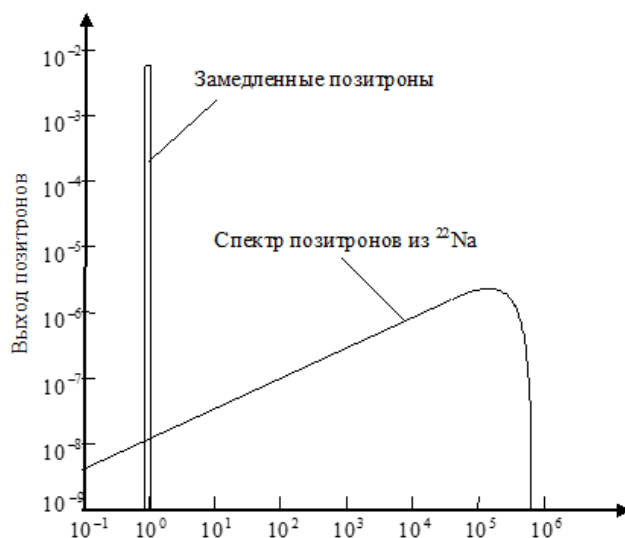


Рисунок 2.6 – Спектр позитронов, эмитируемых ^{22}Na до и после намораживания неона на выходной фольге эмиттера

Криогенный источник медленных монохроматических позитронов в ЛЕРТА имеет другую конструкцию. КРИММП охлаждается жидким гелием до 7 К на таблетке изотопа ^{22}Na . Таблетка и медный конус, обхватывающий капсулу с изотопной таблеткой, подвергаются направленному потоку газообразного неона. Он конденсируется до твердого состояния и испускает позитроны замедляясь при пересечении слоя замороженного неона (см. рис. 2.7). Достоинством такой схемы является возможность контроля толщины намораживаемого слоя по расходу напускаемого неона.

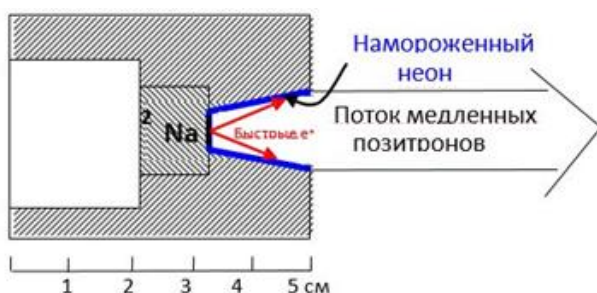


Рисунок 2.7 – Блок эмиттера позитронов

В результате около 1% полного потока позитронов на выходе из источника имеет энергетический спектр с максимумом около 2 эВ и FWHM 1,5-3 эВ. Источник подвешен под положительным потенциалом около 50 В и погружен в соленоидальное магнитное поле, которое транспортирует позитроны к мишени (исследуемому образцу) [129-132].

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02. Физика

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии со среднерыночными ценами. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Накладные расходы – 16% Районный коэффициент – 30%. Премияльный коэффициент составляет 30% от оклада. Коэффициент доплат и надбавок 20% от оклада.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды - 30%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценить потенциальных потребителей исследования, проанализировать конкурентных решений, представить SWOT – анализ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Представить план этапов работ, определить трудоёмкость и построить календарный график, сформировать бюджет НИ.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определить интегральные показатели финансовой эффективности, ресурсоэффективности разработки. Рассчитать сравнительную эффективность проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. SWOT-анализ 3. Альтернативы проведения НИ 4. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей и график проведения НИ 5. Бюджет НИ 6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН, ШБИП	Былкова Татьяна Васильевна	канд.экон.наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данной работе было проанализировано влияния термического отжига на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после облучения. Данные покрытия рассматриваются как один из возможных вариантов создания самовосстанавливающихся материалов. Так как это направление в науке является перспективным и востребованным, происходит большое финансирование подобных исследований. И чтобы в будущем финансировалось именно данное исследование, нужно четко представлять на что пойдут затраты и сколько их будет. Для этого проводят расчет экономической эффективности работы, и исходя из полученных результатов принимается решение о распределении денег.

Итак, тогда **цель** данной главы является оценка конкурентоспособности технологии в отношении финансового планирования, ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность научного исследования, провести SWOT-анализ.
2. Определить возможные альтернативы проведения научного исследования.
3. Провести календарное планирование, составить план-график проекта.
4. Произвести расчет бюджета проекта.
5. Оценить эффективность проекта.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Потенциальные потребители результатов исследования. Поскольку наноразмерные металлические многослойные покрытия Zr/Nb обладают наилучшей радиационной стойкостью среди подобных покрытий, то потенциальными потребителями готовой продукции будут являться производители реакторов термоядерного синтеза различных конфигураций и аэрокосмическая промышленность. Также это будет интересно научному сообществу, различным исследовательским группам, т.к. создаваемые покрытия являются перспективным вариантом создания самовосстанавливающегося материала, а это университеты, научные центры и производства (например, ВСМПО-АВИСМА, ВНИИНМ им. Бочвара), компании (например, LECO, Horiba), также это могут быть международные лаборатории, занимающиеся вопросами защитных покрытий и позитронной спектроскопии.

Анализ конкурентных технических решений. Перед заполнением таблицы 4.1 по конкурентоспособности были изучены современные исследования по похожей теме. В качестве конкурентов были выбраны следующие разработки:

1. Исследование самовосстанавливающихся материалов на основе полимеров в виде микрокапсул - b_{11} – (в этом случае восстановление материала достигается за счет встраивания внешних полимеризуемых заживляющих или целебных агентов, которые хранятся в микрокапсулах);

2. Исследование металлических материалов с добавлением нитрида бора - b_{12} – (в данных материалах при возникновении трещины внутри образцов, атомы бора и азота устремляются на поверхность трещины, заживляют её и не дают дальше распространяться).

За b_{ip} был взят исходное исследование. V_j – это конкурентоспособность исходного научного исследования или конкурентов 1, 2 соответственно.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Факторные признаки (P_j)	Вес критерия, w_j	Баллы			Конкурентоспособность		
		b_{ip}	b_{i1}	b_{i2}	V_{jp}	V_{j1}	V_{j2}
1	2	3	4	5	7	8	9
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Простота получения материала	0,15	4	2	3	0,6	0,3	0,45
Скорость самовосстановления при нормальных условиях	0,15	4	5	4	0,6	0,75	0,6
Возможность создания сложных геометрических форм	0,06	2	3	2	0,12	0,18	0,12
Термоустойчивость к высоким температурам	0,09	5	2	3	0,45	0,18	0,27
Износостойкость	0,11	4	3	3	0,44	0,33	0,33
Безопасность технологии получения	0,08	4	4	3	0,32	0,24	0,24
Количество «уничтожаемых» дефектов	0,22	5	5	4	1,1	1,1	0,88
Возможность увеличения скорости самовосстановления	0,14	4	3	4	0,56	0,42	0,56
Итого	1	32	27	26	4,19	3,5	3,45

Итоги, показанные в оценочной карте сравнения конкурентных технических разработок, позволяют сделать вывод, что наноразмерное металлическое многослойное покрытие системы Zr/Nb превосходит своих конкурентов по многим критериям, в частности, по простоте получения материала, термоустойчивости к высоким температурам, износостойкости.

SWOT-анализа. Представим в таблице 4.2 результаты SWOT-анализа.

Таблица 4.2 - SWOT-анализ

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	<p>С1. Высокие показатели радиационной стойкости у покрытий по сравнению с теми материалами, которые сегодня на рынке.</p> <p>С2. Экологически чистая технология.</p> <p>С3. Востребованная сегодня технология будущего, т.к. является одним из способов создания самовосстанавливающихся материалов.</p> <p>С4. Использование передовых видов материалов.</p> <p>С5. Проведение качественных исследований в одном из лучших университетов России.</p>	<p>Сл1. Большое количество людей по всему миру занимается подобной научной темой.</p> <p>Сл2. Дороговизна проведения исследований.</p> <p>Сл3. Длительность процесса исследования.</p> <p>Сл4. Основной состав научной группы новички в проведении научных исследований.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование лаборатории по водороду ТПУ.</p> <p>В2. Использование денежных средств ТПУ для проведения исследований.</p>	<p>Благодаря развитой научной деятельности в ТПУ и сотрудничеству с другими научными центрами, можно провести качественный анализ влияния термического отжига на дефектную структуру</p>	<p>Можно скооперироваться с различными научными группами, объединить усилия по нахождению высокоэффективного самовосстанавливающегося материала, набраться опыта у них. Придется заранее запрашивать</p>

<p>В3. Проводить создание материалов на территории ТПУ.</p> <p>В4. Использовать установку LEPТА в г.Дубна у партнеров ТПУ.</p> <p>В5. Заключение договора с партнерами ТПУ.</p> <p>В6. Публикация отчета по исследованию в специализированных изданиях.</p> <p>В7. Активная связь с научными группами из других городов России.</p>	<p>материалов. Ещё из-за экологичности технологии и возможности публикации результатов исследования большая вероятность включить её в некое производство.</p>	<p>выделения части бюджета ТПУ, чтобы проводить исследования, из-за требующихся больших сумм.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Исследование подобных покрытий другими исследователями.</p> <p>У2. Большая запись на несколько месяцев вперед на оборудование в лаборатории.</p> <p>У3. Отказ в финансировании проекта на активной стадии проведения исследования.</p> <p>У4. Получение некачественного напыленного покрытия, который нельзя будет исследовать.</p>	<p>Даже если другие научные группы проведут исследования быстрее, итоговые данные этого исследования будут отличаться высоким качеством. Вероятность отказа в финансировании довольно низкая, т.к. тема самовосстанавливающихся материалов на данный момент очень актуальна и активно развивается. При некачественном нанесении покрытия, есть возможность напылить заново, но уже с другими параметрами, например.</p>	<p>При отказе в финансировании маловероятно продолжение исследования. Малая известность исследователей данного исследования и длительность исследования, особенно при большой очереди на оборудование может повлиять на возможность получения патента, т.к. это могут сделать быстрее более известные и опытные исследователи.</p>

