

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
 Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов УДК 620.179.13:66.085.3/.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бондаренко Юрий Станиславович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Пушкарев Александр Иванович	д-р физ.-мат. наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение социально- гуманитарных наук, доцент	Старикова Екатерина Васильевна	канд. филос. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение контроля и диагностики, профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	д-р биол. наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	канд. техн. наук		

Томск – 2018 г

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
Р1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
Р2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
Р3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
Р4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
Р5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
Р6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
Р7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
Р8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
Р9	Способность проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
Р10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
Р11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
Р12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Бондаренко Юрий Станиславович

Тема работы:

Разработка тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1799/с от 15.03.2018
---	------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09 июня 2018 года
--	-------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Литературные данные, результаты при проведении НИР и прохождении практик.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Обзор литературы 2. Установка для выполнения экспериментов и диагностическое оборудование 3. Тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5. Социальная ответственность
Перечень графического материала	Презентация в Microsoft PowerPoint

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Екатерина Васильевна
Социальная ответственность	Ахмеджанов Рафик Равильевич
Разделы, выполненные на иностранном языке	Квашнина Ольга Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22 января 2018 г.
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Пушкарев Александр Иванович	д-р физ.-мат. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бондаренко Юрий Станиславович		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
 Уровень образования: магистр
 Отделение материаловедения
 Период выполнения: 2017/2018 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08 июня 2018 г.
--	-----------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
Пример заполнения: Разделы/главы ВКР и срок выполнения		
15/03/2018	Литературный обзор на тему радиационного модифицирования материалов и методов исследования быстрых радиационных процессов	20
28/03/2018	Описание конструкции и основных параметров установки для выполнения экспериментов	30
08/04/2018	Разработка методики тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов	30
23/04/2018	Финансовый менеджмент, и ресурсоэффективность и ресурсосбережение	5
05/05/2018	Социальная ответственность	5
07/05/2018	Разделы, выполненные на иностранном языке	10
		<i>Сумма: 100 баллов</i>

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, Профессор	Пушкарев Александр Иванович	д-р физ.-мат. наук		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 130 страниц, 27 рисунков, 15 таблиц, 64 источников, 1 приложения.

Ключевые слова: МОЩНЫЙ ИОННЫЙ ПУЧОК (МИП), ОХЛАЖДЕНИЕ МИШЕНИ, ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДИАГНОСТИКА, ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ, ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, БЫСТРЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ, ВАКАНСИИ, МЕЖДОУЗЕЛЬНЫЕ АТОМЫ.

Объектом исследования является тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов при охлаждении мишени после воздействия МИП и анализ вклада физических процессов в остывание мишени.

Цель этой работы - использовать тепловизионную диагностику облученных мишеней для изучения быстрых радиационно-индуцированных процессов в металлах; для проверки этой диагностики мощным ионным пучком (МИП) на генераторе, и возможности определения чувствительности и погрешности измерения параметров радиационно-индуцированных дефектов.

В процессе исследования проводились экспериментальные исследования быстрых радиационных процессов при охлаждении мишеней из различных металлов и определение радиационных дефектов, вносящих вклад в остывание мишени до температуры окружающей среды.

В результате исследования экспериментально было установлено, что в процессе охлаждения «маленькой» (размеры которой много меньше поперечных размеров МИП) мишени, температура уменьшается медленнее, чем расчетные значения, которые учитывают тепловое излучение при малом вкладе теплопроводности в остывание мишени. Разработанная методика тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов может быть использована для исследования радиационной стойкости металлов, которые в дальнейшем можно применять в новых технологиях.

ABSTRACT

Master's thesis consists of 130 pages, 27 figures, 15 tables, 64 references, 1 applications.

Key words: INTENSE PULSED ION BEAMS (PIB), TARGET COOLING, THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS, THERMAL EFFECTS, THERMAL RADIATION, FAST RADIATION-INDUCED PROCESSES, RADIATION-INDUCED DEFECTS, VACANCIES, INTERSTITIAL ATOMS.

The object of the research is to study the thermal imaging of fast radiation-induced processes when the target cooling after exposure to HIPIB and an analysis of the contribution of physical processes to the target cooling.

The purpose of this work is to employ the thermal imaging diagnostics of irradiated targets to study fast radiation-induced processes in metals; to test this diagnostics at the high intense pulsed ion beam (HIPIB) generator, and determine the possibility, sensitivity and the error in measurement of the parameters of radiation-induced defects.

The following tasks have been performed. An experimental study of fast radiation processes when the targets cooling from various metals and determining the radiation defects contributing to the target cooling to ambient temperature were revealed.

As a result of the research, it was experimentally established that in the cooling process of a "small" target (the size of which is much smaller than the transverse dimensions of the PIB), the temperature decreases more slowly than the calculated values that allow for thermal radiation with a small contribution of thermal conductivity to the cooling target. The developed technique of thermal imaging diagnostics of fast radiation-induced processes can be used to study the radiation resistance of metals, which can later be used in new technologies.

Обозначения и сокращения

В настоящей работе использованы следующие обозначения и сокращения:

МИП – мощные ионные пучки

РПТ – радиационно-пучковые технологии

ДФЛ – двойная формирующая линия

ГИН – генератор импульсных напряжений

dpa – displacement per atom – количество дефектов на один атом

кэВ – килоэлектронвольт

Оглавление

Введение.....	11
1 Обзор литературы	14
1.1 Получение и применение мощных ионных пучков.....	14
1.2 Понятие о технологиях радиационного модифицирования материалов	16
1.3 Методы исследования быстрых радиационных процессов	22
2 Установка для выполнения экспериментов и диагностическое оборудование.....	27
2.1 Экспериментальная установка ТЕМП – 4М.....	27
2.1.1 Импульсный ионный ускоритель ТЕМП – 4М принцип работы.....	27
2.1.2 Диагностическое оборудование ускорителя ТЕМП – 4М	29
2.2 Экспериментальная установка ТЕМП – 6	34
3 Тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов.....	37
3.1 Охлаждение мишени из нержавеющей стали	37
3.2 Расчет мощности отжига радиационных дефектов	39
3.3 Охлаждение мишеней из меди, латуни и титана	42
3.4 Анализ миграции вакансий	45
3.5 Концентрация радиационных дефектов	49
3.6 Перемещение междоузельных атомов до аннигиляции	51
3.7 Анализ результатов исследования.....	54
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
4.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-технического исследования.....	59
4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	61
4.3 SWOT-анализ.....	63
4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	65
4.4 Инициация проекта	66
4.5 Бюджет научного исследования	69
4.5.1 Расчет основной заработной платы.....	70

4.5.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	72
4.5.3 Затраты электроэнергии	72
4.5.4 Затраты на научные командировки	73
4.5.5 Накладные расходы.....	73
5 Социальная ответственность	79
5.1 Производственная безопасность.....	80
5.1.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	81
5.1.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	86
5.2 Экологическая безопасность.....	92
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	94
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	95
Заключение	98
Список использованных источников	102
Приложение А. Thermal imaging diagnostics of fast radiation-induced processes	109

Введение

Развитие техники требует расширения набора используемых материалов. Большинство технических материалов обладает кристаллическим строением. Это дает возможность с единых физических позиций рассмотреть закономерности поведения материалов в связи с их строением. Развитие методов физического исследования кристаллов позволяет разрабатывать новые технологические процессы получения нужных веществ. К таким основным процессам получения материалов с заданными физическими свойствами следует отнести [1]:

- легирование примесями (созданием определённого уровня примесных атомов для изменения электронных, коррозионных, прочностных характеристик);
- отжиг материалов (нагрев в различных режимах – изохорный, изотермический отжиг, поверхностный нагрев);
- выращивание кристаллов (как монокристаллов больших размеров, так и получение тонких пленок);
- деформационное воздействие (для упрочнения материалов);
- закалка (быстрое охлаждение материала для повышения прочностных характеристик);

Перспективным направлением для улучшения эксплуатационных свойств различных металлических изделий является модификация импульсными энергетическими потоками (ионные и электронные пучки, лазерные, плазменные потоки). При таких модификациях приповерхностный слой металлов подвергается высоким скоростям нагрева и последующего охлаждения, превышающим (10^7-10^9) К/с. Давление в области поглощения достигает (10^8-10^{10}) Па. Такое воздействие образует твердые растворы и вторичные фазы, которые не характерны для равновесной диаграммы фазовых состояний [2]. Мощные ионные пучки (МИП) обеспечивают модификацию тонкого

приповерхностного слоя без изменения объемных свойств изделия. При плотности ионного тока (40-70) А/см² и длительности импульса (100-150) нс. плотность заряда за 1 импульс составляет (2-4) мкКл/см². Это соответствует флюенсу ионов за один импульс (1,3-2,5) × 10¹³ см⁻². Пробег ионов с энергией 200-300 кэВ в металлах составляет 0,5-1 мкм и их концентрация в приповерхностном слое не превышает 10¹⁷ см⁻³. Плотность энергии МИП при этом достигает (1-5) Дж/см². Поэтому основным фактором, определяющим изменение свойств изделия при облучении МИП, является тепловое воздействие, а не имплантация ионов. Стабильность параметров в серии импульсов, ресурс непрерывной работы и однородность по сечению являются наиболее важными параметрами генератора пучка заряженных частиц, определяющие возможность его технологического применения [3].

В работе представлена тепловизионная диагностика быстрых процессов излучения, в том числе формирование точечных радиационно-индуцированных дефектов с высокой концентрацией (скорость 5·10⁶ дпа/с) и измерение их параметров в реальном масштабе времени. Кривые охлаждения для различных мишеней после облучения мощным ионным пучком (МИП) были проанализированы с использованием модели, которая включает радиационное охлаждение, миграцию и отжиг радиационно-индуцированных дефектов, образовавшихся в мишени при облучении. Исследования проводились на ускорителе ТЕМП-6 ((200-250) кэВ с длительностью импульса 120 нс), состав ионного пучка - ионы углерода (80-90) % и протоны, а плотность энергии составляла (1-10) Дж/см². В течение первых (60-70) с после облучения МИП динамика охлаждения небольших мишеней из нержавеющей стали, титана, латуни и меди (размер мишеней меньше диаметра ионного пучка) удовлетворительно описывается двумя процессами - потери тепловой энергии в мишени из-за радиационного охлаждения и выделение энергии из-за быстрого термического отжига радиационно-индуцированных дефектов. Энергия активации, необходимая для отжига дефектов (междоузельных атомов) в

мишенях из нержавеющей стали и меди, составляет 0,30 эВ, в мишени титана 0,10 эВ, ее концентрация варьируется от 0,01 до 0,15%. В начальный момент после облучения МИП (t меньше 15 с) экспериментальная мощность потерь энергии в мишени превышает расчетную. Это можно объяснить дополнительным потреблением энергии в мишени из-за миграции вакансий при высокой температуре. Тепловизионная диагностика позволяет в реальном времени исследовать быстрые процессы миграции и отжига радиационно-индуцированных дефектов в металлах с временным разрешением 1 мс.

Цель этой работы - использовать тепловизионную диагностику облученных мишеней для изучения быстрых радиационно-индуцированных процессов в металлах; тестирование этой диагностики мощным ионным пучком, определение чувствительности и погрешности измерения параметров радиационно-индуцированных дефектов.

Актуальность данной методики заключается в том, что для разработки новых технологий, в которых используют материалы с высокой радиационной стойкостью (освоение космического пространства, развитие атомной промышленности, исследование термоядерного синтеза) необходим оперативный метод исследования радиационной стойкости материалов, обеспечивающий возможность проведения испытаний в реальном времени в условиях интенсивной радиационной нагрузки. Этот метод не должен требовать дорогостоящего оборудования, должен обеспечивать возможность оперативного анализа образцов из наиболее распространенных конструкционных материалов и быть доступным для большого круга исследователей.

1 Обзор литературы

1.1 Получение и применение мощных ионных пучков

В ряде случаев эксплуатационные свойства механизмов и машин определяются характеристиками поверхности деталей. Поверхностный слой детали в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, магнитному, электрическому, световому и другим воздействиям. В большинстве случаев разрушение детали начинается именно с поверхностного слоя, например, коррозии, эрозии, трещины, износа, возникновение и развитие усталостной трещины и т.д. Улучшая свойства поверхности, можно достичь повышение надежности, ресурса работы, весогабаритных характеристик. В особенности это важно, когда уже исчерпаны возможности материалов. Во многих случаях при этом стоимостные характеристики деталей при улучшенных эксплуатационных характеристиках значительно ниже.

Направленно менять структуру поверхностного слоя, наносить покрытия различного назначения позволяют плазменные и электрофизические пучковые установки. Экологическая чистота метода отличает их от электрохимических методов осаждения покрытий.

На международной конференции по тонким пленкам и металлургическим покрытиям (Сан-Диего, США, 1998 г.) ведущими экспертами в этой области сообщено, что к настоящему времени мировая промышленность выпускает детали с улучшенными поверхностными свойствами на 3 триллиона долларов с ежегодным приростом 3%. Этот высокий темп роста прогнозировался до 2010 года. Наибольшая доля принадлежит покрытиям при использовании различных плазменных установок. Пучковые технологии (ионная имплантация, воздействие импульсных мощных ионных пучков, непрерывных и импульсных электронных пучков) имеют наилучшую долю в этом и меньший временной масштаб внедрения, за исключением электронно-лучевых технологий. Хотя

ионная имплантация в области полупроводниковой электроники стала привычным технологическим процессом.

Модификация поверхностного слоя материалов использованием импульсных мощных ионных пучков (энергия ионов (0,1-1) МэВ, длительность импульса (10^{-8} - 10^{-6}) с ток ионов (0,5-50) кА) имеет еще короткий временной интервал, но в последние несколько лет бурно развивается в разных странах мира[4].

Источники МИП начали разрабатываться с середины 70-х годов прошлого века в основном для исследований, связанных с реализацией инерционного управляемого термоядерного синтеза. Назначение источников определяло их параметры. Развитие исследований по созданию ускорителей, разработка диодных систем, систем транспортировки пучков к мишени, новых подходов к генерации пучков были направлены на достижение максимально возможного энергозатрата в мишень за минимально короткое время. К началу 80-х годов прошлого века были достигнуты значительные успехи в создании ускорителей на экстремально высокие параметры.

Первые работы по практическому использованию мощных ионных пучков для имитации и отжига полупроводников проводились в Корнельском университете США в начале 80-х годов, а в НИИ Ядерной Физики ТПУ были проделаны первые работы, исследующие возможность исследования МИП для модификации поверхностных свойств металлов и сплавов [4]. Уже на этом этапе исследований стало ясно, что существующие на этот момент времени источники МИП требуют изменений, определяемых новой областью применения, и на первый план выходят такие характеристики новых источников, как ресурс работы, стабильность параметров, возможность получения ионных пучков различного элементного состава. Во многом это зависит от метода создания плазмы, необходимой плотности и состава, из которой ускоряются ионы в диоде.

В результате исследований по воздействию мощных ионных пучков на металлы и сплавы определились и основные направления их прикладного использования:

- чисто энергетическое воздействие на материалы и конструкции изделий;
- короткоимпульсная имплантации в металлы и полупроводники.

В первом случае характер воздействия пучка схож с действием других концентрированных потоков энергии - импульсного лазерного излучения, наносекундных электронных пучков, в особенности, низкоэнергетических электронных пучков, импульсной плазмы. Энергия ионов, также, как и сорт ионов, решающего в этом случае не имеют. Энергия ионов минимизируется ($5 \cdot 10^6 - 10^8$) Вт/см², конкретное значение которой определяется материалом мишени [4].

Во втором случае наряду с энергетическим воздействием происходит имплантация ионов. При воздействии мощным ионным пучком с плотностью мощности не превышающей ($10^6 - 10^7$) Вт/см² происходит одновременное внедрение примесных атомов и нагрев поверхностного слоя обрабатываемых изделий с быстрым его остыванием после прекращения действия импульсов тока. При этом возможность изменения сорта ускоряемых частиц, их энергии, длительности, частоты следования импульсов, и величины ионного тока определяют скорость набора дозы, полную дозы, и плотность потока мощности на мишень, которой задается температура поверхностного слоя мишени.

1.2 Понятие о технологиях радиационного модифицирования материалов

В последние годы интенсивно разрабатываются радиационно-пучковые технологии (РПТ) как получения, так и модифицирования материалов. Научной основой РПТ явились результаты исследования взаимодействия электронов, ионов, атомов и их кластеров, плазмы, лазерного и гамма-излучения с твердым телом. Радиационное излучение или ускоренная частица, двигаясь в твердом

теле, теряют свою энергию в столкновении с атомами и электронами тела, нагревая его и создавая радиационные дефекты, а внедренные ионы (атомы) остаются в решетке [5].

При увеличении количества энергии, переносимой частицами при излучении, характер их воздействия на поверхность твердого тела утрачивает чисто радиационный аспект и становится термическим [5]. В этой связи мощные электронные и ионные пучки, лазерное излучение и потоки высокотемпературной плазмы с плотностью мощности выше 10^5 Вт/см² можно рассматривать как концентрированные потоки энергии. Каждый из видов радиационного воздействия может быть использован и для модифицирования, и для получения новых материалов.

Радиационную обработку материалов можно разделить на несколько этапов [5]:

- техника для обработки, создающая потоки электронов, нейтральных атомов, ионов, плазмы, кластеров атомов (микрочастиц), квантовое излучение, силовое воздействие, нагрев и охлаждение и др.;

- методы обработки, включая имплантацию, нагрев, осаждение, деформирование, распыление, насыщение и др.;

- параметры регулирования при обработке: флюенс, токи, энергия и вид излучения (частиц), масса частиц, длительность импульса, температура мишени, окружающая среда и др.;

- технологические задачи: активация поверхности, изменение топографии поверхности, залечивание дефектов поверхности, изменение структуры или химического состава, или удаление слоя и т.д.;

- результат обработки – это измененные шероховатость поверхности, глубина (толщина) модифицированного слоя, его структура, состав и фазовое состояние, количество нанесенных слоев, адгезионная способность поверхности, уровень остаточных напряжений и др.;

- эксплуатационные и другие свойства, созданные обработкой, например, износостойкость, эрозионная и коррозионная стойкость, прочность, твердость, выносливость, термостойкость, сопротивление трению, водопроницаемость, электропроводность (диэлектриков), термоэдс, эмиссионные характеристики и др.

Традиционные методы модифицирования материалов основаны на термическом, химическом и радиационном воздействии на поверхностные слои материалов. Современные радиационно-пучковые технологии воздействия на материалы используют электрическую, кинетическую, магнитную и тепловую составляющие энергии, и различные способы ее подвода к мишени: импульсный, непрерывный, импульсно-периодический, линейный, точечный, квазиобъемный, поверхностный.

Модифицирующее действие может быть осуществлено за счет ряда физических процессов [5]:

- имплантация атомов в материал;
- быстрый нагрев и быстрое охлаждение поверхностного слоя;
- плазмообразования на поверхности мишени;
- образования дефектов в слое материала;
- химическое взаимодействие атомов мишени со средой или бомбардирующими частицами;
- структурных и термических напряжений;
- распыления или испарения атомов поверхностного слоя;
- ударно-волнового воздействия вследствие газодинамического разлета плазмы и пара с поверхности материала.

При модифицировании происходят различные, определяемые параметрами радиационного взаимодействия, структурно-фазовые изменения. Наиболее заметные структурные и фазовые изменения в материалах [4]:

- загрязнение материалов примесями;
- диспергирование микроструктуры;

- изменение магнитного состояния сплавов;
- увеличение параметра кристаллической решетки;
- накопление радиационных дефектов;
- массоперенос в приповерхностном слое и в объеме;
- разворот плоскостей упаковки атомов;
- создание пересыщенных твердых растворов;
- растворение и образование радиационно-стимулированных и радиационно-индуцированных фаз;
- расслоение твердых растворов, упорядочение;
- образование аморфной и ультрадисперсной фаз;
- образование слоистых структур и др.

Облучение материалов МИП вызывает быстрый нагрев и быстрое охлаждение поверхностного слоя материалов, что приводит к формированию в их кристаллической структуре радиационно-индуцированных дефектов. Дефектами кристаллической структуры называют отклонения от идеальной кристаллической решетки. Реальные кристаллы никогда не идеальны, они содержат в себе нарушения идеальной решетки, называемые структурными дефектами.

Бывают разнообразные дефекты кристаллического строения, так по способу образования дефектов различают [1]:

- химические – примесные атомы, введенные в кристалл при его выращивании, диффузии с поверхности или при ионной имплантации, а также за счет трансмутации при захвате атомами медленных нейтронов;
- термические – дефекты, возникающие в результате нагрева кристалла с последующей его закалкой;
- деформационные – дефекты, возникающие по воздействию пластической деформации кристаллов;
- радиационные – образующиеся в кристаллах при их облучении быстрыми электронами, нейтронами, ускоренными ионами.

Однако наиболее удачной и универсальной системой классификации дефектов кристаллического строения является классификация дефектов кристаллического строения по геометрическому принципу – по числу измерений, в которых дефект имеет макроскопические размеры, т.е. превышающие параметр решетки a , значит параметр решетки (кратчайшее межатомное расстояние, или атомный размер) может являться единицей измерения, сравнивая с которой размер дефекта вдоль одного из трех направлений (x, y, z), можно отнести их к одному из следующих типов [1]:

1) нуль-мерные, или точечные дефекты – дефекты, размеры которых во всех трех направлениях сравнимы с межатомным параметром a .

2) одномерные, или линейные – дефекты, у которых один из размеров существенно больше a , а два других сравнимы с параметром решетки

3) двухмерные, плоские дефекты, т.е. несовершенства у которых два размера существенно превышают параметр решетки.

4) трехмерные, или объемные дефекты, т.е. несовершенства у которых все три размера существенно больше межатомного параметра a .

Быстрые радиационные процессы, связанные с воздействием мощных ионных пучков на металлы, в кристаллической структуре этих материалов образуются точечные радиационные дефекты (вакансии и межузельные атомы).

Вакансии – это отсутствие атома в узле кристаллической решетки (рисунок 1.1 а).

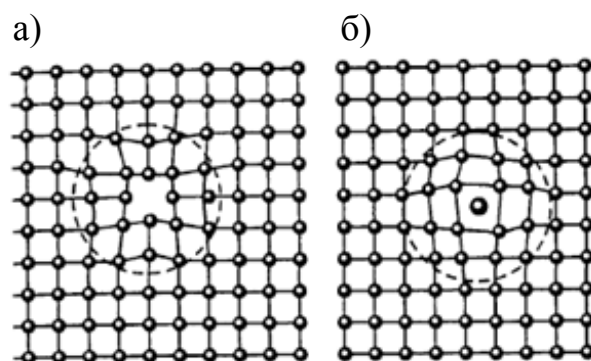


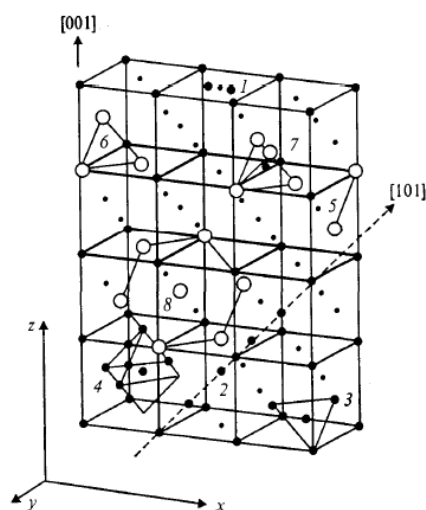
Рисунок 1.1 – Конфигурация атомов в простой кубической решетке около вакансии (а) и межузельного атома (б)

Междоузельные атомы – это такие образования в кристалле, когда около заполненного узла кристаллической решетки располагается лишний атом (рисунок 1.1 б). Этот лишний атом может образовывать с узельным атомом различные конфигурации [1]:

а) гантельная конфигурация – такое взаимное расположение двух атомов около одного узла в решетке, когда они оба сдвинуты по разные стороны от узла вдоль одного из плотноупакованных направлений в решетке (рисунок 1.2, 1);

б) статический краудион – конфигурация атомов, образованная путем встраивания лишнего атома в расположение регулярных атомов вдоль плотноупакованных направлений, когда смещение атомов от своих равновесных положений распределяется только по плотноупакованному ряду на несколько межатомных расстояний (порядка $7-10 a$) (рисунок 1.2, 2);

в) тетра-и октаэдрический междоузельные атомы – такие конфигурации, когда лишний атом находится в центре тетраэдра или октаэдра, в вершинах которых расположены атомы решетки (рисунок 1.2, 3 и 4).



1 – гантель ориентации $[100]$; 2 – статический краудион ориентации $[101]$; 3 – тетраэдрическое междоузлие; 4 – октаэдрическое междоузлие; 5 – бивакансия; 6 – плоская тривакансия; 7 – тетраэдрическая тривакансия; 8 – комплекс из семи вакансий.

Рисунок 1.2 – Схема основных точечных дефектов в ГЦК – решетке

1.3 Методы исследования быстрых радиационных процессов

Улучшение свойств машиностроительной продукции невозможно без новых технологических процессов, которые позволяют увеличить срок службы и надежность деталей и компонентов в тяжелых условиях эксплуатации. Для активного развития космического пространства и ядерной промышленности, и исследований термоядерного синтеза требуются материалы с сопротивлением высокодозной радиации. Для разработки новых технологий для их производства необходим оперативный метод исследования радиационной стойкости материалов, позволяющий проводить локальные испытания в условиях интенсивного облучения.

Большинство исследований по образованию, миграции и отжигу радиационных дефектов проводились с использованием электронного микроскопа в реальном времени при наблюдении при облучении электронным пучком [6,7,8] (рисунок 1.3) или непрерывным ионным пучком [9,10] (рисунок 1.4). Однако этот метод не позволяет исследовать образование радиационных дефектов при интенсивном облучении, например, в ядерных реакторах или космическом пространстве.

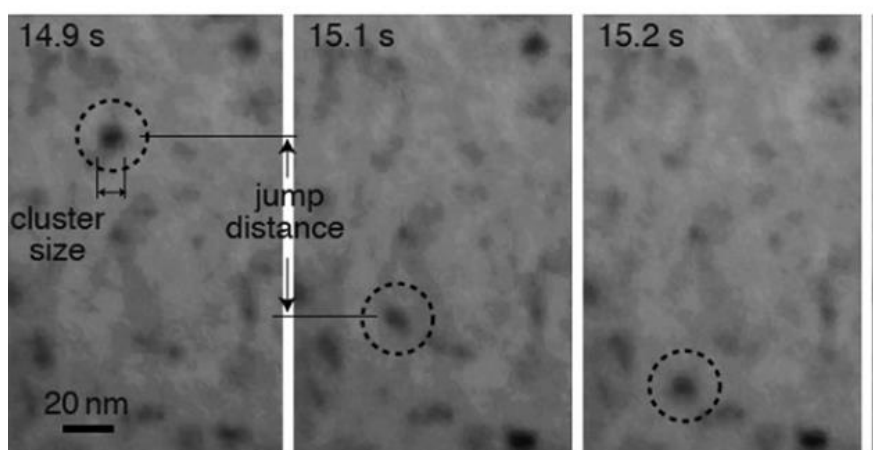


Рисунок 1.3 – Миграция междоузельных кластеров в Fe, наблюдаемых при облучении электронами 1250 кВ (0.05 dpa/s) при комнатной температуре

Метод исследования быстрых радиационных процессов с помощью электронного микроскопа в реальном времени при облучении мишени непрерывным электронным пучком, как показано на рисунке 1.3 не позволяет детально изучить структуру радиационных дефектов, динамику их формирования, агрегирования, миграции и др. при нагревании исследуемой мишени до 200-500 °С [6].

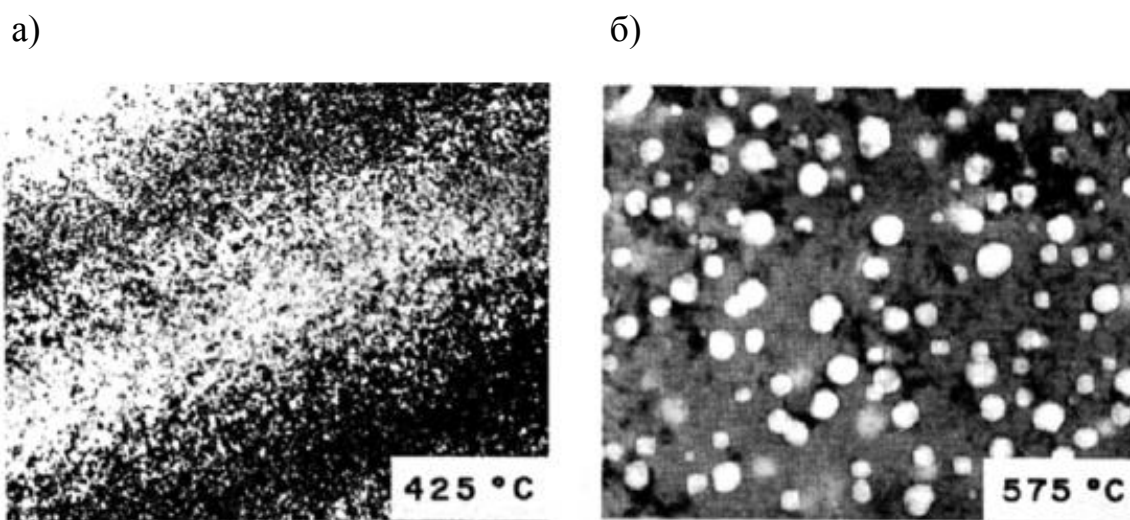


Рисунок 1.4 – Электронные микрофотографии мишени из нержавеющей стали, обработанные раствором, подвергаются бомбардировке при различных температурах (а) – 425 °С; б) – 575 °С) ионами C^+ 200 кэВ до дозы 41 дpa

Метод исследования формирования радиационных дефектов с помощью электронного микроскопа, при облучении мишени непрерывным ионным пучком, показанный на рисунке 1.4, не позволяет исследовать радиационную стойкость конструкционных материалов в условиях интенсивного радиационного воздействия ионизирующего излучения, характерного для атомного реактора и космического пространства. Этот метод исследования радиационных дефектов в образцах из конструкционных материалов является дорогостоящим, так как требует сложной пробоподготовки и продолжительных исследований на электронном микроскопе атомного разрешения [9]. Для просвечивающего электронного микроскопа толщина образца не должна

превышать 0.1 мкм, что не позволяет исследовать радиационные процессы в объёме конструкционных материалов. Выполненные нами исследования показали, что при уменьшении толщины мишени с 200 мкм до 75 мкм значительно увеличивается потребление тепловой энергии в начальный период времени после облучения ионным пучком.

Другим широко используемым методом является предварительное облучение (энергетическими нейтронами в ядерных реакторах [11,12] или ионными пучками [13,14,15]) и после облучения изучение радиационных дефектов с использованием электронного микроскопа [16,17], путем обратного рассеяния Резерфорда [18] или изменения свойств мишеней (радиационное разбухание (radiative swelling) [9], проводимость [13], измерения изменения длины [19] и т.д.). Однако этот метод не позволяет проводить в реальном времени исследование поведения структурных материалов под воздействием излучения. Радиационные дефекты в металлах имеют высокую подвижность при комнатной температуре, характерная постоянная времени доминирующих процессов динамического отжига в Si (кремний) при комнатной температуре составляет около 6 мс [15]. Поэтому предварительное облучение необходимо проводить при низкой температуре, что значительно усложняет исследования. В [12] облучение нейтронным пучком медной мишени проводили при температуре 16 К, а в [13] - при температуре 10 К. Кроме того, облучение образцов интенсивным пучком нейтронов, образующихся при работе ядерного реактора, создает условия для образования остаточной радиации, что значительно усложняет их дальнейшее исследование. Этот метод исследования радиационных дефектов в образцах также является дорогостоящим и сложным для быстрого исследования.

В последние годы активно развиваются методы численного моделирования образования, миграции, агрегации и аннигиляции радиационных дефектов в металлах (моделирование молекулярной динамики [20,21], кинетическая Монте-Карло и теория скорости [22], нелинейная кинетическая

дискретная модель [23] и другие). Однако результаты моделирования должны быть проверены экспериментально.

Для исследования дефектов в конструкционных материалах используют также и термические методы. При нагревании исследуемого образца происходит увеличение тепловых колебаний атомов кристаллической решетки (фонное возбуждение) и формирование равновесной концентрации пар Френкеля (межузельный атом+вакансия). Изучение охлаждения металлической мишени позволяет определить концентрацию радиационных дефектов, энергию активации их миграции и отжига. С помощью высокочувствительного микрокалориметра энергия, поглощенная или выделяемая металлическим образцом из-за образования или отжига радиационных дефектов было измерено в реальном масштабе времени (рисунок 1.5 и 1.6) [24].