4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Для определения возможных альтернатив проведения научного исследования воспользуемся морфологическим подходом. Рассмотрим три варианта исполнения данной научно-исследовательской работы с помощью таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Морфологическая матрица для научного исследования

Характеристика	Вариант исполнения 1 (используемый метод исследования)	Вариант исполнения 2 (используемый метод исследования)	Вариант исполнения 3 (используемый метод исследования)
А. Анализ наличия и расположения дефектов в материале	Позитронная аннигиляционная спектроскопия	Позитронная аннигиляционная спектроскопия	Позитронная аннигиляционная спектроскопия
Б. Механические свойства образцов после термического отжига	-	Исследование на твердомере	Исследование на твердомере
В. Анализ микроструктуры образцов после термического отжига	-	Исследования на сканирующем электронном микроскопе	Исследования на сканирующем электронном микроскопе

Г. Количество образцов подверженных термическому отжигу при разных температурах	3 образца подвергнутых термическому отжигу при температурах: 100, 200 и 300 °С	5 образцов подвергнутых термическому отжигу при температурах: 100, 200, 300, 400 и 500 °С	3 образца подвергнутых термическому отжигу при температурах: 100, 200 и 300 °С
---------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------

Все варианты исполнения смогут прийти к ответу на вопрос про влияние термического отжига на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb. Второй и третий варианты будут давать более полное представление о структуре и свойствах материалов, но первый вариант будет достаточным, потому что цель состоит в установлении закономерности влияния термического отжига на дефекты внутри материала, общее представление о ней уже можно составить по результатам позитронной аннигиляционной спектроскопии, а далее при необходимости, можно расширить исследование и вложить больше ресурсов в него.

Также не имеет особого значения рассмотрения образцов при температурах отжига до 500 °С по той же причине, описанной выше. Если дальше потребуется исследовать поведение образцов при температурах близких к температурам плавления материала, то тогда имеет смысл проводить эксперименты с такими образцами.

Таким образом, наилучшим вариантом исполнения научного исследования является вариант исполнения 1.

4.3 Планирование научно-исследовательской работы

Структура работ в рамках научного исследования. Для выполнения научной исследовательской работы была сформирована рабочая группа, в состав которой входили научный руководитель, исполнитель и оператор

оборудования. Ниже в таблице 4.4 перечислены основной перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования.

Таблица 4.4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Подготовка к исследованию	2	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель
	3	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, исполнитель
Теоретическое и экспериментальные исследования	4	Проведение теоретических расчетов параметров облучения протонами образцов	Исполнитель
	5	Облучение протонами образцов	Оператор
	6	Проведение исследования методом позитронной аннигиляционной спектроскопии образцов не подвергшихся термическому отжигу и не облученного образца	Оператор
	7	Осуществление термического отжига для	Оператор

		образцов при разных температурах	
	8	Проведение исследования методом позитронной аннигиляционной спектроскопии образцов подвергшихся термическому отжигу	Оператор
	9	Сопоставление результатов эксперимента с теоретическими исследованиями, анализ полученных результатов	Научный руководитель, исполнитель
Обобщение и оценка результатов	10	Выводы по результатам исследования и написание отчета о проведенном исследовании в виде ВКР	Исполнитель

Определение трудоемкости выполнения работ. Рассчитаем трудоемкость выполнения работ для 3-х различных исполнений, которые были приведены выше (Приложение 1 – Таблица 1).

Если перевести полученные календарные дни по 3 исполнениям, то выходит, что на выполнение работы по 1 исполнению потребуется 36 недель, по 2 – 46 недель и по 3 – 40 недель. Работа по выпускной квалификационной работе планировалась начаться 12.09.22 и закончиться 28.05.23, что составляет суммарно 37 недель. Под такие сроки выполнения подходит только вариант с 1 исполнением. Можно урезать количество дней на написание отчета и анализ полученных результатов, но тогда это скажется на качестве выполненной ВКР. Беря во внимание анализ исполнений из пункта «Определение возможных

альтернатив проведения научных исследований» и фактора, описанного выше, работа была проведена по варианту 1 исполнения.

Разработка графика проведения научного исследования. Ниже представлен график Ганта в виде рисунка 4.1 по выбранному исполнению 1. Данные по выполнению работ брались из таблицы 1 (Приложение 1). Используемые сокращения в таблице: нч – научный руководитель, оп – оператор, ис – исполнитель, исп – исполнение.

График Ганта

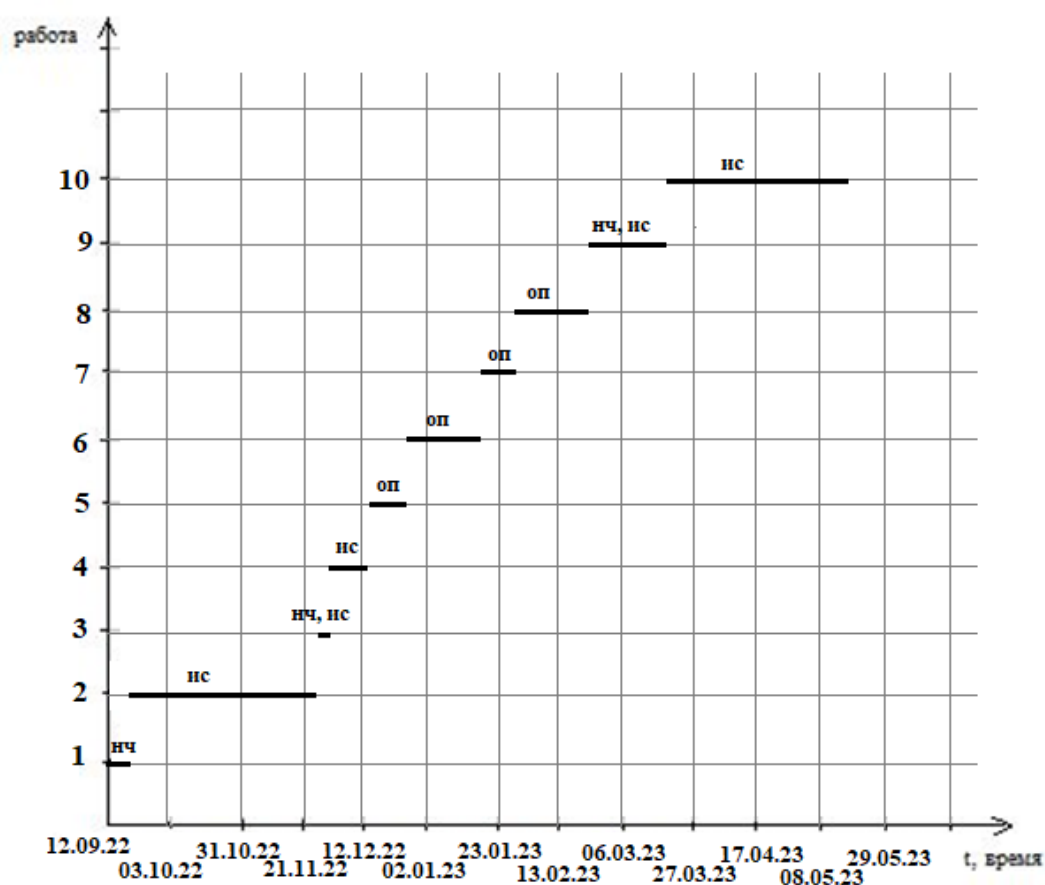


Рисунок 4.1 – График Ганта

Бюджет научно-технического исследования (НТИ). Представим расчет материальных затрат НТИ в таблице 4.5. Представленное количество образцов на один больше, чем участвующих в самом эксперименте, т.к. добавляется ещё исходный образец не облученный и не отожженный. Данные покрытия были получены на магнетроне ТПУ. Используемые сокращения в таблице: исп – исполнение.

Таблица 4.5 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб			Затраты на материалы, руб		
		Исп 1	Исп 2	Исп 3	Исп 1	Исп 2	Исп 3	Исп 1	Исп 2	Исп 3
Многослойные наноразмерные металлические покрытия на основе Zr/Nb на подложке из кремния	шт	4	6	4	3500			14000	21000	14000
Пакет ZipLock	шт	2	2	2	2	2	2	4	4	4
Итого								14004	21004	14004

Для расчета амортизации представим количество дней эксплуатации используемого оборудования в НТИ в таблице 4.6. Данные по количеству дней брались исходя из длительности работ в рабочих днях (Приложение 1 – Таблица 1). Используемые сокращения в таблице: исп – исполнение.

Таблица 4.6 - Количество дней эксплуатации оборудования

Наименование оборудования	Время эксплуатации, дни		
	Исп1	Исп2	Исп3

Установка Gas Reaction Controller	5	5	5
Электростатический ускоритель ЭСГ-2.5	10	14	10
Установка LEPTA с источником позитронов	41	55	41
Сканирующий электронный микроскоп	-	14	10
Твердомер	-	8	5

Представим расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ (см. табл. 4.7). При расчете амортизации используется таблица 6. Стоимость оборудования написана исходя из среднерыночной стоимости оборудования. Срок полезного действия написан на основе руководств по установкам. Используемые сокращения в таблице: исп – исполнение.

Таблица 4.7 – Расчет затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование оборудования	Стоимость оборудования, руб	Срок полезного использования, год	Амортизация в год, руб	Амортизация на время эксплуатации, руб		
				Исп1	Исп2	Исп3
Установка Gas Reaction Controller	1 500 000	20	75 000	1027	1027	1027
Электростатический	3 500 000	60	58 333	1598	2237	1598

ускоритель ЭСГ-2.5						
Установка LEPТА с источником позитронов	6 000 000	60	100 000	11233	1506 8	1123 3
Сканирующий электронный микроскоп	1 300 000	35	31 143	-	1195	853
Твердомер	700 000	20	35 000	-	767	479
Итого				13858	2029 5	1519 1

Представим расчет основной заработной платы исполнителей темы. Для начала посчитаем действительный годовой фонд рабочего времени для участвующих в исследовании, покажем его в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель (научный руководитель)	Исполнитель (студент)	Оператор (лаборант)
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней	117	117	117
- выходные дни	91	91	91
- праздничные дни	27	27	27
Потери рабочего времени	24	24	24
- отпуск	0	0	0
- невыходы по болезни			
Действительный годовой фонд рабочего времени	224	224	224

Для удобства представим в таблице 4.9 продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в рабочих днях (T_p) для всех трех исполнений, опираясь на данные из таблицы 1 (Приложение 1). Используемые сокращения в таблице: исп – исполнение.

Таблица 4.9 - Продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в рабочих днях

Исполнители	Исп1	Исп2	Исп3
Руководитель (научный руководитель)	25	25	25
Исполнитель (студент)	114	125	122
Оператор (лаборант)	55	88	65

Далее представим расчет основной ($Z_{осн}$), дополнительной заработной платы ($Z_{доп}$) и отчислений во внебюджетные фонды ($Z_{внеб}$) в таблице 4.10. Коэффициент дополнительной заработной платы ($k_{доп}$) принят равным 13% от основной заработной платы. Премияльный коэффициент ($k_{пр}$) составляет 30% от оклада. Коэффициент доплат и надбавок (k_d) 20% от оклада. Районный коэффициент (k_p) для Томска 1,3. Оклад исполнителя (студента) принят равным минимальному размеру оплаты труда – 16 242 руб. $Z_б$ – размер оклада без коэффициентов. Z_m – месячный должностной оклад сотрудника с учетом всех коэффициентов. Среднедневная з/п ($Z_{дн}$) будет рассчитываться как среднемесячная з/п на количество месяцев работы без отпуска в течение года (таблица 8), при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя. Отчисления во внебюджетные фонды ($Z_{внеб}$) рассчитывались по НК РФ – 30%. Исп – исполнение.

Таблица 4.10 – Расчет заработной платы

Исполнит ели	Разряд	$Z_б$, руб.	k_p р	k_d	$k_{пр}$	Z_m , руб	$Z_{дн}$,	$Z_{осн}$, тыс.руб.	$Z_{доп}$, тыс.руб.	$Z_{внеб}$, тыс.руб.
-----------------	--------	-----------------	------------	-------	----------	----------------	------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------

						руб	Ис	Исп	Исп	Исп	Исп	Исп	Исп	Исп	Исп	
						.	п1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Руководит ель (научный руководит ель)	к.т.н.	377 00				735 15	367 6	93	93	93	12	12	12	32	32	32
Исполнит ель (студент)	студент	162 42	0, 3	0, 2	1, 3	316 72	158 4	181	198	193	24	26	25	62	67	65
Оператор (лаборант)	Инжене р (низше й категор ии)	192 00				374 40	187 2	103	165	122	13	21	16	35	56	41
Итого:							337	456	408	49	59	53	128	155	138	

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и так далее. Величина коэффициента накладных расходов равна 16%.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта по каждому варианту исполнения приведено в таблице 4.11. Используемые сокращения в таблице: исп – исполнение.

Таблица 4.11 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование	Сумма, тыс. руб		
	Исп.	Исп.	Исп.
	1	2	3

1.	Материальные затраты НТИ	14	21	14
2.	Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	14	20	15
3.	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	337	456	408
4.	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	49	59	53
5.	Отчисления во внебюджетные фонды	128	155	138
6.	Накладные расходы	87	114	100
7.	Бюджет затрат НТИ	629	825	728

Из рассчитанного бюджета затрат НТИ видно, что из 3 вариантов исполнений самым выгодным оказался 1 вариант, а самым дорогостоящим 2 вариант.

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

За максимальную стоимость исполнения научно-исследовательского проекта возьмем стоимость самого дорогого исполнения - 825000руб.

Интегральный финансовый показатель разработки определим, как отношение стоимости одного из вариантов исполнения к самому дорогому варианту исполнения, полученные значения занесем в таблицу сравнительной эффективности разработки.

Рассчитаем показатель ресурсоэффективности через таблицу сравнительной оценки характеристик вариантов исполнения – таблица 4.12.

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Баллы			Интегральный показатель ресурсоэффективности по одному критерию		
		Исп 1	Исп 2	Исп 3	Исп1	Исп2	Исп3
Термоустойчивость к высоким температурам	0,15	3	4	3	0,45	0,6	0,45
Износостойкость	0,2	3	4	4	0,6	0,8	0,8
Количество «уничтожаемых» дефектов	0,4	5	4	4	2	1,6	1,6
Возможность увеличения скорости самовосстановления	0,25	3	4	3	3,8	4	3,6
Интегральный показатель ресурсоэффективности					3,8	4	3,6

Далее посчитаем интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя и произведем расчет сравнительной эффективности проекта, беря её как отношение интегральный показатель эффективности первого варианта исполнения ко второму и третьему.

Все рассчитанные значения выше занесем в итоговую таблицу 4.13 сравнительной эффективности разработки.

Таблица 4.13 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп1	Исп2	Исп3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,76	1	0,88
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	3,8	4	3,6
3	Интегральный показатель эффективности	5	4	4,1
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,25		1,22

Таким образом, в ходе выполнения задания по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были проанализированы возможные конкурентные технические решения по основным техническим критериям оценки ресурсоэффективности, составлен SWOT-анализ.

Далее определены возможные альтернативы проведения научных исследований и на их основе было проведено планирование НИР, построен график Ганта для выбранного для работы исполнения 1.

После рассчитан бюджет НТИ для каждого из исполнений, который составил: исполнение 1 – 629 тыс. руб., исполнение 2 – 825 тыс. руб., исполнение 3 – 728 тыс. руб.

И в завершении, определен самый эффективный вариант исполнения – вариант исполнения 1 (исходя из сравнительной эффективности проекта, которая получилась больше единицы по отношению ко второму и третьему вариантам исполнения). Он достаточный для установления общей зависимости влияния термического отжига на дефектную структуру покрытий, также он менее ресурсозатратный, финансово-выгодный и требует

меньшее количество времени на выполнение основных экспериментальных этапов работы.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 0Б91		ФИО Лиханосова Ульяна Андреевна	
Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	Экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02. Физика

Тема ВКР:

Анализ влияния термического отжига на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после облучения	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> наноразмерные металлические слои (НМС) Zr/Nb <i>Область применения:</i> ядерная энергетика, аэрокосмическая промышленность <i>Рабочая зона:</i> офис <i>Размеры помещения:</i> 63.3 м² <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> 1 персональный компьютер (ПК в подвальном помещении корпуса №3 <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> анализ спектров позитронной аннигиляционной спектроскопии, полученных на установке LEPTA в г.Дубна, происходил с помощью программного обеспечения SP-SE на персональном компьютере</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 11.04.2023); – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – СП 2.2.3670-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда.
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенный уровень шума; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – пониженная или повышенная температура воздуха рабочей зоны; – статические физические перегрузки; – умственное перенапряжение. <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека.

	Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: защитное зануление, защитное отключение.
3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения	<i>Анализ воздействия на литосферу:</i> – Утилизация компьютеров, оргтехники и бумаги; <i>Анализ воздействия на атмосферу:</i> – Энергообеспечение ПК обуславливает использование топлива, что сопровождается увеличением количества выбрасываемого в атмосферу углекислого газа (CO ₂)
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения	Возможные ЧС: пожар, поражение человека электрическим током. Наиболее типичная ЧС: пожар.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б91	Лиханосова Ульяна Андреевна		

5 Социальная ответственность

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

Для выполнения данной квалификационной работы на тему «Анализ влияния термического отжига на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после облучения» был проведен расчет параметров облучения протонами наноразмерных металлических слоев (НМС) Zr/Nb, а также были обработаны в программном обеспечении «SP-SE» и проанализированы полученные данные импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в НМС Zr/Nb до и после протонного облучения и после термического отжига образцов. Данная работа проводится для исследования одного из возможных способов создания самовосстанавливающихся материалов. Покрытие с механизмом самовосстановления в перспективе могло бы использоваться как защитное покрытие для термоядерных реакторов и космических спутников.

Всё исследование выполнялось на 1 персональном компьютере (ПК) в подвальной лаборатории корпуса №3 размером 63.3 м², поэтому в данном разделе проводится анализ опасных и вредных факторов при работе с ПК, влияния этих факторов на окружающую среду и мероприятий по её защите.