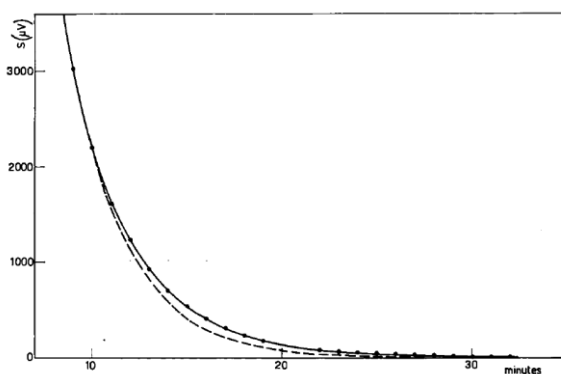


Рисунок 1.5 – Калориметрическая кривая, показывающая отклонение от экспоненты (начальная температура 650 °С, конечная температура 600 °С)

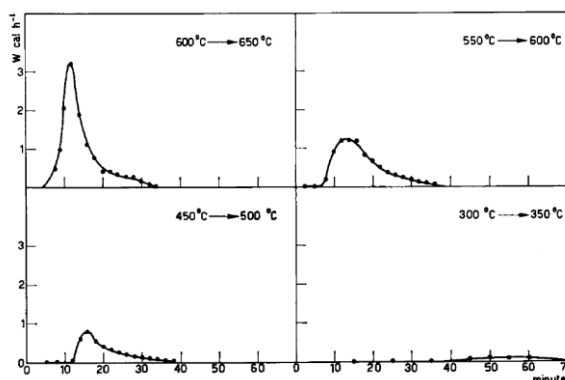


Рисунок 1.6 – Мощность, поглощаемая при образовании вакансий, связанных с нагревом, для четырех разных температур

Изучение охлаждения металлической мишени позволяет определить концентрацию радиационных дефектов, энергию активации их миграции и отжига. Однако этот метод не нашел дальнейшего развития, так как равновесная концентрация дефектов очень низкая и ошибка определения их параметров велика. Выявленное облучение радиационных дефектов дифференциальной сканирующей калориметрией [25] не позволяет проводить в реальном времени исследования быстрых процессов излучения.

Ионные пучки обеспечивают хорошо зарекомендовавший себя метод формирования радиационных дефектов в материалах. При энергии ионов менее 300 кэВ образование радиационных дефектов является основным механизмом его диссипации в металлической мишени [26]. Воздействие высокоэнергетических частиц приводит к тому, что материалы будут далеки от термодинамического равновесия [27]. Когда металлическая мишень облучается импульсным ионным пучком, легко измерить ее охлаждение [28,19], что позволяет нам в реальном времени идентифицировать основные механизмы, ответственные за миграцию и отжиг дефектов. Цель этой работы - использовать тепловизионную диагностику облученных мишеней для изучения быстрых радиационно-индуцированных процессов в металлах; тестирование этой диагностики на генераторе мощных ионных пучков, определение чувствительности и погрешности измерения параметров радиационно-индуцированных дефектов.

2 Установка для выполнения экспериментов и диагностическое оборудование

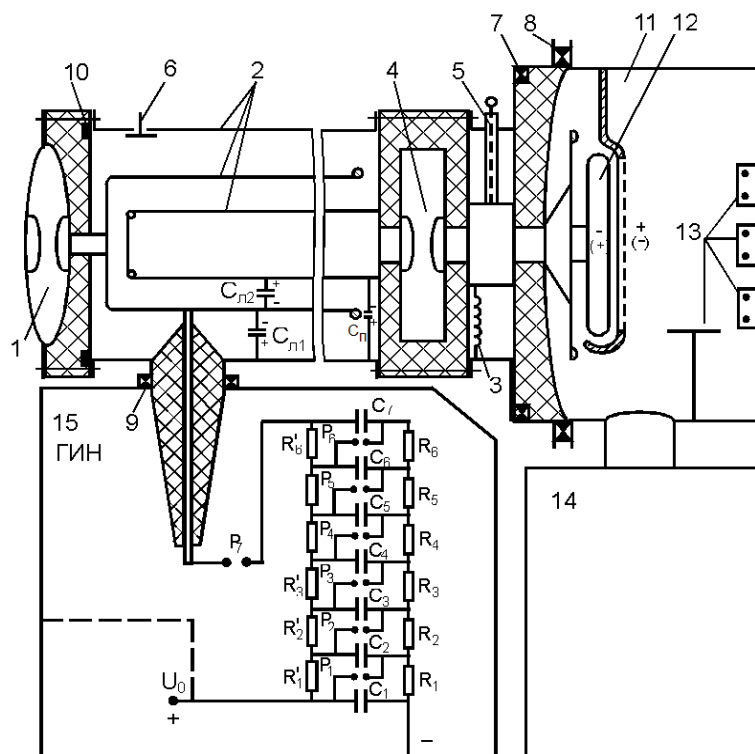
2.1 Экспериментальная установка ТЕМП – 4М

2.1.1 Импульсный ионный ускоритель ТЕМП – 4М принцип работы

Ионный ускоритель ТЕМП-4М [30,31] на котором была выполнена часть опытов и исследований, состоит из ГИН – емкостного накопителя, генератора наносекундных импульсов и вакуумного диода с магнитной самоизоляцией. Генератор наносекундных импульсов формирует биполярный высоковольтный импульс напряжения – первый отрицательный ((100-150) кВ, (400-500) нс) и второй положительный (150 нс, (250-300) кВ), частота следования импульсов (5- 10) имп./мин [31]. Первый (отрицательный) импульс используется для создания взрывоэмиссионной плазмы на катоде диода, в качестве которого применяется графит, а второй (положительный) импульс дает ускорение ионов из создавшейся на первом импульсе плазмы.

На рисунке 2.1 представлена рабочая схема установки. ГИН, составленный по схеме Аркадьева-Маркса, который состоит из восьми ступеней конденсаторов ИК100-0,4 (0,4 мкФ, 100 кВ).

Генератор импульсного напряжения соединен со средним электродом ДФЛ. Электрод диода, обеспечивающий заземление, соединен с корпусом ускорителя только, с одной стороны. Чтобы создать плазму высокой концентрацией ионов с высокой плотностью, нужного содержания диода на поверхности потенциального электрода применяют явление взрывной электронной эмиссии [30].



1, 4 – разрядники, 2 – ДФЛ, 3 – зарядная индуктивность ДФЛ, 5,6 – делители напряжения, 7÷10 – пояса Роговского, 11 – вакуумная камера, 12 – магнитоизолированный диод, 13 – узлы крепления облучаемой детали, 14 – вакуумный пост, 15 – генератор импульсных напряжений [33]

Рисунок 2.1 - Функциональная схема ускорителя ТЕМП-4М

На рисунке 2.2 представлена фотография ускорителя



Рисунок 2.2 - Фотоснимок ионного ускорителя ТЕМП – 4М

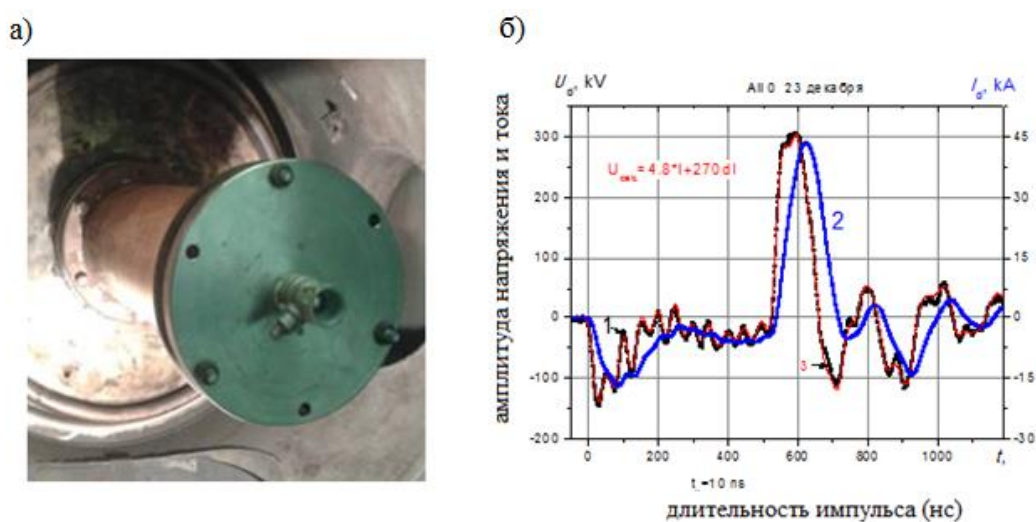
В двухимпульсном режиме ускоритель ТЕМП-4М работает таким образом. Емкость ($C_{л1}=16$ нФ) заряжается от генератора импульсного напряжения, которая образуется средними электродами ДФЛ и с корпусом ускорителя. Емкость электрода ДФЛ ($C_{л2}=14$ нФ) расположенного внутри по отношению к среднему электроду много больше ($C_{п}$) и паразитных емкостей внутреннего электрода ДФЛ по отношению к корпусу, следовательно, потенциал электрода внутреннего примерно равняется потенциалу среднего электрода. По возникновении пробивного напряжения на предварительном газовом разряднике происходит срабатывание емкости и ее зарядка ($C_{л2}$) между внутренним и средним электродами ДФЛ. Заряд емкостей осуществляется с помощью предварительного газового разрядника и диода. Импульс с отрицательным напряжением при этом формируется на диоде ((400-500) нс, (100-150) кВ). Взрывоэмиссионная плазма возникает в приповерхностном слое на первом импульсе потенциального электрода диода (катод). Напряжение пробоя главного разрядного устройства больше, чем у предварительного разрядного устройства, и через некоторую паузу возникает его пробой, контролируемый давлением газа в основной разрядной системе. Во время установления паузы, появляется еще одна дополнительная зарядка емкостей ($C_{л1}$) средней электродной системы относительно корпуса и ($C_{л2}$) внутреннего электрода ДФЛ. В итоге при возникновении пробоя основной системы газового разрядника возникает еще следующий повторный импульс напряжения, который уже положительной полярности ((250-300) кВ, 150 нс). И затем в течение второго импульса из взрывоэмиссионной плазмы создается ионный пучок, который далее ускоряется в А-К зазоре диода.

2.1.2 Диагностическое оборудование ускорителя ТЕМП – 4М

Выходное напряжение ГИН (то же зарядовое напряжение ДФЛ) было получено из комбинированного делителя напряжения, включенного в ДФЛ (рисунок 2.1 позиция б) с применением дифференциального делителя

напряжения [30]. На выходе ДФЛ (поз. 5 на рисунке 2.1) подсоединенным в переходной камере между ДФЛ и диодным узлом делителем напряжения измеряли напряжение. Поясами Роговского получали измерения по токам на выходе ГИН и ДФЛ [33]. Осциллографом Tektronix 2024В снимали электрические сигналы с датчиков ($5 \cdot 10^9$ отсч./с, 200 МГц). Погрешность данных синхронизаций при измерениях электрических сигналов не превышала значения 0,5 нс. Данные после калибровки диагностического оборудования ускорителя ТЕМП-4М, представлены в этой главе, по мере подключения его на ионный диод или на резистивную нагрузку с магнитной самоизоляцией [30].

Фотоснимок диодной камеры и результаты напряжения или тока на потенциальном электроде приведены на рисунке 2.3.



а) – фотоснимок диодной камеры с активной нагрузкой;

б) – Осциллограммы напряжения на потенциальном электроде (1, точки) и полного тока (2). Кривая 3 – расчетное напряжение

Рисунок 2.3 – Фотоснимок диодной камеры и результаты напряжения и тока на потенциальном электроде:

При настройке измерительного устройства, работающего под высоким напряжением нужно применять длинную трубку с водяным раствором, для того

что бы, не было пробоя по поверхности труб и в слоях жидкостей. Активное сопротивление нагрузки составило $(4,8 \pm 0,1)$ Ом, которое получали при переменном напряжении (50 Гц). Нужно так же считать самоиндукцию тока в нагрузке на высоких частотах, так как она является последовательным соединением индуктивностей и активных сопротивлений. Индуктивности резистивных нагрузок вычисляли по соотношениям для прямолинейных проводников круглого сечения на высоких частотах (без учета индуктивностей крепления) [32]:

$$L_1 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,42 \left(\ln \frac{4 \cdot 0,42}{0,11} - 1 \right) = 145 \text{ нГн}, \quad (2.1)$$

где μ_0 – постоянная магнитная;

l – длина;

d – диаметр

При вычислении величины L_1 условились, что $d=0,011$ м; $l=0,42$ м; $\mu_0=1,26$ мкГн/м.

Прикладываемое напряжение к нагрузке, (с учетом снижения напряжения на индуктивности) можно вычислить из данных по поясу Роговского по данной формуле:

$$U = R_n \cdot I_{np} + (L_1 + L_2) \frac{dI_{np}}{dt} \quad (2.2)$$

где R_n – сопротивление нагрузки (4,8 Ом);

L_1 – индуктивность нагрузки (145 нГн);

L_2 – индуктивность катододержателя (100 нГн)

Экспериментальные и расчетные данные напряжений представлены на рисунке 2.4. Эти данные сходятся в течение главного импульса напряжения и на после импульсах при $L_1=170$ нГн (индуктивность крепления и нагрузки) и $L_2=100$ нГн.

Экспериментальные показания напряжения и тока на выходе ГИН и расчетные данные напряжения показаны на рисунке 2.4.

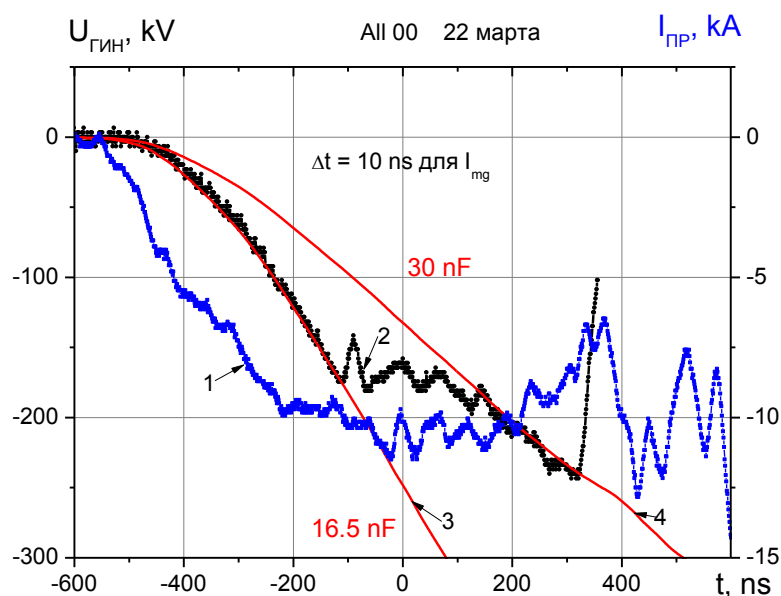
Напряжение ДФЛ зарядное, рассчитывали по представленной ниже формуле:

$$U_{\text{ГИН}} = \frac{1}{C} \int I_{\text{пр}} dt; \quad (2.3)$$

где $U_{\text{ГИН}}$ —зарядное напряжение ДФЛ;

C – геометрическая емкость ДФЛ, равная 16 нФ +14 нФ

$I_{\text{пр}}$ —зарядовый ток ДФЛ;

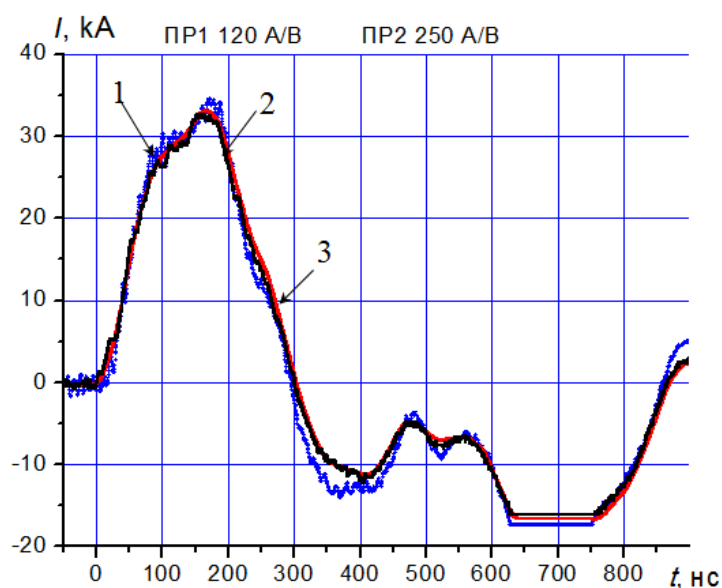


Осциллограммы напряжения(2) и тока (1) на выходе ГИНа и расчетные значения напряжения (3 – $C=16$ нФ, 4 – $C=30$ нФ).

Рисунок 2.4 – Значения напряжения и тока на выходе ГИН, полученные после экспериментов

Последовательная зарядка формирующих линий является особенностью работы ускорителя ТЕМП-4М в режиме создания сдвоенных импульсов. В течение начальных (300-500) нс, происходит заряд емкостей только между корпусом и средним электродом ДФЛ ($C_{л1}$ на рисунке 2.4), значения полученные при экспериментах напряжения совпадают с рассчитанными (кривая 3 на рисунке 2.4) при $C_{\text{ДФЛ}} = C_{л1} = 16$ нФ. Затем после возникновения пробоя предварительных газовых разрядников ($-100 < t < 300$) нс на рисунке 2.4)

происходит параллельный заряд двух формирующих линий - заряд емкостей среднего электрода ДФЛ относительно корпуса ускорителя ($C_{л1}$) и емкостей относительно внутреннего электрода ДФЛ ($C_{л2}$ на рисунке 2.4). Так же значения напряжения, полученные по экспериментам сходятся с рассчитанными (кривая 4) при $C_{ДФЛ} = C_{л1} + C_{л2} = 30$ нФ. Это свидетельствует о действительности показаний выходных параметров ГИН делителем напряжения и поясом Роговского. Низкоиндуктивный шунт сопротивлением 0,05 Ом поставили для калибровки пояса Роговского на выходе ДФЛ последовательно с активной нагрузкой. Осциллограммы сигналов с пояса Роговского и с низко индуктивного шунта показаны на рисунке 2.5, поставленных на выходе ДФЛ. Произведенная калибровка, дала хорошее совпадение, формы сигналов с двух датчиков тока ПР и ДН. По данным шунта найден коэффициент для пояса Роговского.



(1, 2) Ток на выходе ДФЛ и (3) напряжение

Рисунок 2.5 - осциллограммы сигналов с пояса Роговского, установленного на выходе ДФЛ, и с низкоиндуктивного шунта

При калибровке диагностического оборудования было видно, что оно правильно показывает работу ускорителя в работе на активную нагрузку

(4- 10) Ом (ускоряющее напряжение (250-300) кВ) и в режиме короткого замыкания. Точность измерений напряжения, полного тока диода, частотные характеристики диагностического оборудования позволяют рассчитать ионный и электронный ток с погрешностью не хуже 10%.

2.2 Экспериментальная установка ТЕМП – 6

Также эксперименты проводились на ионном ускорителе ТЕМП-6, работающем в двухимпульсном режиме [34]. Схема диодной камеры ускорителя и типичных сигналов показана на рисунке 2.6.

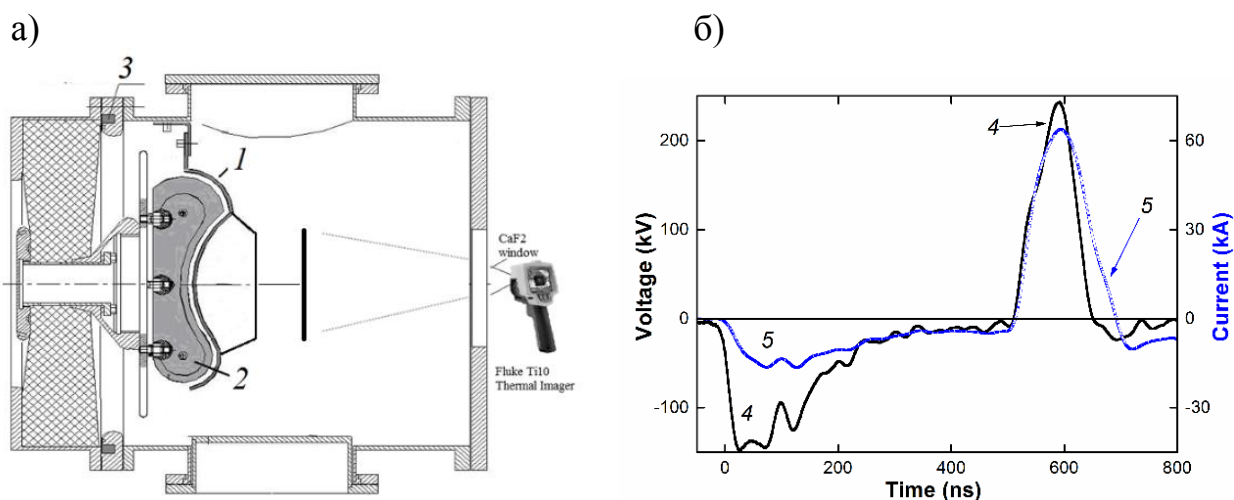


Рисунок 2.6 – а) схема диодного блока (1 - катод, 2 - анод, 3 - катушка Роговского), б) формы ускоряющего напряжения (4) и общий ток диода (5)

Аппарат в основном состоит из двух частей для генерации ионного пучка. Импульсно-энергетической системы генератора Маркса и двойной коаксиальной импульсно-формирующей линии и ионно-диодной системы ионного диода с магнитной самоизоляцией, установленного в вакуумной камере. Двухполярный импульс с магнитной самоизоляцией на ТЕМП-6 имеет первое отрицательное напряжение (150-200) кВ до 500 нс для формирования плазмы, за которым следует второй положительный из (200-250) кВ с длительностью 120 нс для ускорения ионов. Ионный диод в режиме магнитной самоизоляции образует ионный пучок, содержащий ионы углерода (80-90) % и протоны [35]. В случае,

когда плотность энергии ионного пучка (3-5) Дж/см² диапазон проникновения ионов С⁺ в стали составляет 0,3 мкм, а скорость образования точечного дефекта -(3-5) · 10⁶ dpa/s (пороговая энергия 20 эВ). Минимальное стандартное отклонение полной энергии и плотности энергии пучка не превышает 10% [36].

Исследование проводилось на мишенях, размеры которых были намного меньше, чем поперечные размеры ионного пучка. Диск из нержавеющей стали диаметром 10 мм и толщиной 0,1 мм был установлен в центральном отверстии большой мишени из нержавеющей стали и закреплен тонкой проволокой диаметром 0,1 мм, (см. Рисунок 2.7). Такая конструкция мишени позволяет обеспечить его равномерное нагревание во время облучения и почти исключить охлаждение за счет теплопроводности.

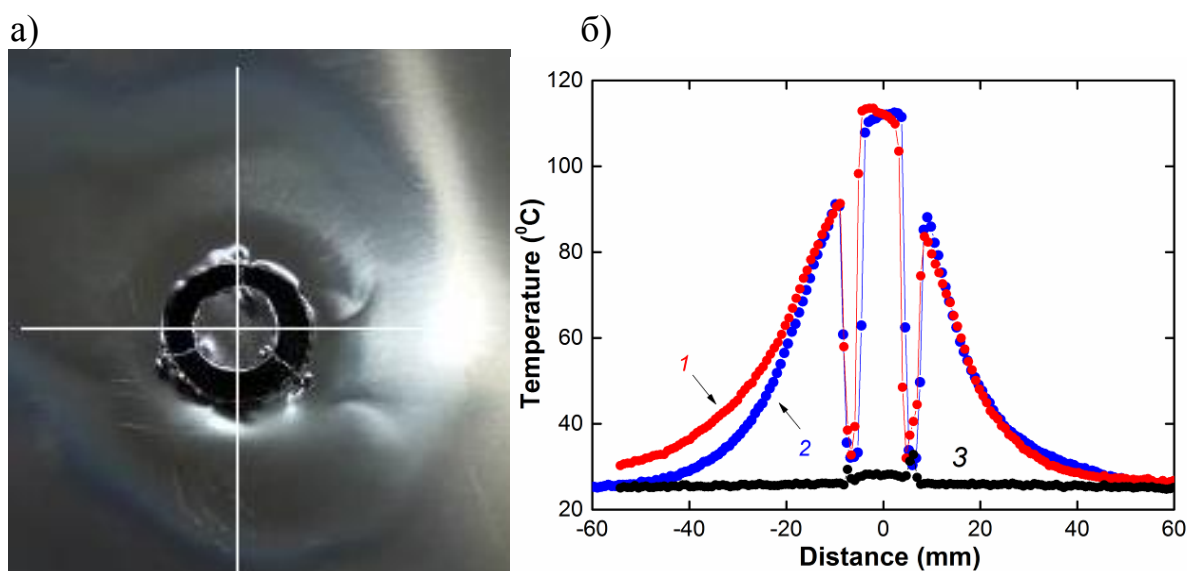


Рисунок 2.7 – а) фото мишени с центральным диском; б) распределение температур в горизонтальном (1) и вертикальном (2) поперечных сечениях, линия 3 - начальная температура объекта

Плотность энергии ионного пучка измерялась методом тепловизионной диагностики, описанной в [28], которая позволяет измерять плотность энергии мощного ионного пучка с пространственным разрешением (1-2) мм при высокой чувствительности (0,01-0,02) Дж/см². На рисунке 2.7 показаны результаты

тепловизионной диагностики, термограммы регистрировали через 0,1 с после облучения мощным ионным пучком.

Инфракрасные изображения были сделаны тепловизором Fluke Ti400 через окно из фторида бария (BaF_2), закрепленного на вакуумной камере (см. Рисунок 2.6). Поскольку BaF_2 имеет неполную передачу в спектральном диапазоне ИК-камеры (7-14) мкм, данные камеры были откалиброваны [28]. После нагрева передней стороны мишени ионным пучком мы измеряли температуру на ее задней стороне с помощью тепловизора, (см. Рисунок 2.6). Для мишени из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм время теплопередачи с передней поверхности на заднюю поверхность мишени составляет 1 мс [28, 37]. Тепловизор Fluke Ti400 обеспечивает регистрацию теплового изображения мишени в видеорежиме (шаг 100 мс) через 100 мс после генерации мощного ионного пучка с продолжительностью 120 нс. Поэтому передача тепла по глубине мишени не приводит к большой ошибке в измерении плотности энергии мощного ионного пучка с помощью ИК-диагностики.

3 Тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов

3.1 Охлаждение мишени из нержавеющей стали

При равномерном распределении температуры по глубине мишени объемная плотность тепловой энергии, поглощенной в мишени, равна:

$$J_{\text{exp}}(x, y, t) = c_v \cdot \rho \cdot [T(x, y, t) - T_0], \quad J / \text{cm}^3 \quad (3.1)$$

где c_v и ρ - удельная теплоемкость и плотность материала мишени соответственно; $T(x, y, t)$ - температура мишени; T_0 - начальная температура мишени, равная температуре стенок камеры диода.

Экспериментальные потери энергии в центральном диске мишени были рассчитаны путем дифференциации плотности тепловой энергии:

$$W_{\text{exp}}(t) = \left| \frac{d[S \cdot \Delta \cdot J_{\text{exp}}(t)]}{dt} \right| = S \cdot c_v \cdot \Delta \cdot \rho \left| \frac{dT_m(t)}{dt} \right|, \quad W \quad (3.2)$$

где S - площадь центральной мишени;

Δ - толщина мишени;

$T_m(t)$ - его средняя температура.

Для оценки охлаждения мишени из-за теплового излучения мы рассчитали мощность теплового потока с использованием экспериментальных значений температуры мишени. При этом необходимо учитывать тепловой поток как с передней, так и с задней стороны мишени, а также тепловой поток от стен диодной камеры. Плотность мощности теплового излучения по закону Стефана-Больцмана равна:

$$w_{\text{ir}}(x, y, t) = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot \sigma [T_m^4(t) - T_0^4], \quad W / \text{cm}^2 \quad (3.3)$$

где ε_1 и ε_2 - излучательная способность (степень черноты) передней и задней сторон мишени; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Мощность теплового излучения центрального диска была рассчитана с использованием уравнения (3.3):

$$W_{ir}(t) = S[(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot \sigma \cdot T_m^4(t) - 2\varepsilon_{ch} \cdot \sigma \cdot T_0^4], \quad W \quad (3.4)$$

Площадь мишени намного меньше площади стенок камеры диода, поэтому переизлучение от стен камеры можно считать пренебрежимо малым [38]. Степень черноты передней поверхности мишени из нержавеющей стали (сторона облучения ионным пучком) была взята 0,6 (неполированная нержавеющая сталь с эрозией после облучения ионным пучком), тогда как степень черноты задней поверхности мишени составляла 0,95, так как она покрыта матовой черной краской [28]. Для повышения точности расчета плотности мощности экспериментальные кривые температуры мишени были аппроксимированы полиномиальной функцией шестой степени; ошибка аппроксимации была меньше 1%.

Результаты расчетов по уравнению (3.2) и (3.4) показаны на рисунке 3.1. Начальная температура мишени составляла 22°C, удельную теплоемкость нержавеющей стали в расчетах брали 0,46 Дж/(г·К).

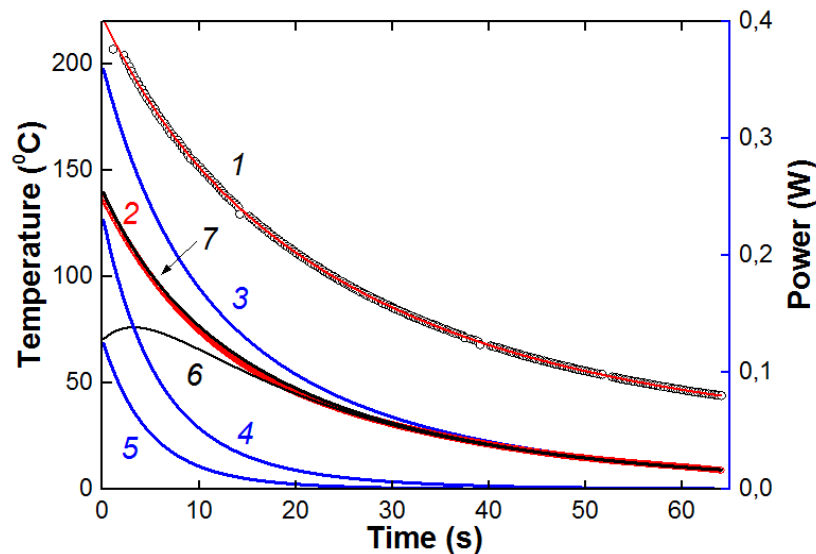


Рисунок 3.1 – Температура мишени (1), модуль экспериментальной мощности потерь энергии в мишени (2, точки), мощность теплового излучения от мишени (3). Расчетная мощность отжига радиационных дефектов (4), мощность миграции дефектов (5). Рассчитанные мощности потерь энергии в мишени с учетом теплового излучения и отжига дефектов (6); с учетом теплового излучения, отжига и миграции дефектов (7, линия)

Проведенные исследования показали, что в течение первых (35-40) с после облучения мощным ионным пучком экспериментальная мощность потерь энергии меньше мощности теплового излучения. Охлаждение мишени происходит медленнее, чем при охлаждении только тепловым излучением. Это указывает на то, что выделяется дополнительная энергия в мишени. В дальнейшем экспериментальная и расчетная мощности совпадают в пределах 10%, что подтверждает правильность расчета мощности теплового излучения и экспериментальной мощности потерь энергии. Ионный диод и мишень находились в вакуумной диодной камере при давлении 0,1 Па, поэтому конвективное охлаждение было незначительным.

3.2 Расчет мощности отжига радиационных дефектов

Мы предполагаем, что источником дополнительной энергии, выделяемой в мишени при охлаждении, может быть быстрый термический отжиг радиационных дефектов, образованных в мишени при облучении МИП. При энергии ионов менее 300 кэВ реализуется упругий (ядерный) механизм его торможения в мишени с образованием радиационных дефектов. Легкий ион, масса которого намного меньше массы атома мишени, формирует точечные дефекты (пары Френкеля), распределенные вдоль трека иона.

Выполненные исследования показали, что концентрация радиационных дефектов в мишени после облучения МИП не превышает 0.2% (что соответствует среднему расстоянию между дефектами более 15 межатомных расстояний материала мишени), поэтому процесс их аннигиляции можно рассматривать как реакцию первого порядка. Скорость такой реакции пропорциональна концентрации радиационных дефектов (закон действия масс):

$$\frac{dN_d}{dt} = -k(T) \cdot N_d ,$$

где k – константа скорости аннигиляции радиационных дефектов.