Предметом исследования является рабочая зона исследователя, включая компьютерный стол, ПК, клавиатуру, компьютерную мышь и стул.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

При выполнении данной работы работником (студентом) согласно статье 91 Трудового кодекса (ТК) РФ его нормальная продолжительность рабочего времени не должна превышать 40 часов в неделю. В течение рабочего дня работнику должен предоставляться перерыв для отдыха и питания продолжительностью не менее 30 минут (ст. 108 ТК РФ). Всем работникам предоставляются выходные дни (еженедельный непрерывный отдых). При пятидневной рабочей неделе работникам предоставляются два выходных дня в неделю. Одним выходным днем является воскресенье. Вторым выходным днем при пятидневной рабочей неделе устанавливается коллективным договором или правилами внутреннего трудового распорядка. Оба выходных дня предоставляются, как правило, подряд (ст. 111 ТК РФ). Работа в выходные и нерабочие праздничные дни запрещается. Привлечение работников к работе в выходные и нерабочие праздничные дни производится с их письменного согласия в случае необходимости выполнения заранее непредвиденных работ, от срочного выполнения которых зависит в дальнейшем нормальная работа организации в целом или ее отдельных структурных подразделений, индивидуального предпринимателя (ст. 113 ТК РФ). Работодатель (Томский политехнический университет) обязан обеспечить нормальные условия для выполнения работниками норм выработки. К таким условиям, в частности, относятся: исправное состояние помещений, сооружений, машин, технологической оснастки и оборудования; своевременное обеспечение технической и иной необходимой для работы документацией; надлежащее качество материалов, инструментов, иных средств и предметов, необходимых для выполнения работы, их своевременное предоставление работнику; условия труда, соответствующие требованиям охраны труда и безопасности производства (ст. 163 ТК РФ) [136].

Согласно главе 22 из СП 2.2.3670-20 площадь на одно постоянное рабочее место пользователей персональных компьютеров на базе плоских дискретных экранов (жидкокристаллические, плазменные) должно составлять не менее 4,5 м². Также согласно 4 главе для создания комфортной рабочей среды в помещениях без естественного проветривания (исследовательская работа производится в подвальном помещении без окон), должны быть предусмотрены средства, обеспечивающие не менее половины от требуемого воздухообмена и заданную температуру в холодный период года [137].

Исходя из ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы. Высота рабочей поверхности при работе за персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) для женщин и мужчин (берем общие условия, т.к. в лаборатории работают представители обоих полов) должна составлять 655 мм, а высота сидения 420 мм. Пространство для ног должно соответствовать требованиям на рисунке 5.1. Клавиатура и мышь должны размещаться таким образом, чтобы не было перекрещивания рук [138].

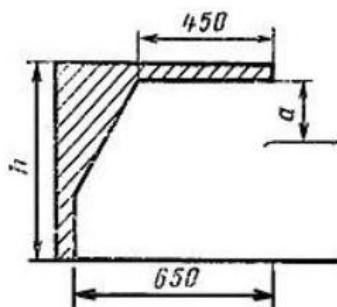


Рисунок 5.1 - Пространство для ног (ширина не менее 500 мм). a — расстояние от сиденья до нижнего края рабочей поверхности не менее 150 мм; h — высота пространства для ног не менее 600 мм

Конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Зоны досягаемости моторного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях

для средних размеров тела человека приведены ниже на рисунках 5.2 и 5.3 [138].

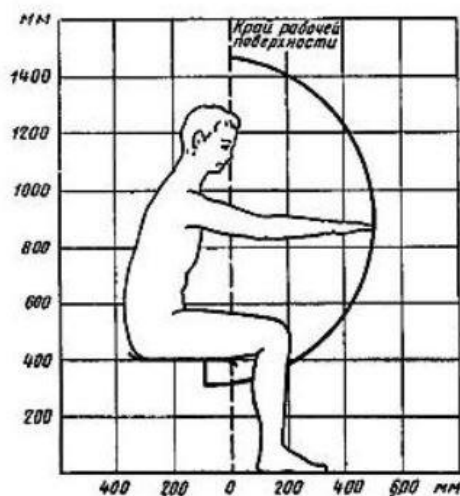


Рисунок 5.2 - Зона досягаемости моторного поля в вертикальной плоскости

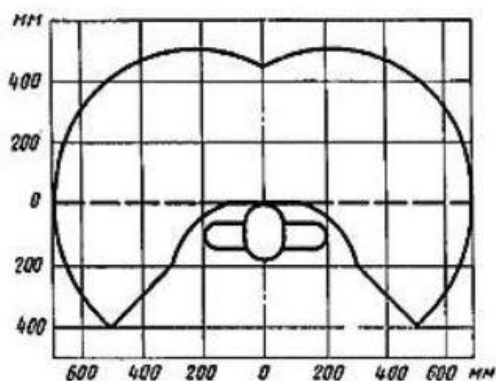


Рисунок 5.3 - Зона досягаемости моторного поля в горизонтальной плоскости при высоте рабочей поверхности над полом 725 мм

Все условия обеспечения безопасности, перечисленные выше, были соблюдены при выполнении выпускной квалификационной работы.

5.2. Производственная безопасность

В процессе исследования с точки зрения возникающих вредных или опасных факторов общий этап работ может быть разделен на три основных этапа:

1) разработка образцов: расчет параметров облучения протонами наноразмерных металлических слоев Zr/Nb;

2) изготовление образцов: облучение наноразмерных металлических слоев, проведение термического отжига НМС Zr/Nb после протонного облучения;

3) эксплуатация образцов: измерение импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в НМС Zr/Nb до, после облучения и отжига.

При выполнении работ на персональном компьютере согласно ГОСТ 12.0.003-2015 "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация" [139] могут иметь место следующие факторы, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте при выполнении ВКР

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Повышенный уровень шума на рабочем месте	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (ред. От 30.12.22) [140]
Недостаточная освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [141]
Пониженная или повышенная температура воздуха рабочей зоны	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [142]

Статические физические перегрузки	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [143]
Умственное перенапряжение	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [143]
Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека	ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [144]

5.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

Повышенный уровень шума на рабочем месте

Превышение уровня шума на рабочем месте создает психологический и физический стресс, снижающий производительность, концентрацию, внимание, повышает утомляемость. Повышение уровня шума на рабочем месте возможно из-за фона, создаваемого работой персональных компьютеров, наличия центральной системы вентиляции и кондиционирования воздуха.

Предельно допустимые показатели уровня звука, звукового давления для источников постоянного и непостоянного шума регламентируются СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению

безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [140].

Шум, для которого разность между наибольшим и наименьшим значениями уровня звука за временной интервал измерения не превышает 5 дБА при измерении на временной характеристике шумомера "медленно", является. Шум, не удовлетворяющий данному условию, является непостоянным.

Для научного исследователя работа которого происходит в помещении образовательной организации предельно допустимые показатели шума представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Предельно допустимые уровни звукового давления и уровни звука для научного исследователя

Назначение помещений	Для источников постоянного шума							Для источников непостоянного шума		
	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Уровни звука L(A), дБА	Эквивалентные уровни звука L(A _{экв}), дБА	Максимальные уровни звука L(A _{макс}), дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000			
Аудитории образовательных организаций	79	63	52	45	39	35	32	40	40	55

Для снижения уровня шума в производственном помещении можно использовать защитные звукопоглощающие экраны. Для любого оборудования необходимо регулярно проводить техническое обслуживание, так как загрязнение может увеличить производимый шум.

Недостаточная освещенность рабочей зоны

При постоянной работе в помещении с ПК может возникать недостаток или отсутствие естественного и/или искусственного освещения, что повышает уровень утомляемости и вызывает снижение работоспособности. При дефиците освещенности рабочей зоны могут развиваться заболевания зрительного аппарата.

В соответствии с СП 52.13330.2016 [141] зрительная работа, выполняемая исполнителем проектируемого решения за ПК в жилом помещении или общественном здании, может быть охарактеризована как зрительная работа разряда Б подразряда 1. Это работа с наименьшим или эквивалентным размером объекта различения 0,3-0,5 мм с относительной продолжительностью зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность не менее 70%.

Для зрительной работы разряда Б-1 коэффициент естественного освещения (КЕО) должен соответствовать следующим требованиям:

1. При верхнем или комбинированном освещении: $КЕО = 3\%$;
2. При боковом освещении: $КЕО = 1\%$.

Параметры искусственного освещения должны быть следующие:

1. Средняя освещенность на рабочей поверхности от системы общего освещения не менее 400 лк;
2. Коэффициент пульсации освещенности $K_{п}$ не более 15%.

Для минимизации воздействия недостатка естественного освещения может применяться расширение оконного проёма, создание дополнительных оконных проёмов, а для искусственного освещения может осуществляться добавление приборов искусственного света (ламп, LED лент и т.п.).

Пониженная или повышенная температура воздуха рабочей зоны

Микроклиматические условия рабочей зоны оказывают влияние на утомляемость и работоспособность человека. Аномальные значения температуры воздуха могут приводить к ухудшению состояния работника и развитию болезней. Так при слишком низких температурах человек подвержен переохлаждению, что ведёт к снижению иммунитета.

Причиной неудовлетворительных показателей микроклимата может являться некорректная работа системы вентиляции в помещении.

Оптимальные и допустимые значения показателей температуры регламентируются СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [142]. Работа, выполняемая исполнителем проектируемого решения, по уровню энергозатрат организма, классифицируется как работа категории Ia, т.к. не требует физического напряжения, постоянного передвижения и ходьбы. В таблице 5.3 приведены допустимые значения показателей температуры в помещении для данной категории в холодный и тёплый период года.