Тогда концентрация радиационных дефектов равна:

$$N_d(t) = N_{d0} \exp[-k(T) \cdot t],$$

где N_{d0} – исходная концентрация дефектов после облучения МИП.

Мощность энергии, которая выделяется при аннигиляции дефектов, равна:

$$W_{an}(t) = \varepsilon_d \frac{dN_d(t)}{dt} = -\varepsilon_d \cdot N_{d0} \cdot \exp(-k \cdot t) \cdot \frac{dk(T)}{dt} \quad (3.5)$$

где ε_d – энергия образования дефектов.

Константа скорости аннигиляции радиационных дефектов зависит от температуры мишени и уменьшается при ее охлаждении. Скорость ее изменения можно записать в виде:

$$\frac{dk(T)}{dt} = \frac{dk(T)}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = V_T \cdot \frac{dk(T)}{dT} \quad (3.6)$$

где $V_T(t)$ – скорость изменения температуры при охлаждении мишени.

Температурную зависимость константы скорости аннигиляции радиационных дефектов можно записать в форме уравнения Аррениуса [30]:

$$k(T) = A \exp(-\varepsilon_{an} / k_B T) \quad (3.7)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, характеризующий частоту столкновений аннигилирующих дефектов;

k_B — постоянная Больцмана;

ε_{an} – энергия активации аннигиляции дефектов.

Тогда из уравнений (3.5) - (3.7) получим:

$$\begin{aligned} \frac{dk(T)}{dT} &= \frac{A \cdot \varepsilon_{an}}{k_B T^2} \exp(-\varepsilon_{an} / k_B T), \\ \frac{dk(T)}{dt} &= \frac{A \cdot \varepsilon_{an} \cdot V_T}{k_B T^2} \exp(-\varepsilon_{an} / k_B T), \\ W_{an} &= -\frac{N_{d0} \cdot A \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_{an} \cdot V_T}{k_B T^2} [\exp(-\varepsilon_{an} / k_B T)] \cdot [\exp(-k \cdot t)]; \end{aligned} \quad (3.8)$$

где K_{an} – постоянная равная:

$$K_{an} = \frac{N_{d0} \cdot A \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_{an}}{k_B}, \quad J \cdot K \quad (3.9)$$

Расчетная мощность отжига радиационных дефектов может быть записана в виде:

$$W_{an}(t) = -\frac{K_{an} \cdot V_T}{T^2} [\exp(-\varepsilon_{an} / kT)] \cdot [\exp(-k \cdot t)], \quad W$$

При охлаждении мишени V_T меньше 0 и из соотношения (3.8) получим, что W_{an} больше 0, то есть при аннигиляции дефектов в мишени выделяется энергия.

Расчетная мощность потерь энергии в мишени с учетом теплового излучения и отжига дефектов равна:

$$W_{calc} = W_{ir} - W_{an} \quad ; \quad (3.10)$$

Расчетная мощность отжига радиационных дефектов (уравнение 3.8) и расчетная мощность потерь энергии в мишени (уравнение 3.10) показаны на рисунке 3.1. Расчет энергии аннигиляции радиационных дефектов (уравнение 3.8) выполнен при ε_{an} равна 0.30 эВ и A равен 1, что соответствует условию аннигиляции дефектов при каждом столкновении вакансии и междоузельного атома.

Для более точного определения энергии активации отжига радиационных дефектов расчетные (3.8) и экспериментальные значения мощности отжига радиационных дефектов показаны в шкале Аррениуса ($\log(W) = f(1000/T)$), рисунок 3.2.

Экспериментальная мощность отжига радиационных дефектов рассчитывалась как:

$$W_{an}^{exp} = W_{ir} - W_{exp} \quad , \quad (3.11)$$

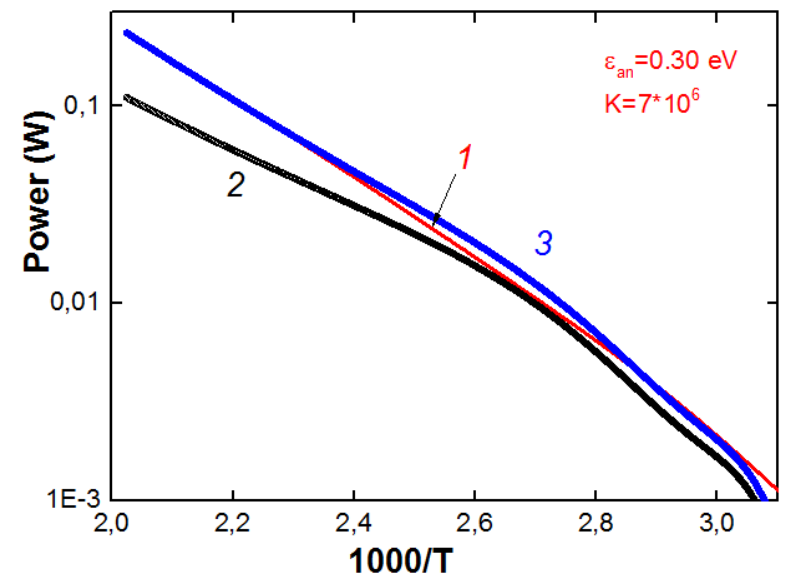


Рисунок 3.2 – Графики Аррениуса расчетной (1) и экспериментальной мощности отжига радиационно-индуцированных дефектов без (2) и с учетом (3) миграции дефектов в мишени

После первых 15-20 с охлаждение небольшой мишени удовлетворительно описывается двумя процессами - потери тепловой энергии в мишени из-за радиационного охлаждения и выделение энергии из-за быстрого термического отжига радиационных дефектов. Отжиг радиационных дефектов в мишени из нержавеющей стали описывается моделью отжига точечных дефектов с энергией активации 0,3 эВ и $K_{an} = (7-13) \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{K}$. При высокой температуре (больше 100°C на рисунке 3.1) рассчитанные значения мощности отжига радиационно-индуцированных дефектов превышают экспериментальные значения, что можно объяснить дополнительным потреблением энергии в мишени. Эта энергия составляет (10-15) % энергии теплового излучения мишени за время ее охлаждения.

3.3 Охлаждение мишеней из меди, латуни и титана

Следующая часть исследования была выполнена на медных, латунных и титановых мишенях, размеры которых были намного меньше поперечных размеров МИП. Диск диаметром 9,7 мм и толщиной 100 мкм (Cu), 75 мкм

(латунь) и 50 мкм (Ti) был установлен в центральном отверстии большой мишени из нержавеющей стали и закреплен проводами 0,1 мм в диаметре, (рисунок 3.3).

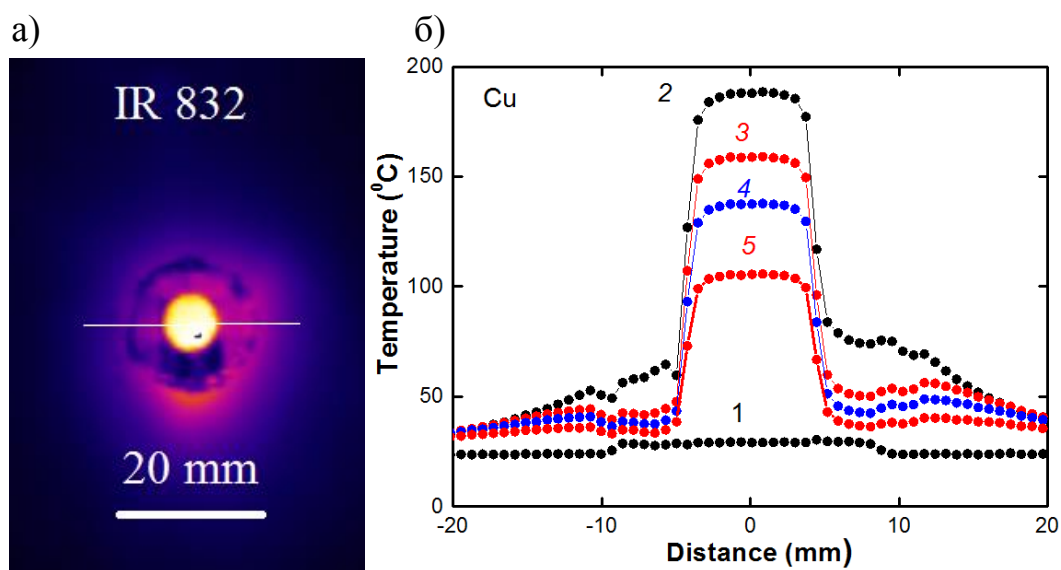


Рисунок 3.3 – а) инфракрасное изображение мишени с центральным диском из меди; б) распределение температуры в горизонтальном направлении до (1) и 0,2 (2), 5 (3), 10 (4) и 20 с (5) после облучения МИП

Результаты расчета экспериментальной мощности потерь тепловой энергии в медных, латунных и титановых мишенях (уравнение 3.2) и мощности теплового излучения от этих мишеней (уравнение 3.4) показаны на рисунке 3.4. Удельная теплоемкость меди 0,385 Дж/(г·К), латуни 0,38 Дж/(г·К) и титана 0,527 Дж/(г·К). Излучение передней поверхности мишени (сторона излучения пучка) принималось 0,6 (не отполировано); излучательная способность задней поверхности мишени составляла 0,95, поскольку она была распылена тонким слоем матовой черной краски.

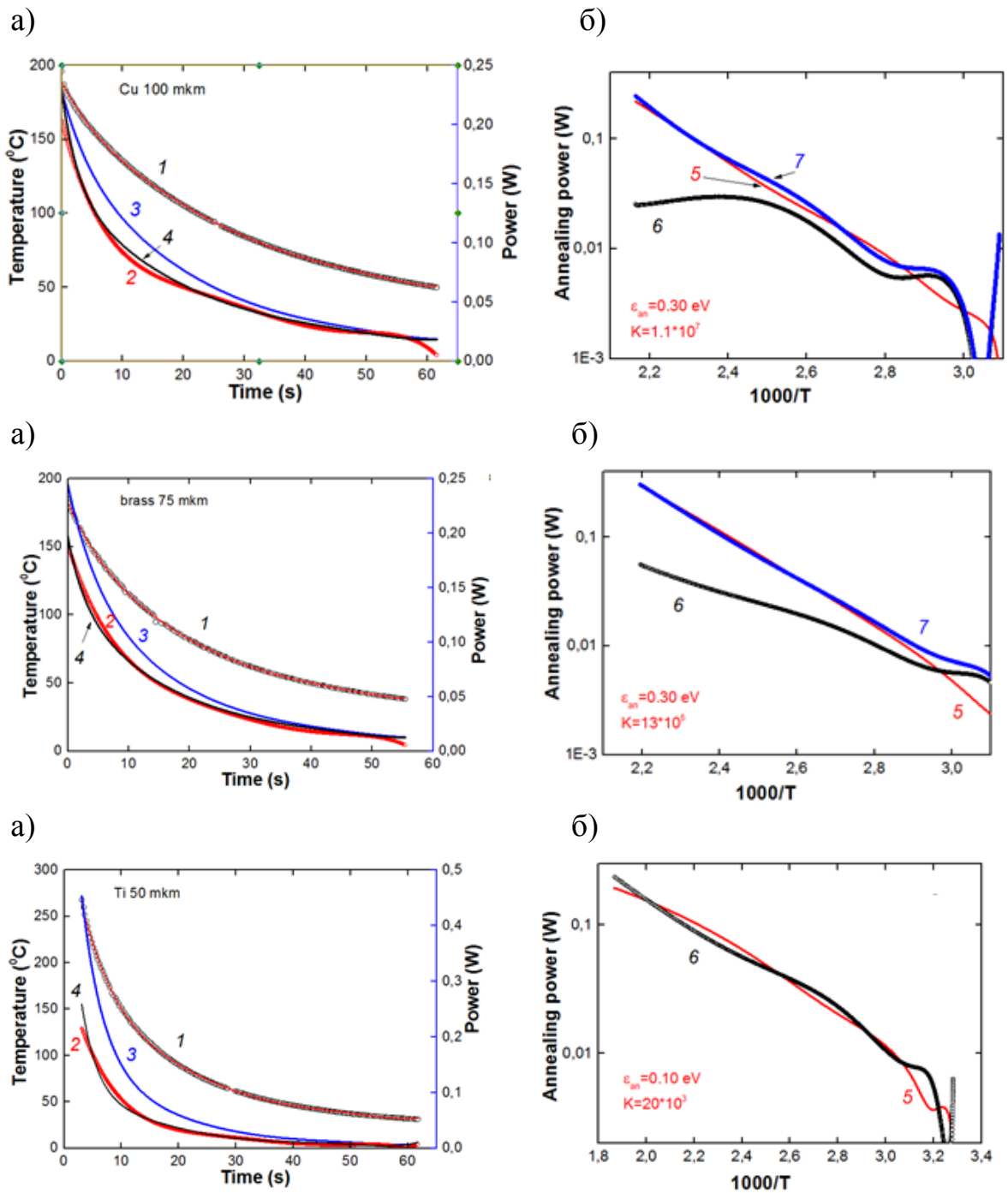


Рисунок 3.4 – Температура мишени (1), экспериментальная мощность потерь энергии в мишени (2, точки), мощность теплового излучения мишени (3), расчетная мощность потерь энергии в мишени, с учетом теплового излучения, отжига и миграция дефектов (4, линия). Расчетная (5) и экспериментальная мощность отжига радиационно-индуцированных дефектов без учета (6) и с учетом (7, точки) миграции дефектов. Охлаждение мишеней (а) и графики Аррениуса (б)

Проведенные исследования показали, что охлаждение медных, латунных и титановых мишеней (с размерами, меньшими, чем диаметр МИП) происходит медленнее, чем при охлаждении тепловым излучением, экспериментальная мощность потерь энергии меньше мощности теплового излучения. Это можно объяснить механизмом, который включает в себя выделение дополнительной энергии в мишени при быстром термическом отжиге радиационных дефектов, образованных в мишени при облучении МИП. На рисунке 3.4 показан расчет мощности потерь энергии в этих мишенях с учетом отжига радиационных дефектов и радиационного охлаждения (уравнение 3.7). Мощность отжига радиационных дефектов рассчитывали по формуле (3.5).

Как и у мишени из нержавеющей стали, в начальный момент после облучения МИП экспериментальная мощность потерь энергии в медных, латунных и титановых мишенях превышает расчетные значения, полученные с учетом теплового излучения и отжига радиационных дефектов. Позже экспериментальная и расчетная мощность совпадают в пределах 10%. Отжиг радиационных дефектов в титановой мишени описывается моделью, которая учитывает отжиг точечных дефектов с энергией активации 0,1 эВ и K_{ap} равно $(4-6) \cdot 10^3$. Для медной мишени энергия активации составляла 0,30 эВ, а K_{ap} равно $(4-8) \cdot 10^4$.

3.4 Анализ миграции вакансий

В начальный момент после облучения МИП (t меньше 15 с, см. Рисунок 3.1) экспериментальная мощность потерь энергии в мишенях превышает расчетные значения, полученные с учетом теплового излучения мишени и отжига радиационных дефектов. Это можно объяснить дополнительным потреблением энергии в мишени из-за миграции вакансий при высокой температуре. Из соотношения Аррениуса мощность затрат тепловой энергии в мишени на миграцию вакансий равно:

$$E_m(T) = N_m \cdot \varepsilon_m \exp(-\varepsilon_m / kT);$$

где N_m - количество вакансий в мишени вблизи точки плавления;

ε_m - энергия активации ее миграции.

Мощность затрат энергии на миграцию вакансий (модуль) равна:

$$W_m(t) = \frac{dE_m}{dt} = \frac{dE_m}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{N_m \cdot \varepsilon_m^2 \cdot V_T}{k \cdot T^2} [\exp(-\varepsilon_m / kT)];$$

Мощность миграции вакансий (модуль) может быть записана как

$$W_m(t) = \frac{K_m \cdot V_T}{T^2} \exp(-\varepsilon_m / kT), \quad (3.12)$$

где K_m равно:

$$K_m = \frac{N_m \cdot \varepsilon_m^2}{k}, \quad J \cdot K$$

Экспериментальная мощность затрат энергии на миграцию вакансий равна:

$$W_m^{\text{exp}}(t) = W_{\text{exp}} - W_{ir} + W_{an}; \quad (3.13)$$

Расчетные (3.12) и экспериментальные (3.13) значения мощности затрат энергии на миграцию вакансий в малых мишенях показаны на рисунке 2.7.