Таблица 5.3 – Допустимые величины температуры на рабочих местах в помещениях, категория энергозатрат Ia

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин		Для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	Для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более

Холодный	20,0-21,9	24,1-25,0	19,0-26,0	0,1	0,1
Тёплый	21,0-22,9	25,1-28,0	20,0-29,0	0,1	0,2

Для приведения показателей температуры к допустимым значениям необходимо наличие в помещении кондиционеров, обогревателей. С помощью указанных приборов и/или окон может регулироваться уровень температуры, скорости воздуха. Рациональная компоновка рабочих мест также влияет на него.

Статические физические перегрузки

Работа над исследуемым проектом малоподвижна и подразумевает сидячую позу. Низкий уровень физической активности негативно влияет на состояние организма человека и способствует атрофии мышц, повышенной утомляемости, сонливости. Если же при этом сотрудник принимает физиологически неправильную позу, у него могут развиваться заболевания опорно-двигательного аппарата и возникать боли в шее, спине и других частях тела.

В соответствии с МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [142] при пятидневной рабочей неделе и 8-часовой смене продолжительность обеденного перерыва составляет 30 мин., а регламентированные перерывы рекомендуется устанавливать через 2 ч от начала рабочей смены и через 2 ч после обеденного перерыва продолжительностью 5 - 7 мин. каждый. Во время регламентированных перерывов с целью снижения утомления зрительного анализатора и мышц целесообразно выполнять комплексы физических упражнений, включая упражнения для глаз, в первой половине смены.

Также сотруднику рекомендуется в течении дня делать перерывы на лёгкую гимнастику, направленную на разминку мышц, суставов, улучшение

кровообращения. Регулярное выполнение упражнений благотворно влияет на производительность человека.

Умственное перенапряжение

При постоянной работе за ПК, отсутствию или недостаточном количестве отдыха может произойти умственное перенапряжение. Оно может стать причиной развития нервоза, усиления метаболизма, нарушения углеводного обмена, также оно может иметь негативное влияние на функции надпочечников и щитовидной железы.

По МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [142] при пятидневной рабочей неделе и 8-часовой смене продолжительность обеденного перерыва составляет 30 мин., а регламентированные перерывы рекомендуется устанавливать через 2 ч от начала рабочей смены и через 2 ч после обеденного перерыва продолжительностью 5 - 7 мин. каждый.

Для снижения эмоционального напряжения, обусловленного характером трудовой деятельности работников умственного труда, обосновывается целесообразность включения в распорядок дня индивидуальных сеансов "психологической разгрузки". Сеансы "психологической разгрузки" можно начинать проводить только после овладения основами и техникой их выполнения под руководством инструктора или психоневролога. Для этого необходимо в плане оздоровительных мероприятий предусмотреть достаточное количество занятий с привлечением специалистов соответствующего профиля.

Сеансы "психологической разгрузки" продолжительностью 10 - 20 мин. рекомендуется проводить ежедневно в одно и то же время, например, в часы обеденного перерыва, после приема пищи или во второй половине рабочего дня, когда начинает снижаться работоспособность. Место проведения должно

быть постоянным или в комнате "психологической разгрузки", или в собственном рабочем кабинете.

Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека

Офисная техника, которой пользуется исполнитель проектируемого решения, работает от электросети, в связи с чем может являться источником опасности. Электрический ток оказывает механическое, электролитическое, биологическое и термическое воздействие, приводит к травмам и гибели.

Вероятность поражения током возрастает при высокой влажности, отсутствии защитных конструкций для проводов.

ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. [143] устанавливает, что при переменном токе частотой 50 Гц напряжение не должно превышать 2 В, а сила тока должна быть не более 0,3 мА.

Превентивными мерами в данном вопросе являются регулярные инструктажи техники безопасности на рабочем месте, работа с ПК сухими руками, периодическая проверка целостности и исправности электроприборов, розеток, кабелей.

5.3. Экологическая безопасность

Литосфера. На данном рабочем месте выявлен предполагаемый источник загрязнения окружающей среды, а именно воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке предметов вычислительной техники и оргтехники.

Вышедшее из строя ПЭВМ и сопутствующая оргтехника относится к IV классу опасности и подлежит специальной утилизации. Для оказания наименьшего влияния на окружающую среду, необходимо проводить

специальную процедуру утилизации ПЭВМ и оргтехники, при которой более 90% отправится на вторичную переработку и менее 10% будут отправлены на свалки. При этом она должна соответствовать процедуре утилизации ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов [144].

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

Атмосфера. Научно-техническое исследование происходит с использованием электротехники, а значит использует электроэнергию, выработанную на электростанциях. Выбросы электростанций попадают в атмосферу, тем самым загрязняя её. Самыми распространёнными являются тепловые электростанции, которые выбрасывают в атмосферу продукты сгорания топлива и примеси различного состава (углекислый газ, оксид углерода, оксиды металлов, свинец, ртуть и др.).

Для сокращения последствий работы электростанций в рамках данной разработки необходимо использовать ПК с режимом пониженного потребления электроэнергии для сокращения потребления электроэнергии во время неиспользования ПК.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Изучаемые образцы металлических наноразмерных многослойных покрытий не могут инициировать возникновение каких-либо ЧС, так как не производят поражающих факторов физического и химического характера.

Источником чрезвычайных ситуаций (ЧС) может стать ПК, за которым производится основная работа над проектом, поэтому при работе над проектируемым решением могут возникнуть такие (ЧС):

1. Пожар;
2. Поражение человека электрическим током.

Оба вида ЧС относятся к техногенным ЧС.

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар в помещении рабочей зоны, вызванный перегревом и воспламенением электротехники, неисправностью электросети, током короткого замыкания. Пожар может возникнуть из-за несоблюдения правил пожарной безопасности.

В соответствии с Федеральным законом "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" [145] для защиты от воздействия пожара должны соблюдаться следующие нормы:

1. Применение ограничивающих распространение огня средств;
2. Использование устройств оповещения и обнаружения пожара;
3. Применение огнетушителей и других первичных средств пожаротушения;
4. Наличие и возможность использования эвакуационных путей и пр.

В случае обнаружения пожара необходимо сообщить о происшествии в пожарную охрану. Далее необходимо принять меры по эвакуации людей и материальных ценностей согласно плану эвакуации. До прибытия сотрудников пожарной охраны нужно самостоятельно начать тушение пожара с помощью первичных средств пожаротушения. Прибывшей на место пожарной охране необходимо оказывать содействие в тушении пожара.

В помещении возможен пожар твёрдых горючих веществ и материалов, т.е. пожар класса А. В целях борьбы с пожаром должны использоваться хранящиеся в офисе такие первичные средства пожаротушения, как переносные огнетушители и покрывала для изоляции очага возгорания [145].

Выводы

Фактические значения значимых для разработки производственных факторов удовлетворяют нормативным значениям.

В помещении, где ведётся работа над проектируемым решением, нет условий для возникновения повышенной или особой опасности, поэтому по ПУЭ [146] оно отнесено к 1 категории электробезопасности. Персонал, занятый разработкой, относится к I группе по электробезопасности согласно «Правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок» [147], т.к. не относится к электротехническому и электротехнологическому персоналу, выполняющих работы, при которых может возникнуть опасность поражения электрическим током. Работа, выполняемая исполнителем проектируемого решения, по уровню энерготрат организма, классифицируется как работа категории Ia, т.к. не требует физического напряжения, постоянного передвижения и ходьбы [140]. По взрывопожарной и пожарной опасности рабочее помещение имеет категорию В, т.е. является пожароопасным помещением с наличием горючих веществ и материалов [148]. Продукт разработки относится к 4 категории объектов, оказывающих малозначительное негативное воздействие на окружающую среду [149].

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проанализировано влияние термического воздействия на дефектную структуру наноразмерных металлических слоев Zr/Nb после протонного облучения методом доплеровского уширения аннигиляционной линии с применением пучков позитронов переменной энергии. Для измерения импульсного распределения аннигиляции позитронов переменной энергии в наноразмерных металлических слоях Zr/Nb до и после протонного облучения использовалась установка LEPTA в ОИЯИ ЛЯП в г. Дубна. Полученные спектры анализировались с помощью нахождения S и W параметров.

Анализ полученных распределений показал, что значения S/S_0 параметров уменьшаются, а W/W_0 параметров увеличиваются в области воздействия протонов, что связано с изменением областей пониженной электронной плотностью на интерфейсах, где в основном локализируются позитроны. Также видно, что термический отжиг стимулирует диффузию дефектов в сторону интерфейсов, где они аннигилируют. При увеличении температуры термического отжига количество дефектов внутри слоев уменьшается, из-за достижения интерфейсов большого количества дефектов и последующей их аннигиляции. Прослеживается тенденция к аннигиляции дефектов не только в области высадки протонов, но и в глубине материала. Т.е. происходит отжиг не только радиационных дефектов, но и дефектов, образовавшихся в ходе получения покрытий. Из полученной зависимости относительных параметров видно, что существует один преимущественный центр захвата позитронов вблизи границы раздела.

Список литературы

1. Ghosh S. K. Self-healing materials: fundamentals, design Strategies, and applications. Weinheim: Wiley – VCH, 2008. Rel. 1st.
2. Zhai L., Narkar A., Ahn K. Self-healing polymers with nanomaterials and nanostructures //Nano Today. – 2020. – V. 30. – P. 100826.
3. Reddy K. R. et al. Self-healing polymers: Synthesis methods and applications //Nano-Structures & Nano-Objects. – 2020. – V. 23. – P. 100500.
4. JE P. C. et al. Manufacturing challenges in self-healing technology for polymer composites—A review //Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – V. 9. – №. 4. – P. 7370-7379.
5. X. Hu, R. Liang, J. Li, Z. Liu, G. Sun ES Mater. Manufact., – 2018. – V. 2. – P. 16-23.
6. Yuan Y. et al. Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review // Express Polym. Lett. 2008. V. 2. № 4. P. 238–50.
7. Ситников Н. Н., Хабибуллина И. А., Мащенко В. И. Самовосстанавливающиеся материалы: обзор механизмов самовосстановления и их применений //Видеонаука. – 2018. – №. 1 (9). – С. 2-30.
8. Bekas D. G. et al. Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques //Composites Part B: Engineering. – 2016. – V. 87. – P. 92-119.
9. Zhang F. et al. Self-healing mechanisms in smart protective coatings: A review //Corrosion Science. – 2018. – V. 144. – P. 74-88.
10. Yang Y., Urban M. W. Self-healing polymeric materials //Chemical Society Reviews. – 2013. – V. 42. – №. 17. – P. 7446-7467.
11. White S. R. et al. Autonomic healing of polymer composites //Nature. – 2001. – V. 409. – №. 6822. – P. 794-797.

12. Wool R. P. Self-healing materials: a review //Soft Matter. – 2008. – V. 4. – №. 3. – P. 400-418.
13. Brown E. N., Sottos N. R., White S. R. Fracture testing of a self-healing polymer composite //Experimental mechanics. – 2002. – V. 42. – №. 4. – P. 372-379.
14. Brown E. N., White S. R., Sottos N. R. Fatigue crack propagation in microcapsule-toughened epoxy //Journal of materials science. – 2006. – V. 41. – №. 19. – P. 6266-6273.
15. Kessler M. R., Sottos N. R., White S. R. Self-healing structural composite materials //Composites Part A: applied science and manufacturing. – 2003. – V. 34. – №. 8. – P. 743-753.
16. Toohey K. S. et al. Self-healing materials with microvascular networks //Nature materials. – 2007. – V. 6. – №. 8. – P. 581-585.
17. Yang J. et al. Microencapsulation of isocyanates for self-healing polymers //Macromolecules. – 2008. – V. 41. – №. 24. – P. 9650-9655.
18. Jin H. et al. Self-healing thermoset using encapsulated epoxy-amine healing chemistry //Polymer. – 2012. – V. 53. – №. 2. – P. 581-587.
19. Cho S. H., White S. R., Braun P. V. Self-healing polymer coatings //Advanced Materials. – 2009. – V. 21. – №. 6. – P. 645-649.
20. Yi H., Deng Y., Wang C. Pickering emulsion-based fabrication of epoxy and amine microcapsules for dual core self-healing coating //Composites Science and Technology. – 2016. – V. 133. – P. 51-59.
21. Odarczenko M. et al. Sunlight-Activated Self-Healing Polymer Coatings //Advanced Engineering Materials. – 2020. – V. 22. – №. 3. – P. 1901223.
22. Bailey B. M. et al. Electrically conductive self-healing polymer composite coatings //Progress in Organic Coatings. – 2015. – V. 85. – P. 189-198.
23. Wen N. et al. Recent advancements in self-healing materials: Mechanicals, performances and features //Reactive and Functional Polymers. – 2021. – V. 168. – P. 105041.

24. Thakur V.K., Kessler M.R. Self-healing polymer nanocomposite materials: A review. *Polymer*, 2015, V. 69, P. 369-383.
25. Blaiszik B. J., Sottos N. R., White S. R. Nanocapsules for self-healing materials. *Composites Science and Technology*, – 2008 – V. 68, P. 978-986.
26. Urdl K., Kandelbauer A., Kern W. et al. Self-healing of densely cross linked thermoset polymers - a critical review // *Progress in Organic Coatings*, – 2017 – V. 104, P. 232-249.
27. Zhu D.Y., Rong M.Z., Zhang M.Q. Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: From design to preparation. *Progress in Polymer Science*, – 2015 – V. 49–50, P. 175–220.
28. Wool R., O'Connor K. Theory of crack healing in polymers. *J. Appl. Phys.*, – 1981 – V. 52, P. 5953-5963.
29. Jud K., Kausch H.H., Williams J.G. Fracture mechanics studies of crack healing and welding of polymers. *Journal of Materials Science*, – 1981 – V. 16, P. 204-210.
30. Kim Y.H., Wool R.P. A theory of healing at a polymer-polymer interface. *Macromolecules*, – 1983 – V. 16, P. 1115-1120.
31. Deng G. et al. Covalent cross-linked polymer gels with reversible sol-gel transition and self-healing properties // *Macromolecules*. – 2010. – V. 43. – №. 3. – P. 1191-1194.
32. Scheiner M., Dickens T. J., Okoli O. Progress towards self-healing polymers for composite structural applications // *Polymer*. – 2016. – V. 83. – P. 260-282.
33. Ono T., Nobori T., Lehn J. M. Dynamic polymer blends—component recombination between neat dynamic covalent polymers at room temperature // *Chemical communications*. – 2005. – №. 12. – P. 1522-1524.
34. Skene W. G., Lehn J. M. P. Dynamers: polyacylhydrazone reversible covalent polymers, component exchange, and constitutional diversity // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2004. – V. 101. – №. 22. – P. 8270-8275.

35. Chung C. M. et al. Crack healing in polymeric materials via photochemical [2+ 2] cycloaddition //Chemistry of Materials. – 2004. – V. 16. – №. 21. – P. 3982-3984.
36. Смит В. А. и др. Основы современного органического синтеза. Учебное пособие. – 2012.
37. Fridlyander I. N., Shevchenko V. Y., Barinov S. M. Ceramic composite materials //Metal science and heat treatment. – 1992. – V. 34. – №. 2. – P. 133-138.
38. Ando K. et al. Crack healing behavior and high temperature strength of mullite/SiC composite ceramics //Zairyo. – 1999. – V. 48. – №. 5. – P. 489-494.
39. Nakao W. et al. Critical crack-healing condition for SiC whisker reinforced alumina under stress //Journal of the European Ceramic Society. – 2005. – V. 25. – №. 16. – P. 3649-3655.
40. Nakao W., Takahashi K., Ando K. Threshold stress during crack-healing treatment of structural ceramics having the crack-healing ability //Materials letters. – 2007. – V. 61. – №. 13. – P. 2711-2713.
41. Nakao W., Abe S. Enhancement of the self-healing ability in oxidation induced self-healing ceramic by modifying the healing agent //Smart Materials and Structures. – 2012. – V. 21. – №. 2. – P. 025002.
42. Ando K. et al. Crack-healing and mechanical behaviour of Al₂O₃/SiC composites at elevated temperature //Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2004. – V. 27. – №. 7. – P. 533-541.
43. Osada T. et al. A novel design approach for self-crack-healing structural ceramics with 3D networks of healing activator //Scientific reports. – 2017. – V. 7. – №. 1. – P. 1-9.
44. An S., Yoon S. S., Lee M. W. Self-healing structural materials //Polymers. – 2021. – V. 13. – №. 14. – P. 2297.
45. Farle A. S. et al. A conceptual study into the potential of M_{n+1}AX_n-phase ceramics for self-healing of crack damage //Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – V. 35. – №. 1. – P. 37-45.

46. Yoshioka S., Nakao W. Methodology for evaluating self-healing agent of structural ceramics //Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2015. – V. 26. – №. 11. – P. 1395-1403.
47. Ono M. et al. A new methodology to guarantee the structural integrity of Al₂O₃/SiC composite using crack healing and a proof test //Fatigue & fracture of engineering materials & structures. – 2007. – V. 30. – №. 7. – P. 599-607.
48. Yang H. J. et al. Self-healing performance of Ti₂AlC ceramic //Journal of Materials Chemistry. – 2012. – V. 22. – №. 17. – P. 8304-8313.
49. Li S. et al. Multiple crack healing of a Ti₂AlC ceramic //Journal of the European Ceramic Society. – 2012. – V. 32. – №. 8. – P. 1813-1820.
50. Grabowski B., Tasan C. C. Self-healing metals //Self-healing materials. – 2016. – P. 387-407.
51. Zhang S., van Dijk N., van der Zwaag S. A review of self-healing metals: Fundamentals, design principles and performance //Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2020. – V. 33. – №. 9. – T. 1167-1179.
52. Wang H., Huang P., Li Z. Crack and void healing in metals //Self Healing Materials. – Springer, Dordrecht, 2007. – P. 255-277.
53. Sun W. W. et al. Linking surface precipitation in Fe-Au alloys to its self-healing potential during creep loading //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2017. – V. 48. – №. 5. – P. 2109-2114.
54. Fu Y. et al. Competitive healing of creep-induced damage in a ternary Fe-3Au-4W alloy //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2020. – V. 51. – №. 9. – P. 4442-4455.
55. Shinya N., Kyono J., Laha K. Self-healing effect of boron nitride precipitation on creep cavitation in austenitic stainless steel //Journal of intelligent material systems and structures. – 2006. – V. 17. – №. 12. – P. 1127-1133.
56. Karpov E. G. et al. Characterization of precipitative self-healing materials by mechanokinetic modeling approach //Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2012. – V. 60. – №. 2. – P. 250-260.