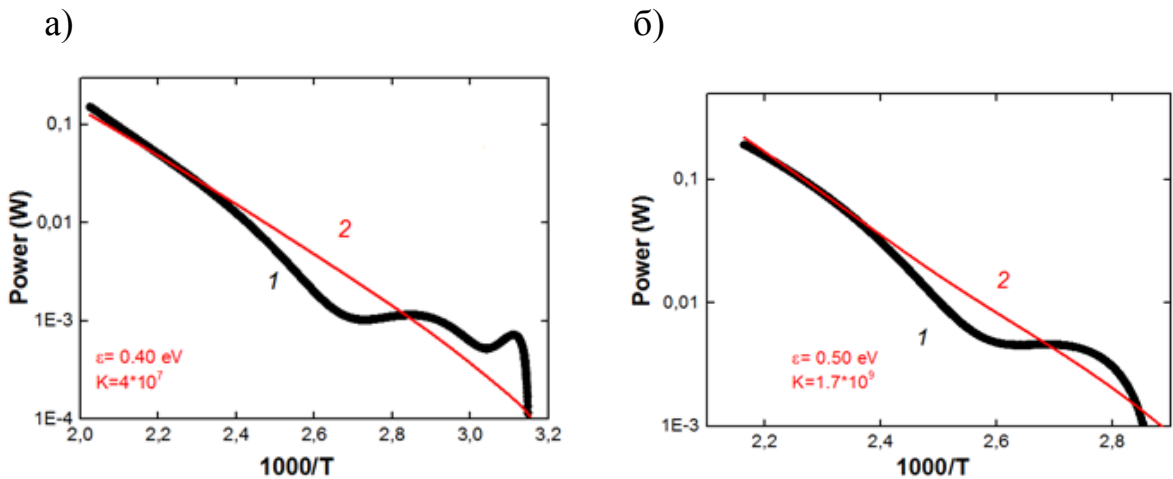


Рисунок 3.5 – Графики Аррениуса экспериментальной (1, точки) и рассчитанной (2, линии) мощности миграции вакансий в нержавеющей стали (а) и меди (б)

Мощность потерь энергии в мишени, рассчитанная с учетом теплового излучения, отжига дефектов и миграции вакансий в нержавеющей стали, медной, латунной и титановой мишенях, показана на рисунке 3.1 и на рисунке 3.4. Расчет выполнен по соотношению:

$$W_{calc2} = W_{ir} - W_{an} + W_m ;$$

Экспериментальная мощность отжига радиационных дефектов, учитывая миграцию дефектов (рисунок 3.4б), была рассчитана как

$$W_{an}^{exp2} = W_{ir} - W_{exp} + W_m ; \quad (3.14)$$

Выполненные исследования показали, что энергия, затрачиваемая на миграцию вакансий (в течение охлаждения мишени после облучения ионным пучком) составляет (60-70) % энергии аннигиляции радиационных дефектов в этой мишени, (рисунок 3.6).

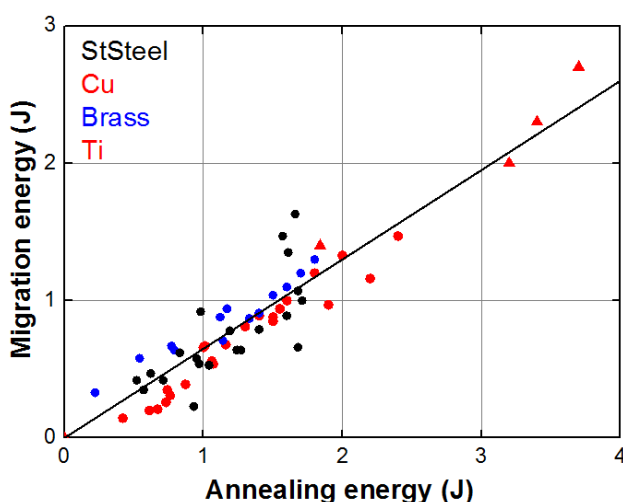


Рисунок 3.6 – Зависимость энергии, затрачиваемой на миграцию вакансий, от энергии аннигиляции дефектов

Энергию аннигиляции радиационных дефектов рассчитывали интегрированием мощности их аннигиляции (уравнение 3.8), а энергию миграции рассчитывали путем интегрирования мощности миграции, (уравнение 3.12)

Выполненные исследования показали, что при высокой температуре мишени в начальные (3-5) с после воздействия ионного пучка мощность затрат энергии на миграцию вакансий может превышать экспериментальную мощность потерь энергии в мишени, (рисунок 3.7).

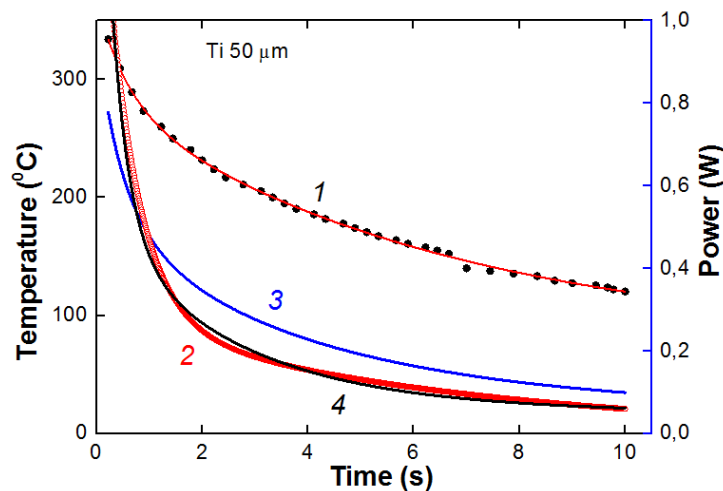


Рисунок 3.7 – Температура титановой мишени (1), экспериментальная мощность потерь энергии в мишени (2, точки), мощность теплового излучения мишени (3), рассчитанная мощность потерь энергии в мишени, принимая во внимание тепловое излучение, отжиг и миграцию дефектов (4, линия).

Миграция вакансий в мишени из нержавеющей стали описывается моделью миграции точечных дефектов с пороговой энергией активации $(1,4 \pm 0,2)$ эВ и $K_T = (0,9-9) \cdot 10^{21}$ Дж·К (при различной плотности энергии МИП). Для титановой мишени энергия активации составляла $(0,3 \pm 0,1)$ эВ и $K_T = (1-4) \cdot 10^6$ Дж·К. Для медной мишени энергия активации составляла $(1,4 \pm 0,2)$ эВ и $K_T = (2-4) \cdot 10^{20}$ Дж·К. Полученные экспериментальные данные не противоречат результатам других исследований. В случае $h\nu > T_i$ (T меньше 1150 К) рассчитана энергия миграции вакансий $(0,4-0,52)$ эВ [39]. Для меди пороговая энергия активации миграции вакансий составляет $(0,7-1,0)$ эВ, для железа $(1,2-1,3)$ эВ [40].

В равновесных условиях миграция вакансий, как и междоузельных атомов, не потребляет тепловую энергию мишени, так как каждая вакансия

совершает ряд перемещений между различными равноэнергетичными положениями в решетке. Только миграция вакансии с выходом на поверхность мишени приводит к затратам энергии. Нами получено, что увеличение толщины мишени значительно сокращает потребление тепловой энергии в начальный период времени после облучения ионным пучком, (рисунок 3.8)

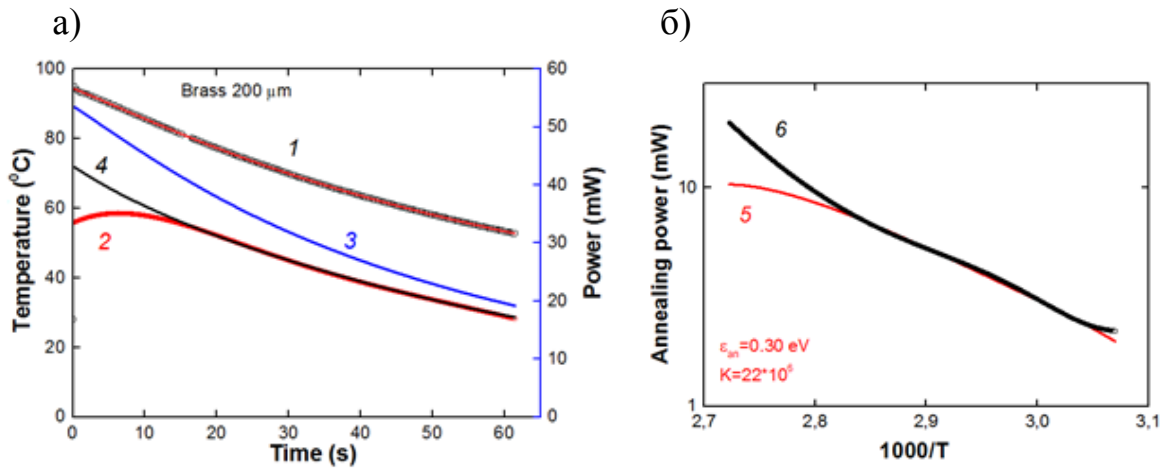


Рисунок 3.8 – Температура латунной мишени толщиной 200 мкм (1), экспериментальная мощность потерь энергии в мишени (2, точки), мощность теплового излучения мишени (3), расчетная мощность потерь энергии в мишени, учитывая тепловое излучение и отжиг дефектов (4, линия). Расчетная (5) и экспериментальная (6) мощность отжига радиационно-индуцированных дефектов без учета миграции дефектов. Охлаждение мишени (а) и графики Аррениуса (б)

3.5 Концентрация радиационных дефектов

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитать концентрацию междоузельных атомов после облучения МИП. Предполагая, что энергия, выделяемая при быстром термическом отжиге одного междоузельного атома, равна пороговой энергии смещения атома ионом, концентрация дефектов равна:

$$n_i = \frac{100E_{an}}{\varepsilon_d \cdot N_0}, \quad \% \quad (3.15)$$

Энергия аннигиляции междоузельных атомов в мишени $E_{ан}$ может быть рассчитана путем интегрирования мощности отжига радиационных дефектов (уравнение 3.5). На рисунке 3.9 показаны результаты расчета концентрации междоузельных атомов при ε_d равной 20 эВ. В случае упругого столкновения ускоренных ионов с атомами мишени (за короткое время, сравнимое с периодом тепловых колебаний атомов) пороговая энергия смещения атомов, больше, чем в равновесных условиях. Эксперименты и теоретические оценки показывают, что ε_d равна (10-30) эВ [40]. При термической генерации дефектов эта энергия составляет несколько эВ [39].

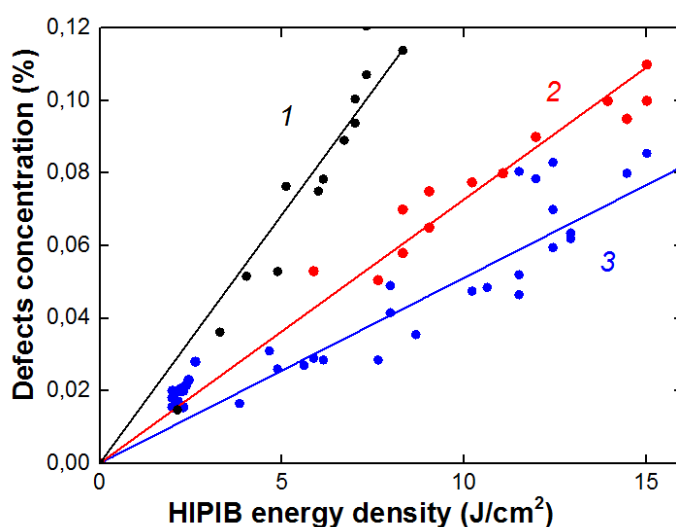


Рисунок 3.9 – Зависимость средней концентрации междоузельных атомов в латунных (1), медных (2) и нержавеющей стали (3) мишенях от плотности энергии МИП

Полученные экспериментальные данные также позволяют рассчитать концентрацию вакансий:

$$n_v = \frac{100E_m}{\varepsilon_m \cdot N_0}, \quad \% \quad (3.16)$$

Тепловая энергия в мишени, потребляемая для миграции вакансий E_m , может быть рассчитана путем интегрирования экспериментальной энергии миграции в мишени (уравнение 3.12). В мишени из нержавеющей стали тепловая

энергия, потребляемая для миграции вакансий, составляет (12-30) мДж (для данных рисунок 3.1), пороговая энергия активации миграции вакансий в железе составляет (1,2-1,4) эВ [1] (рисунок 3.2), это соответствует концентрации вакансий (0,01-0,025) %. В медной мишени E_m равна (50-80) мДж, ϵ_m равна 1,4 эВ в меди (рисунок 3.4), и концентрация вакансий составляет (0,03-0,05) %.

Проведенные исследования показали, что концентрация вакансий в образцах из нержавеющей стали и меди равна концентрации промежуточных атомов (рисунок 3.9). Это указывает на отсутствие образования промежуточных кластеров из нержавеющей стали и меди при температуре ниже 150 °С в течение 30 с после облучения МИП. Концентрация дефектов, индуцированных ионным излучением в мишени из нержавеющей стали, превышает равновесную концентрацию точечных дефектов железа в 100-200 раз [39].

В титановой мишени тепловая энергия, потребляемая для миграции вакансий, составляет 210 мДж (для данных, приведенных на рисунке 3.4b), она соответствует концентрации вакансий 2,2% (при ϵ_m равной 0,3 эВ, см. рисунок 3.5), что значительно превышает концентрацию междоузельных атомов (см. рисунок 3.9). Это может быть связано с неоднократными миграциями одной вакансии (в среднем 20 миграций), что не рассматривается в уравнении (3.14) или с эффективным образованием междоузельных кластеров. Аналитическое исследование, основанное на упругой модели, показало, что энергия активации для миграции из междоузлия в железе незначительно увеличивается с увеличением размера кластера [41].

3.6 Перемещение междоузельных атомов до аннигиляции

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитать среднее количество перемещений междоузельных атомов до аннигиляции. Соотношение (3.5) было получено при условии, что каждое смещение междоузельного атома сопровождается аннигиляцией. Однако количество смещений дефектов вплоть

до аннигиляции при их низкой концентрации (0,15%, см. рисунок 3.9) может быть большим. В этом случае уравнение (3.6) можно записать в виде:

$$K_{an} = \frac{N_{an} \cdot D_{an} \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_{an}}{k} = \frac{E_{an} \cdot D_{an} \cdot \varepsilon_{an}}{k},$$

где N_{an} - количество аннигиляций;

D_{an} - среднее количество перемещений междоузельных атомов до аннигиляции.

Энергия аннигиляции радиационных дефектов в мишени за определенный промежуток времени равна произведению величины аннигиляции на энергию, выделяющуюся при аннигиляции одного междоузельного атома. Тогда средняя величина смещения:

$$D_{an} = \frac{k \cdot K_{an}}{\varepsilon_{an} \cdot E_{an}} \quad (3.17)$$

Результаты расчетов с использованием уравнения (3.17) при пороговой энергии активации для отжига радиационных дефектов 0,30 эВ (нержавеющая сталь и медь) показаны на рисунке 3.10.

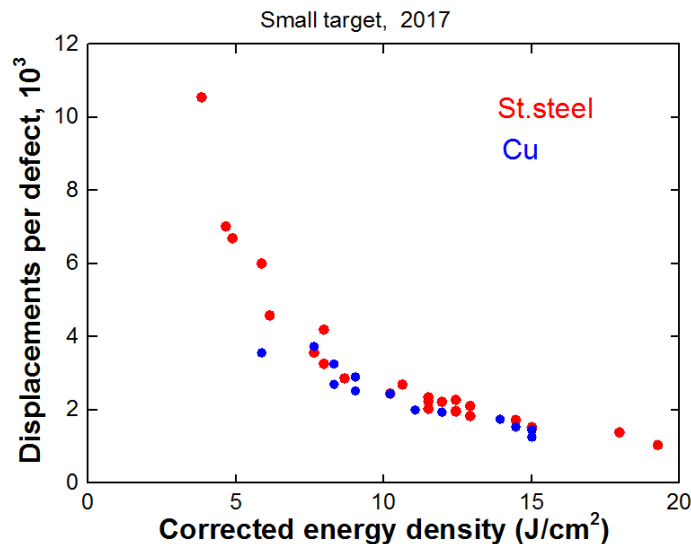


Рисунок 3.10 – Зависимость среднего количества перемещений междоузельных атомов перед аннигиляцией в мишенях из нержавеющей стали и меди от плотности энергии МИП

В равновесных условиях смещения из междоузельного атома (самодиффузия) не потребляют тепловую энергию мишени, так как каждый диффундирующий атом совершает ряд скачков между различными равноэнергетичными положениями в решетке.