57. Van Dijk N., van der Zwaag S. Self-healing phenomena in metals //Advanced Materials Interfaces. – 2018. – V. 5. – №. 17. – P. 1800226.
58. Fang H. et al. Autonomous filling of creep cavities in Fe-Au alloys studied by synchrotron X-ray nano-tomography //Acta Materialia. – 2016. – V. 121. – P. 352-364.
59. Zhang S. et al. Autonomous filling of grain-boundary cavities during creep loading in Fe-Mo alloys //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2016. – V. 47. – №. 10. – P. 4831-4844.
60. Многослойные наноструктурированные материалы [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/1864952/> (дата обращения: 27.12.2022).
61. Höchbauer T. et al. Influence of interfaces on the storage of ion-implanted He in multilayered metallic composites //Journal of applied physics. – 2005. – V. 98. – №. 12. – P. 123516.
62. Rao S. I., Hazzledine P. M. Atomistic simulations of dislocation-interface interactions in the Cu-Ni multilayer system //Philosophical Magazine A. – 2000. – V. 80. – №. 9. – P. 2011-2040.
63. Choudhury S., Morgan D., Uberuaga B. P. Massive interfacial reconstruction at misfit dislocations in metal/oxide interfaces //Scientific reports. – 2014. – V. 4. – №. 1. – P. 1-8.
64. Кроткевич Д. Г. Влияние облучения протонами на структуру наноразмерного металлического многослойного покрытия Zr/Nb : бакалаврская работа / Д. Г. Кроткевич ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ), Отделение экспериментальной физики (ОЭФ) ; науч. рук. Е. Б. Кашкаров. — Томск, 2018.
65. Uglov V. V. et al. Blister formation in ZrN/SiN multilayers after He irradiation //Surface and Coatings Technology. – 2018. – V. 344. – P. 170-176.

66. Abadias G. et al. Growth, structural and mechanical properties of magnetron-sputtered ZrN/SiN_x nanolaminated coatings //Surface and Coatings Technology. – 2016. – V. 308. – P. 158-167.
67. 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. – V. 152. – P. 31-35.
68. Ryskulov A. E. et al. The effect of Ni¹²⁺ heavy ion irradiation on the optical and structural properties of BeO ceramics //Ceramics International. – 2020. – V. 46. – №. 4. – P. 4065-4070.
69. Uglov V. V. et al. Features of microstructure of ZrN, Si₃N₄ and ZrN/SiN_x nanoscale films irradiated by Xe ions //Vacuum. – 2017. – V. 143. – P. 491-494.
70. Sen H. S., Polcar T. Vacancy-interface-helium interaction in Zr-Nb multi-layer system: A first-principles study //Journal of Nuclear Materials. – 2019. – V. 518. – P. 11-20.
71. Callisti M., Lozano-Perez S., Polcar T. Structural and mechanical properties of γ -irradiated Zr/Nb multilayer nanocomposites //Materials Letters. – 2016. – V. 163. – P. 138-141.
72. Ham B., Zhang X. High strength Mg/Nb nanolayer composites //Materials Science and Engineering: A. – 2011. – V. 528. – №. 4-5. – P. 2028-2033.
73. Yang G. H. et al. Investigation of nanoindentation on Co/Mo multilayers by the continuous stiffness measurement technique //Surface and Coatings Technology. – 2005. – V. 191. – №. 1. – P. 127-133.
74. Lu Y. Y. et al. The microstructure and mechanical behavior of Mg/Ti multilayers as a function of individual layer thickness //Acta Materialia. – 2014. – V. 63. – P. 216-231.
75. Zhang J. Y. et al. Length scale-dependent deformation behavior of nanolayered Cu/Zr micropillars //Acta Materialia. – 2012. – V. 60. – №. 4. – P. 1610-1622.

76. Demkowicz M. J. et al. 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. – 2011. – V. 84. – №. 10. – P. 104102.
77. Balluffi R. W., Granato A. V., Nabarro F. R. N. Dislocations in Solids, vol. 4 //FRN Nabarro, pl North-Holland, Amsterdam. – 1979.
78. Uberuaga B. P. et al. The relationship between grain boundary structure, defect mobility and grain boundary sink efficiency //Scientific reports. – 2015. – V. 5. – №. 1. – P. 1-9.
79. Yu K. Y. et al. Superior tolerance of Ag/Ni multilayers against Kr ion irradiation: an in situ study //Philosophical Magazine. – 2013. – V. 93. – №. 26. – P. 3547-3562.
80. Misra A. et al. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites //Jom. – 2007. – V. 59. – №. 9. – P. 62-65.
81. 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. – V. 33. – №. 12. – P. 7983.
82. Chen Y. et al. In situ study of heavy ion irradiation response of immiscible Cu/Fe multilayers //Journal of nuclear materials. – 2016. – V. 475. – P. 274-279.
83. Demkowicz M. J. et al. Mechanisms of He escape during implantation in CuNb multilayer composites //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – V. 261. – №. 1-2. – P. 524-528.
84. Wei Q. M. et al. Suppression of irradiation hardening in nanoscale V/Ag multilayers //Acta Materialia. – 2011. – V. 59. – №. 16. – P. 6331-6340.
85. Gao Y. et al. Radiation tolerance of Cu/W multilayered nanocomposites //Journal of nuclear materials. – 2011. – V. 413. – №. 1. – P. 11-15.

86. 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. – V. 452. – №. 1-3. – P. 31-36.
87. Mastorakos I. N., Zbib H. M., Bahr D. F. Deformation mechanisms and strength in nanoscale multilayer metallic composites with coherent and incoherent interfaces //Applied Physics Letters. – 2009. – V. 94. – №. 17. – P. 173114.
88. Frutos E. et al. Length-scale-dependent mechanical behaviour of Zr/Nb multilayers as a function of individual layer thickness //Materials Science and Engineering: A. – 2015. – V. 632. – P. 137-146.
89. Monclús M. A. et al. Selective oxidation-induced strengthening of Zr/Nb nanoscale multilayers //Acta Materialia. – 2017. – V. 122. – P. 1-10.
90. Callisti M., Polcar T. Combined size and texture-dependent deformation and strengthening mechanisms in Zr/Nb nano-multilayers //Acta Materialia. – 2017. – V. 124. – P. 247-260.
91. Lei S. et al. Intrinsic size-controlled strain hardening behavior of nanolayered Cu/Zr micropillars //Scripta Materialia. – 2012. – V. 66. – №. 9. – P. 706-709.
92. Laptev R. et al. Effect of Proton Irradiation on the Defect Evolution of Zr/Nb Nanoscale Multilayers //Metals. – 2020. – V. 10. – №. 4. – P. 535.
93. 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. – V. 152. – P. 31-35.
94. Daghbouj N. et al. Effect of implantation of C, Si and Cu into ZrNb nanometric multilayers. – 2019.
95. Daghbouj N. et al. Interphase boundary layer-dominated strain mechanisms in Cu⁺ implanted Zr-Nb nanoscale multilayers //Acta Materialia. – 2021. – V. 202. – P. 317-330.
96. Wang F., Gong H. R. First principles study of various Zr–H phases with low H concentrations //International journal of hydrogen energy. – 2012. – V. 37. – №. 17. – P. 12393-12401.

97. Čížek J. Characterization of lattice defects in metallic materials by positron annihilation spectroscopy: A review //Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – V. 34. – №. 4. – P. 577-598.
98. Brunner S. et al. Characterization of radiation-induced defects in ZnO probed by positron annihilation spectroscopy //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd., Zurich-Uetikon, Switzerland, 2001. – V. 363. – P. 141-143.
99. Ogorodnikova O. V. et al. Annealing of radiation-induced defects in tungsten: positron annihilation spectroscopy study //Journal of Nuclear Materials. – 2019. – V. 517. – P. 148-151.
100. Shpotyuk O., Filipecki J. Radiation-induced defects in vitreous chalcogenide semiconductors studied by positron annihilation method //Materials Science and Engineering: B. – 2002. – V. 91. – P. 537-540.
101. Parente P. et al. Characterization of residual compressive stresses in layered ceramics by positron annihilation spectroscopy //Journal of the European Ceramic Society. – 2012. – V. 32. – №. 16. – P. 3989-3993.
102. Duarte Naia M. et al. Characterisation of Ti/Al multilayered structures with slow positron beams applying a simplified positron depth distribution model //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2010. – V. 636. – P. 1097-1101.
103. Gregory R. B., Su W. Monte Carlo calculation of positron implantation in multilayered materials //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1991. – V. 62. – №. 1. – P. 1-7.
104. Horodek P. et al. Slow positron beam at the JINR, Dubna //Nukleonika. – 2015. – V. 60.
105. Horodek P. et al. Development of positron annihilation spectroscopy at LEPTA facility //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2014. – V. 11. – №. 5. – P. 708-712.

106. Laptev R. et al. First-Principles Calculations and Experimental Study of H⁺-Irradiated Zr/Nb Nanoscale Multilayer System //Metals. – 2021. – V. 11. – №. 4. – P. 627.

107. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П.. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов // Учебное пособие. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 1998. – 92 с.

108. Проскурина А. А. Влияние облучения протонами и ионами гелия на дефектную структуру наноразмерных металлических многослойных систем Zr\Nb : бакалаврская работа / А. А. Проскурина ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ), Отделение экспериментальной физики (ОЭФ) ; науч. рук. Р. С. Лаптев. — Томск, 2022.

109. Zhao Y.F. et. al. Unusual He-ion irradiation strengthening and inverse layer thickness-dependent strain rate sensitivity in transformable high-entropy alloy/metal nanolaminates: A comparison of Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀/Cu vs Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Ni₁₀/Cu// Journal of Materials Science & Technology. – 2022. – V. 116. – P. 199-213.

110. Xinghang Zhang et. al. Radiation damage in nanostructured materials // Progress in Materials Science. – 2018. – V. 96. – P. 217-321.

111. Wang Min et. al. Defect-interface interactions in irradiated Cu/Ag nanocomposites // Acta Materialia. – 2018. – V. 160. – P. 211-223.

112. Особенности динамики краудионов в кристаллах с ГЦК решеткой при различных силовых воздействиях – тема научной статьи по физике читайте бесплатно текст научно-исследовательской работы в электронной библиотеке КиберЛенинка [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-dinamiki-kraudionov-v-kristallah-s-gtsk-reshetkoy-pri-razlichnyh-silovyh-vozdeystviyah> (дата обращения: 20.05.2023).

113. Междуузлия октаэдрические и тетраэдрические - Справочник химика 21 [Электронный ресурс]. URL: <https://chem21.info/info/1215791/> (дата обращения: 20.05.2023).
114. Wolfer W. Fundamental properties of defects in metals // Compr. Nucl. Mater. – 2012. – V. 1. – P. 1-45.
115. Schilling W. Self-interstitial atoms in metals // Journal of Nuclear Materials. – 1978. – V. 70. – P. 465-489.
116. Ullmaier H. Atomic defects in metals. – Berlin: Springer-Verlag, 1991. – V. 25. – P. 437.
117. Wangyu H. et. al. Analytic modified embedded atom potentials for HCP metals // J Phys: Condens Matter. – 2001. – V. 13. – P. 1193.
118. Bacon D. Point defects and clusters in the hcp metals: their role in the dose transition // Journal of Nuclear Materials. – 1993. – V. 206. – P. 249-265.
119. Laptev R. и др. First-Principles Calculations and Experimental Study of H⁺-Irradiated Zr/Nb Nanoscale Multilayer System // Metals. 2021. V. 11. № 4. P. 627.
120. Stopping and Range of Ions in Matter // Wikipedia. 2022.
121. Ломыгин А. Влияние протонного облучения на микроструктуру и свойства наноразмерных металлических слоев Zr/Nb : магистерская диссертация / А. Ломыгин ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ), Отделение экспериментальной физики (ОЭФ) ; науч. рук. Р. С. Лаптев. — Томск, 2021.
122. Автоматизированный комплекс Gas Reaction Controller [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.tpu.ru/departments/kafedra/of/lab/Tab1/GasReactionController.pdf> (дата обращения: 20.05.2023).
123. Ли К. Спектрометр доплеровского уширения аннигиляционной линии / К. Ли, Ю. С. Бордулев, Р. С. Лаптев; науч. рук. Ю. С. Бордулев // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII

Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2015 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С.153-155.

124. Зин Мин У. Исследование изменений электронной структуры и параметров дефектов в сплавах на основе Ni-Cr методом аннигиляции позитронов: диссертация, канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 Москва, 2007 164 с. РГБ ОД, 61:07-1/1031.

125. Позитрон // Материал из Википедии — свободной энциклопедии. [Электронный ресурс]. - 2022. - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Позитрон> (дата обращения: 22.11.22).

126. Быстров А. С. Спектрометр временного распределения аннигиляции позитронов на основе время-цифрового преобразователя: бакалаврская работа / А. С. Быстров; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Физико-технический институт (ФТИ), Кафедра общей физики (ОФ); науч. рук. Р. С. Лаптев. — Томск, 2017.

127. Б.С. Ишханов, Э.И. Кэбин. Антиматерия. М., 2012. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/antimatter/>.

128. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Позитроника и нанотехнологии: возможности изучения нанообъектов в технически важных материалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии // Нанотехника. 2008. №4 (16). С. 33–42.

129. Полуширина // Википедия. 2022.

130. Full width at half maximum // Wikipedia. 2022.

131. Scopus - сведения о документе - Application of encapsulated ^{22}Na isotope to Doppler spectroscopy based on positrons emitted directly from the source [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84991096998&origin=resultslist&sort=plf-f> (дата обращения: 28.10.2022).

132. Scopus - сведения о документе - Measurement of Monochromatic Positron Lifetime in a Continuous Flux [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85058927118&origin=resultslist&sort=plf-f> (дата обращения: 28.10.2022).

133. Laptev R. et al. Distribution of Hydrogen and Defects in the Zr/Nb Nanoscale Multilayer Coatings after Proton Irradiation //Materials. 2022. V. 15. – №. 9. P. 3332.

134. Laptev R. и др. Effect of Proton Irradiation on Zr/Nb Nanoscale Multilayer Structure and Properties // Metals. 2023. V. 13. № 5. P. 903.

135. Home page - Jerzy Dryzek - Research [Электронный ресурс]. URL: https://www.ifj.edu.pl/private/jdryzek/page_r26.html (дата обращения: 25.05.2023).

136. ТК РФ Трудовой кодекс Российской Федерации (ТК РФ) | ГАРАНТ [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12125268/> (дата обращения: 13.05.2023).

137. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 02.12.2020 N 40 "Об утверждении санитарных правил СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» | ГАРАНТ [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/400151942/> (дата обращения: 13.05.2023).

138. Государственный стандарт Союза ССР ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» (утв. постановлением Государственного Комитета стандартов Совета Министров СССР от 26.04.1978 N 1102) | ГАРАНТ [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/3924216/> (дата обращения: 13.05.2023).

139. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62075> (дата обращения: 13.05.2023).

140. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28 января 2021 -

docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 13.05.2023).

141. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (с Изменениями N 1, 2) - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 13.05.2023).

142. «МР 2.2.9.2311-07. 2.2.9. Состояние здоровья работающих в связи с состоянием производственной среды. Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности. Методические рекомендации» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ от 18.12.2007) (вместе с «Методикой психической саморегуляции») [Электронный ресурс]. URL: <https://legalacts.ru/doc/mr-2292311-07-229-sostojanie-zdorovja-rabotaiushchikh-v/> (дата обращения: 13.05.2023).

143. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/21681/> (дата обращения: 16.05.2023).

144. ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50159/> (дата обращения: 16.05.2023).

145. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция) \ КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 16.05.2023).

146. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.1 Общая часть (Издание седьмое) - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030216> (дата обращения: 24.05.2023).

147. Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок от 15 декабря 2020 - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264184> (дата обращения: 24.05.2023).

148. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1) - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 24.05.2023).

149. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий от 31 декабря 2020 - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854> (дата обращения: 24.05.2023).

Приложение 1

Используемые сокращения в таблице: нч – научный руководитель, оп – оператор, ис – исполнитель, исп – исполнение, t_{\min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, t_{\max} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, $t_{\text{ож}}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения работы, T_{pi} – продолжительность выполнения одной работы в рабочих днях, T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы в календарных днях.

Таблица 1.1 – Временные показатели проведения научного исследования

Названия работы	Трудоемкость работ									Исполнители			Длительность работ в рабочих днях			Длительность работ в календарных днях		
	t_{\min} , чел-дни			t_{\max} , чел-дни			$t_{\text{ож}}$, чел-дни						T_{pi}			T_{ki}		
	Исп1	Исп2	Исп3	Исп1	Исп2	Исп3	Исп1	Исп2	Исп3	Исп1	Исп2	Исп3	Исп1	Исп2	Исп3	Исп1	Исп2	Исп3
Составление и утверждение технического задания	3	3	3	7	7	7	4,6	4,6	4,6	нч	нч	нч	4,6	4,6	4,6	7	7	7
Подбор и изучение	30	30	30	60	60	60	42	42	42	ис	ис	ис	42	42	42	62	62	62

материалов по теме																		
Календарное планирование работ по теме	3	3	3	7	7	7	4,6	4,6	4,6	нч, ис	нч, ис	нч, ис	2,3	2,3	2,3	3	3	3
Проведение теоретических расчетов параметров облучения протонами образцов	7	7	7	14	14	14	9,8	9,8	9,8	ис	ис	ис	9,8	9,8	9,8	14	14	14
Облучение протонами образцов	7	10	7	14	21	14	9,8	14,4	9,8	оп	оп	оп	9,8	14,4	9,8	14	21	14
Проведение исследования методом	14	21	14	30	37	30	20,4	27,4	20,4	оп	оп	оп	20,4	27,4	20,4	30	40	30

позитронной аннигиляционно й спектроскопии образцов не подвергшихся термическому отжигу и не облученного образца																		
Осуществление термического отжига для образцов при разных температурах	3	3	3	7	7	7	4,6	4,6	4,6	оп	оп	оп	4,6	4,6	4,6	7	7	7
Проведение исследования методом позитронной	14	21	14	30	37	30	20, 4	27, 4	20, 4	оп	оп	оп	20, 4	27, 4	20, 4	30	40	30

аннигиляционно й спектроскопии образцов подвергшихся термическому отжигу																		
Исследование на твердомере	-	7	3	-	10	7	-	8,2	4,6	-	ис	ис	-	8,2	4,6	-	12	7
Исследование на сканирующем электронном микроскопе	-	10	7	-	20	14	-	14	9,8	-	оп	оп	-	14	9,8	-	21	14
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями, анализ	30	30	30	44	60	60	35, 6	42	42	нч, ис	нч, ис	нч, ис	17, 8	21	21	26	31	31

полученных результатов																			
Выводы по результатам исследования и написание отчета о проведенном исследовании в виде ВКР	30	30	30	60	60	60	42	42	42	ис	ис	ис	42	42	42	62	62	62	
Итого													174	218	191	255	320	282	