Проведенный анализ аннигиляции радиационных дефектов в мишенях из нержавеющей стали и меди показал, что каждый междоузельный атом выполняет более 50 перемещений перед аннигиляцией. По мере увеличения плотности энергии МИП концентрация радиационных дефектов в мишени возрастает (см. рисунок 3.9) и количество их перемещений до аннигиляции уменьшается, так как вероятность ее столкновения с вакансией возрастает. Концентрация дефектов, индуцированных ионным излучением в титановой мишени, превосходит концентрацию из нержавеющей стали и меди, поэтому среднее количество перемещений междоузельных атомов до аннигиляции в титановой мишени невелико.

Полученные экспериментальные данные позволяют также рассчитать среднее количество перемещений вакансий до образования поверхностных дефектов. Соотношение (3.9) было получено при условии, что каждое смещение вакансии сопровождается образованием поверхностных дефектов. Однако количество смещений дефектов при их низкой концентрации (0,15%, см. рисунок 3.9) может быть большим. В этом случае уравнение (3.9) можно записать в виде:

$$K_m = \frac{N_m \cdot D_m \cdot \varepsilon_m^2}{k} = \frac{E_m \cdot D_m \cdot \varepsilon_m}{k};$$

где N_m - количество актов образования поверхностных дефектов;

D_m - среднее количество перемещений вакансий до образования поверхностного дефекта.

Тогда средняя величина смещения вакансии:

$$D_m = \frac{k \cdot K_m}{\varepsilon_m \cdot E_m}$$

Тепловую энергию в мишени, поглощенную за счет миграции вакансий, рассчитывали интегрированием мощности миграции вакансий, уравнение (3.9).

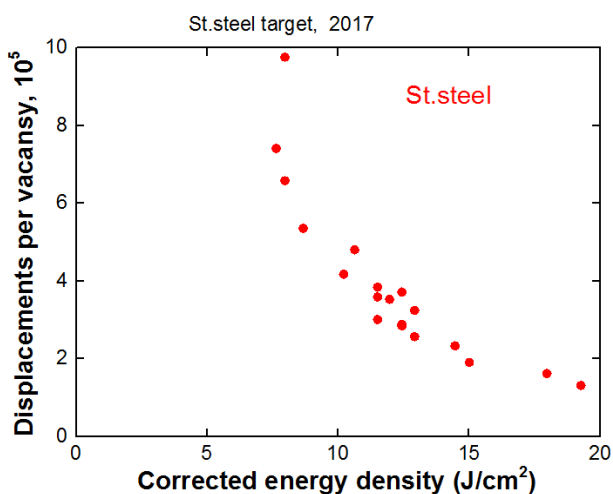


Рисунок 3.11 – Зависимость среднего количества смещений вакансий в мишенях из нержавеющей стали от плотности энергии МИП

3.7 Анализ результатов исследования

Кривые охлаждения для различных мишеней после облучения МИП были проанализированы с использованием модели, которая включает в себя эффекты радиационного охлаждения, отжига и миграции радиационных дефектов, образовавшихся в мишени при облучении МИП. Полученные экспериментальные данные не противоречат результатам других исследований. Пороговая энергия миграции вакансий значительно превышает пороговую энергию миграции междоузельных атомов [42]. Образование пар Френкеля является основным механизмом, ответственным за образование радиационных дефектов в мишени при облучении МИП, и их быстрый термический отжиг происходит, когда междоузельные атомы мигрируют в мишени. В работе [43] изучено влияние электронного облучения с энергией (1,0-2,3) МэВ на структурно-фазовую стабильность аустенитных, хромоникелевых и хромомарганцевых нержавеющей сталей. Показано, что при электронном облучении со скоростью смещения около 10^{-8} dpa/s мелких кластеров атомов (со

средней величиной $\sim 60 \text{ \AA}$) встречаются в нержавеющей стали SS316L и EP838. Эти кластеры можно увидеть с помощью малоуглового рентгеновского рассеяния и электронной микроскопии. Процесс их образования подвергается термической активации и сопровождается ростом удельного электрического сопротивления. Энергия активации этого процесса была определена как 0,30 эВ и 0,33 эВ для сталей EP838 и SS316L соответственно. Энергия активации термического старения в этих сталях составляет 0,53 эВ и 0,59 эВ соответственно. Энергия активации для миграции составляет (0,05-0,10) эВ для самоперестраиваемых атомов и ее кластеров разного размера в железе [44,45]. Другое аналитическое исследование, основанное на упругой модели, показало, что энергия активации миграции междоузельных кластеров в железе монотонно возрастает с увеличением размера кластера. Выше определенного критического размера кластер мигрирует с постоянной энергией активации около 0,10 эВ [1]. Энергия активации для миграции самопересекающихся атомов в меди составляет 0,08 эВ [12]. В случае hcp Ti (T меньше 1150 К) расчеты предсказывают энергию активации самопересекающихся атомов при миграции 0,07 эВ [46].

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В течение первых 60 с после облучения МИП динамика охлаждения малых мишеней из нержавеющей стали, титана и меди (размер мишеней меньше диаметра ионного пучка) удовлетворительно описывается двумя процессами потери тепловой энергии в мишени из-за радиационного охлаждения и выделение энергии из-за быстрого термического отжига радиационных дефектов. Энергия активации, необходимая для отжига дефектов (междоузельных атомов) в мишенях из нержавеющей стали и меди, составляет 0,10 эВ, в титановой мишени составляет 0,05 эВ, ее концентрация варьируется от 0,01 до 0,15%. Энергия, выделяемая в малых мишенях при отжиге междоузельных атомов, изменяется от 22% (нержавеющая сталь) до 70% (Ti) исходной тепловой энергии в этой мишени после облучения МИП.

2. В начальный момент после облучения МИП (t меньше 15с) экспериментальная мощность потерь энергии в мишени превышает рассчитанную с учетом теплового излучения от мишени и радиационного отжига дефектов в мишени. Это можно объяснить дополнительным потреблением энергии в мишени из-за миграции вакансий при высокой температуре. Позже экспериментальная и расчетная мощность совпадают в пределах 10%. Тепловая энергия в мишени, затрачиваемая на миграцию вакансий, составляет (1,8-2,5) % от экспериментальных потерь энергии в мишени из нержавеющей стали при охлаждении, в меди (4-5) %, в титановой мишени 15%. Концентрация вакансий в образцах из нержавеющей стали и меди равна концентрации межузельных атомов.

3. Исследование охлаждения мишени после облучения МИП позволяет определить основные характеристики радиационных дефектов (тип дефектов и их концентрацию, пороговую энергию для миграции, смещения на дефект до аннигиляции) сразу после мощного облучения.

4. Время для выравнивания температуры по толщине металлической мишени 0,1 мм не превышает 1 мс, поэтому тепловизионная диагностика позволяет исследовать быстро протекающие процессы миграции и отжига радиационных дефектов в реальном времени после облучения МИП с временным разрешением 1 мс.

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

Студенту:

Группа		ФИО	
4ТМ61		Бондаренко Юрий Станиславович	
Школа	Новых производственных технологий	ООП	Техника и физика высоких напряжений
Уровень образования	Магистратура	Направление	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Приблизительная стоимость ресурсов научного проекта, составляет около 230 тыс. руб.</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Налоги рассчитать по упрощенной системе налогообложения, ставку дисконтирования принять равной 0,1, Отчисления по страховым взносам – 30% от ФОТ</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТП</i>	<i>Определение концепции проекта, факторов микро- и макросреды, анализ рынка продукта, экспертная оценка эффективности, SWOT-анализ</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Не разрабатывается</i>
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Планирование научно-технического проекта</i>
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Определение ресурсной.финансовой, социальной и экономической эффективности исследования</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение социально-гуманитарных наук, доцент	Старикова Екатерина Васильевна	к.филос.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бондаренко Юрий Станиславович		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Данный раздел посвящен определению экономического эффекта по разработке тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов, в том числе формирования точечных радиационно-индуцированных дефектов с высокой концентрацией, на ионном ускорителе ТЕМП-6, в качестве экспериментальной установки.

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности научно-технического проекта.

Задачи раздела:

- осуществить анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения
- выполнить комплексный SWOT - анализ научно-исследовательского проекта.
- планирование комплекса работ на создание проекта
- выполнить оценку коммерческого и инновационного потенциала
- произвести инициацию проекта

4.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-технического исследования

Научный проект осуществляется для исследования радиационной стойкости металлов. Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию радиационной стойкости металлов с помощью тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов в металлах при их облучении МИП. Эксперименты проводились на ионном ускорителе ТЕМП-6. Научная значимость исследования заключается в том, что для применения материалов с высокой радиационной стойкостью при использовании их в новых технологиях

(освоение космического пространства, развитие атомной промышленности, исследование термоядерного синтеза) необходим оперативный метод исследования радиационной стойкости материалов.

Потенциальными потребителями данного научно-технического исследования являются сотрудники научно-исследовательских институтов, заводы изготавливающие конструкции для аппаратов используемых в космическом пространстве, научно-исследовательские лаборатории, занимающиеся исследованием термоядерного синтеза и компании занимающиеся атомной промышленностью.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка

		Отрасли, занимающиеся исследованием быстрых радиационных процессов в металлах			
		Научные институты	Заводы-изготовители космических аппаратов	Научно-исследовательские лаборатории	Компании, занимающиеся атомной промышленностью
Сфера деятельности быстрых радиационных процессов в металлах	Облучение металлов	x	x	x	x
	Использование ускорителей ионных частиц	x		x	
	Освоение тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов	x		x	
	Анализ быстрых радиационных процессов облученных металлов	x		x	
	Продажа результатов исследований	x		x	
	Использование металлов с радиационной стойкостью в промышленных целях		x		x

Как видно из карты сегментирования, основным сегментом данного рынка являются научные институты и научно-исследовательские лаборатории, которые выполняют почти весь цикл работ, связанных с радиационными процессами в металлах. Исследования, проводимые в данной выпускной работе, являются инициативными в рамках научно-исследовательской работы для лаборатории №1 ТПУ совместно с Даляньским технологическим университетом, Китай.

4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- 1 технические характеристики разработки;
- 2 конкурентоспособность разработки;
- 3 уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- 4 бюджет разработки;
- 5 уровень проникновения на рынок;
- 6 финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом [47]:

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (4.1)$$

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

a^i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 1).

$$I_{p-исп1} = 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 = 3,7$$

$$I_{p-исп2} = 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 = 2,8$$

$$I_{p-исп3} = 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 = 3,2$$

$$I_{p-исп4} = 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 = 2,3$$

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 4.2. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырёх конкурентных товаров и разработок [48].

Таблица 4.2 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес категории	баллы		конкурентоспособность	
		Бф	Бк	Кф	Кк
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1 Повышение производительности труда пользователя	0,2	4	3	4	3
2 Предоставляемые возможности	0,2	3	2	3	2
3 Надежность	0,3	4	3	3	2
4 Простота измерения	0,2	4	3	3	2
5 Энергосбережение	0,1	3	3	3	3
Итого	1	3,7	2,8	3,2	2,3
Экономические критерии оценки эффективности					
1 Конкурентоспособность продукта	0,2	3	2	4	3
2 Цена	0,3	3	3	3	3
3 Уровень проникновения на рынок	0,1	3	4	3	4
4 Предположительный срок эксплуатации	0,4	4	3	4	3
Итого	1	3,4	2,9	3,6	3,1

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 4.2, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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

Анализ показал, что как технические, так и экономические критерии данного проекта на нынешний момент развития могут заинтересовать потенциальных покупателей, среди которых научные исследовательские институты, технические ВУЗы и узконаправленные компании. Так же получилось определить критерии, которые нуждаются в дальнейшей проработке для наилучшего внедрения на рынок.

4.3 SWOT-анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT – анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [47].

Для того что бы найти сильные и слабые стороны данной работы произведем метод приближенного определения методов-конкурентов выполним SWOT–анализ.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Относительная простота использования С2. Новая методика диагностики быстрых радиационных процессов при охлаждении мишени после воздействия МИП. С3. Проведение экспериментов на готовом лабораторном стенде С4. Максимальная информативность исследований С5. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Большие габариты используемого оборудования Сл2. Дороговизна использования такого вида облучения металлов Сл3. Создается интенсивное радиационное излучение Сл4. Возможность доработки Сл5. Не разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p>	<p>Ключевыми сильными сторонами и возможностями являются высокая точность и надежность данного метода</p>	<p>Использование инновационной инфраструктуры ТПУ позволило осуществить данную работу вместе с сотрудниками работающими в</p>

<p>В2. Публикации актуальных статей в научных журналах В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p>	<p>исследования, так как используется инновационное современное оборудование, для проведения опытов, создающее радиационные нагрузки, схожие с реальными, которым подвергаются металлы в условия интенсивного радиационного излучения. Также имеется квалифицированный персонал способный работать с данным оборудованием.</p>	<p>лаборатории, но наиболее важными слабыми сторонами является то, что данная установка имеет большие размеры, в том числе и комплектующих ее деталей, что требует большого помещения, и также такой вид облучения металлов требует экономических затрат, так как создаются большие энергетические нагрузки, и также необходимы серьезные меры по борьбе с излучением, которое может оказывать неблагоприятный эффект как на само оборудование, так и на персонал.</p>
<p>Угрозы У1.Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Возможность создания новой, более улучшенной методики У3.Развитая конкуренция технологий и методов обработки и исследования в данной области работы У4. Отсутствие квалифицированных кадров в данной области исследований</p>	<p>Не смотря на достоинства данной методики исследования, так же есть и угрозы которые связаны с отсутствием спроса в других научных центрах мира, так как всегда есть здоровая конкуренция между другими учеными, которые так же способны изобрести новые варианты и способы решения данной задачи.</p>	<p>Довольно серьезной угрозой для данной методики исследования является то, что на данный момент существует большое количество различных компьютерных программ, которые могут моделировать различные физические процессы, в том числе и проводимые в рамках данного исследования. Таким образом методика данного научно-исследовательского проекта будет не актуальна, но компьютерные программы на данный момент не способны максимально корректно реализовать те функции, которые необходимы для получения результата, поэтому исследования в данной области еще выполняются.</p>

Таким образом, SWOT-анализа показал, что самой важной угрозой для проекта является развитая конкуренция технологий и методов исследований быстрых радиационных процессов в металлах, так как это может привести к созданию более новой усовершенствованной методики, которая может обойти значительную часть слабых сторон данного научно-исследовательского проекта, что может сделать не актуальной методику проводимых в проекте исследований. Очень важной угрозой для данного проекта является отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров в данной области исследований.

4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	2
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	1
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	3
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	3
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	3
13	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
	Итого баллов	31	34

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (4.2)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Оценили степень научной разработки ее готовность к коммерциализации и выяснили уровень собственных знаний для ее завершения. Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 44 до 30 – то перспективность средняя. По данной теме работы еще есть возможность и различные способы ее усовершенствования, которые позволили бы довести перспективность до высокого уровня. Но данный этап развития данной методики, позволяет на сегодняшний день, выполнять все поставленные перед ней задачи.

4.4 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать, и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1) Цели и результат проекта

В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представить в таблице 4.5

Таблица 4.5 – Результат проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
НИИ ТПУ Лаборатория №1 и Даляньский технологический университет, Китай	Принять в реализацию и использование обновленную и более усовершенствованную методику для практических расчетов

В таблице 4.6 необходимо представить информацию об иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 4.6 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Использовать тепловизионную диагностику быстрых радиационных процессов после облучения МИП, и исследовать радиационную стойкость металлов. В области ресурсоэффективности и ресурсосбережения данная методика оказалась более эффективной
Ожидаемые результаты проекта:	Применить данную методику для расчетов, полученных при экспериментах образцов, в результате работа должна быть более-менее затратной по времени
Требования к результату проекта:	Требование:
	Подготовить доклад и сделать литературный обзор по теме тепловизионной диагностики быстрых радиационных процессов в металлах.
	По данной методике должны быть рассчитаны не менее 30 термограмм для каждого металла.
	Оформлен отчет по расчету термограмм.
	В отчете должны быть приведены все необходимые таблицы и графики
	В отчете необходимо предоставить выводы по работе

2) Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции
1	Пушкарев Александр Иванович, отделение материаловедения, профессор	Руководитель НИП (Научный руководитель)	Предоставление заданий; проведение экспериментов, консультации; обсуждение результатов, диссертации
2	Бондаренко Юрий Станиславович НИ ТПУ, магистрант группы 4ТМ61	Исполнитель НИП (Магистрант)	Проведение экспериментов обработка экспериментов, выполнение расчетов, написание ВКР

В ходе реализации научного проекта, помимо магистранта, задействован ряд специалистов:

- 1 руководитель проекта – отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта. В большинстве случаев эту роль выполняет руководитель магистерской диссертации.
- 2 заказчик проекта – участник проекта, формирующий цели проекта, ограничения проекта по срокам и затратам (бюджету). Он осуществляет укрупненный анализ проектов по показателям сроков, освоению затрат и финансированию. В магистерских научных проектах присутствует заказчик проекта в случае, если работа выполняется в рамках хозяйственного договора, по заказу предприятия, по гранту.
- 3 эксперт проекта – специалист, обладающий компетенциями (специальными знаниями и опытом), которых нет у участников рабочей группы проекта и руководителя проекта. В магистерской работе эту роль выполняют консультанты.

4 исполнитель по проекту – специалист, выполняющий отдельные работы по проекту. В случае, если магистерская работа является законченным научным исследованием – исполнителем проекта является магистрант. В случае если магистерская работа является частью научного проекта, исполнителей может быть несколько.

5 субподрядчики – организации, привлекаемые на договорных началах для выполнения отдельных работ проекта.

3) Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта.

Таблица 4.8 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	230000 тыс.руб.
3.1.1. Источник финансирования	НИИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	2017
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	
3.2.2. Дата завершения проекта	2018

4.5 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат: основная заработная плата; отчисления во внебюджетные фонды; расходы на электроэнергию; накладные расходы, затраты на научные командировки.

4.5.1 Расчет основной заработной платы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

Данные для расчета [49]:

1) Оклад: научного руководителя – 23100 руб. (рк), научно-технического работника – 2400 руб. (рк).

2) Плановый фонд рабочего времени за месяц – 176 часов (22 дня);

3) Дополнительная заработная плата.

4) Районный коэффициент (1,3).

Часовая тарифная ставка ($C_{\text{ч}}$) определяется:

$$C_{\text{ч}} = \frac{\text{Оклад}}{\Phi_{\text{рв}}} \quad (4.3)$$

где $\Phi_{\text{рв}}$ – плановый фонд рабочего времени за месяц у научно-технического работника, из расчета 22 рабочих дня по 8 часов.

Определяем заработную плату за час для научно-технического работника:

$$C_{\text{ч}} = \frac{2400}{176} = 13,63 \text{ руб. в час}$$

Основная заработная плата научно-технического работника за месяц составит:

$$ЗП_{\text{осн}} = C_{\text{ч}} \cdot t \quad (4.4)$$

$$ЗП_{\text{осн}} = 13,63 \cdot (22 \cdot 8) = 12,5 \cdot 176 = 2400 \text{ руб}$$

Дополнительная заработная плата:

$$ЗП_{\text{доп}} = \frac{ЗП_{\text{осн}} \cdot 15}{100} \quad (4.5)$$

$$ЗП_{\text{доп}} = \frac{2400 \cdot 15}{100} = 360 \text{руб}$$

Итого затраты на оплату труда:

$$З_{\text{общ}} = ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}} \quad (4.6)$$

$$З_{\text{общ}} = 2400 + 360 = 2760 \text{руб}$$

Теперь рассчитаем заработную плату научного руководителя:

Часовая тарифная ставка ($C_{\text{ч}}$):

$$C_{\text{ч}} = \frac{23100}{176} = 131,25 \text{руб. в час}$$

где $\Phi_{\text{рв}}$ – плановый фонд рабочего времени за месяц у руководителя, из расчета 22 рабочих дня по 8 часов.

Основная заработная плата за проект у руководителя составит:

$$З_{\text{осн}} = 131,25 \cdot (22 \cdot 8) = 23100 \text{руб};$$

Дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = \frac{23100 \cdot 15}{100} = 3465 \text{руб}$$

Итого затраты на оплату труда:

$$З_{\text{общ1}} = 23100 + 3465 = 26565 \text{руб.}$$

Тогда, общая сумма заработных плат составит (таблица 4.9):

$$З_{\text{общ}} = 26565 + 2760 = 29325 \text{руб.}$$

Таблица 4.9 – Расчета заработной платы участников проекта

Исполнитель	Оклад (руб.)	Часовая тарифная ставка (руб./час.)	Основная заработная плата (руб.)	Дополнительная заработная плата (руб.)
Руководитель	23100	131,25	23100	3465
Студен – дипломник	2400	13,63	2400	360
Итого				29325 руб.

4.5.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.7)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату и включает в себя:

- 1) отчисления в пенсионный фонд;
- 2) на социальное страхование;
- 3) на медицинское страхование.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 29325 = 8797,5 \text{ руб.}$$

4.5.3 Затраты электроэнергии

Затраты на электроэнергию в денежном выражении рассчитывается по формуле (30) и представлены в таблице 4.10

$$C_{\text{эл}} = W_{\text{сил эн}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (4.8)$$

где $C_{\text{эл}}$ – стоимость одного кВт·часа электроэнергии;

$C_{\text{э}}$ - одноставочный тариф на потребляемую электроэнергию составляет 4,6 руб/кВт·ч для ТПУ.

Таблица 4.10 – Затраты электроэнергии

Наименование статьи	Затраты электроэнергии, кВт·ч.	Тариф электроэнергии, руб/кВт·ч	Затраты на электроэнергию, руб.
Монтажные работы	50	4,6	230
Пуско-наладочные работы	10	4,6	46
Освещение рабочего места	160	4,6	736
Использование диагностического оборудования	85	4,6	391
Итого			1403

4.5.4 Затраты на научные командировки

Затраты на научные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов. Так как исследования, проводимые в данной выпускной работе, выполняются в рамках научно-исследовательской работы для лаборатории №1 ТПУ совместно с Даляньским технологическим университетом, Китай, то часть научных экспериментов проводились в Китае в городе Далянь, для их выполнения научный руководитель выезжал в научную командировку в Китай город Далянь, при этом было выполнено две командировки каждая сроком на месяц, на которые были финансовые затраты:

- Суточные расходы на пребывание в командировки 30 суток (2 командировки):

$$C_{\text{сут.ком.}} = 500 \cdot 60 = 30000, \text{руб.} \quad (4.9)$$

- Затраты на арендную плату за пользование жилым имуществом 20 000 руб. за месяц, в итоге 40 000 руб. т.к. две командировки.
- Затраты на транспортные расходы, в качестве транспорта был использован самолет, за две командировки вышло 100 тыс. руб.

В итоге на научные командировки было затрачено 170 тыс. руб.

4.5.5 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере (70-90) % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют (80-100) % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.10)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,7 \cdot 29325 = 20527,5 \text{ руб}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ по форме, приведенной в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчет бюджета затрат НТИ

№	Наименование статьи	Сумма, руб.
1	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	29325
2	Отчисления во внебюджетные фонды	8797,5
3	Накладные расходы	20527,5
4	Затраты электроэнергии	1403
5	Затраты на научные командировки	170000
6	Бюджет затрат НТИ	230000

Выводы по разделу

Все поставленные задачи в разделе выполнены:

- 1 выполнен анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- 2 выполнен комплексный SWOT - анализ научно-исследовательского проекта;
- 3 выполнил оценку коммерческого и инновационного потенциала
- 4 произвел инициацию проекта;

- 5 выполнил анализ и оценку научно-технического уровня проекта и определил, что данный проект имеет среднюю значимость теоретического и практического уровня;
- 6 был выполнен расчет суммарный затрат на выполнение научных исследований по данному проекту, в итоге бюджет проекта составил 230 тыс.руб., основные затраты были связаны с научными командировками.

Подводя итоги по оценке исследуемой методики для изучения радиационной стойкости металлов в условиях интенсивной радиационной нагрузки, по критериям ресурсоэффективности и ресурсосбережению, следует отметить, что по всем показателям и критериям данная методика вполне актуальна для применения в учебно-исследовательских и лабораторных целях. Следует отметить важность для проекта в целом проведенных в данной главе исследований, которые позволили объективно оценить эффективность проводимых научно-технических исследований.

Также, следует отметить, что данная работа удовлетворяет всем потребностям и выполняет все конкретно поставленные цели. К внутренним и внешним заинтересованным сторонам проекта, которые будут взаимодействовать, и влиять на общий результат научного проекта относятся научные сотрудники, студенты лаборатории, которым предстоит работать над усовершенствованием методики.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 4ТМ61	ФИО Бондаренко Юрий Станиславович
-----------------	--------------------------------------

Школа	Новых производственных технологий	ООП	Техника и физика высоких напряжений
Уровень образования	Магистратура	Направление	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является методика, которая используется в данной работе, а именно тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов. Рабочая зона – лаборатория № 1 ТПУ, в которой расположен ускоритель ТЕМП-4М. Тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов применяется в научных институтах и в исследовательских лабораториях и позволяет исследовать радиационную стойкость материалов (металлов), которые в дальнейшем можно применять в новых технологиях.</p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); 	<p>1. Анализ вредных факторов производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Повышенный уровень шума на рабочем месте Уровень шума на рабочем месте составляет около 75 дБА, Уровень шума и звукового давления согласно нормативным документам не должен превышать 65 дБА. Для защиты во время работы персонал находится в пультовой отделенной от шумного оборудования металлической дверью, где уровень шума снижается до допустимой нормы, также у каждого работника имеются наушники для снижения воздействия шума на организм. - Недостаточная освещенность на рабочем месте Освещенность рабочего места соответствует нормам согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, что обеспечивается использованием искусственного освещения. - Повышенный уровень электромагнитного излучения Энергетическая экспозиция излучения в диапазоне частот 30 кГц – 3 МГц согласно СанПиН 2.2.4.1191-03: ЭЭЕ=4800 (В/м)²· ч, по ПДУ ЭЭЕ =20000 (В/м)²· ч. ЭЭн=320 (В/м)²· ч, по ПДУ ЭЭЕ =200 (А/м)²· ч. Для защиты персонал во время работы находится в пультовой за закрытой металлической дверью, также используют экранирование от источников излучения. - Неблагоприятные условия микроклимата Выполняемая работа относится к средней тяжести работ (категория IIa), согласно СанПиН 2.2.4.548-96 для данной категории работ в теплый сезон года температура воздуха в помещении – (19-21) °С, относительная влажность воздуха – (40-60) %, скорость движения воздуха не превышает 0,2 м/сек, а в холодный сезон года температура воздуха в помещении – (17-19) °С, относительная влажность воздуха – (40-60) %, скорость
--	---

	<p>движения воздуха не превышает 0,2 м/сек Температура в рабочей зоне поддерживается отоплением в холодный период и системой вентиляции в теплый период.</p> <p>2. Анализ опасных факторов производственной среды:</p> <p>- Источник термической опасности</p> <p>При выполнении данной работы имеется один очаг термической опасности – печь паромасляного насоса для откачки камеры с ионным диодом. Температура печи при работе может достигать от (200-300) °С, данная температура опасна при соприкосновении и может привести к ожогам и ошпариванию мягкой ткани человека.</p> <p>При необходимости соприкосновения с печью для выполнения каких-либо работ, печи изначально дают остыть, проверяя температуру тепловизором, после остывания до допустимых значений температуры, приступают к выполнению работы.</p> <p>- Повышенный уровень ионизирующих излучений</p> <p>Радиационная защита ускорителей выполняется так, чтобы обеспечить суммарную дозу облучения для персонала и населения не превышающую 20 мЗв в год для персонала группы А, и 5 мЗв в год для персонала группы Б, и 1 мЗв в год для населения. Все эти данные регламентируются документом НРБ-99/2009. Также следует учитывать время, в течении которого ускоритель будет работать с коэффициентом запас равным 2. Расчет радиационной защиты производится с помощью СанПин 2.6.1.2573-10.</p> <p>При проведении экспериментов в комнате, где располагается ускоритель, доза радиации не превышает 5 мкЗв в час (120 мЗв в год при 1700 рабочих часах). Во избежание облучения при работе используется средство коллективной защиты: защищенное место от воздействия радиационного излучения, где рабочий персонал находится в пультовой, отделенной от установки толстой бетонной стеной и металлической дверью, не пропускающих рентгеновское тормозное излучение, в которой доза радиации не превышает 1 мЗв в час.</p> <p>- Ток и высокое напряжение</p> <p>При работе установки достигается величина силы тока 45 кА и величина напряжения 300 кВ, что является опасным для человека, поэтому для защиты персонала используются различные меры и средства: выполняется изоляция всех токоведущих частей, также выполняется недоступность токоведущих частей, и изоляция электрических частей от земли, также используют выравнивание потенциалов, защитное заземление, защитное отключение и средства индивидуальной защиты.</p> <p>- Статическое электричество</p> <p>Основной опасностью при электризации различных материалов является возможность возникновения искрового разряда, как с диэлектрической наэлектризованной поверхности, так и с изолированного проводящего объекта.</p> <p>Для предупреждения образования статического электричества на элементах металлических конструкций, трубопроводах разного назначения, расположенных на расстоянии менее 10 см параллельно</p>
--	---

	друг друга, применяются замкнутые контуры, создаваемые с помощью устанавливаемых между ними металлических заземленных перемычек через каждые 20 м и менее.
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>В лаборатории в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли материалов мишеней (металлов) после облучения на ускорителе. Для их удаления используют вытяжную вентиляцию, а для снижения выбросов этих веществ в атмосферу использует фильтры. Данный фильтр обеспечит задержку частиц меньше 0.1 микрона и защитит окружающую среду от радиоактивной пыли и аэрозольных примесей. В результате исследований, наличие отходов не планируется, поэтому выполняемая работа не оказывает воздействие на гидросферу и литосферу.</p> <p>Экологическая безопасность отражена в документе СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ".</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Возможные ЧС на объекте: короткое замыкание электропроводки, возгорание оборудования.</p> <p>В качестве типичной чрезвычайной ситуации рассматривается пожар.</p> <p>Превентивные меры по предупреждению возгораний: проверка персонала на предмет знаний пожарной безопасности, выполнение работ в соответствии с правилами, плановый осмотр установок, следить за состоянием электрической проводки.</p> <p>При возгорании в срочном порядке необходимо сообщить о пожаре по телефону 01, дать сигнал тревоги, отключить все электроустановки, принять меры по эвакуации людей. В срочном порядке покинуть помещение. При возможности приступить к устранению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Правовые и организационные вопросы изложены в документе СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ". Основные положения и требования регламентируются данным документом.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение контроля и диагностики, профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	Д-р биол. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бондаренко Юрий Станиславович		

5 Социальная ответственность

Введение

Представлена тепловизионная диагностика быстрых радиационных процессов в металлах после их облучения мощными ионными пучками (МИП) на ускорителе ТЕМП-4М. Цель работы – использовать тепловизионную диагностику быстрых радиационных процессов в металлах. Облучение мишеней из металлов осуществлялось на ускорителе ТЕМП-4М, в режиме формирования двух импульсов – первый, плазмообразующий – отрицательный ((300-500) нс, (100-150) кВ) и второй, генерирующий – положительный (150 нс, (250-300 кВ)). Состав пучка: ионы углерода (85%) и протоны, плотность энергии (0,2-3) Дж/см² (для разных диодов). Данная тепловизионная диагностика была использована при исследовании МИП, формируемого ионным диодом с внешней магнитной изоляцией в одноимпульсном режиме. Показано, что вклад высокоэнергетичных электронов и взрывоэмиссионной плазмы в нагрев мишени не превышает (0,05- 0,08) Дж/см². Диагностика позволяет измерять с высокой плотностью энергии пучка при отсутствии процессов эрозии и абляции на мишени. При использовании тепловизора с матрицей 140×160 пикселей пространственное разрешение составляет 0,9 мм. Время записи охлаждения мишеней после облучения МИП составляет (60-70) с. Исследование проводилось на объектах, размеры которых были намного меньше, чем поперечные размеры ионного пучка. Металлический диск (маленькая мишень) диаметром 10 мм и толщиной 0,1 мм был установлен в центральном отверстии большой металлической мишени и закреплен тонкой проволокой диаметром 0,1 мм. Такая конструкция мишени позволяет обеспечить его равномерное нагревание во время облучения и почти исключить токопроводящее охлаждение.

В данном разделе рассмотрим экологичность и безопасность научно-исследовательской работы, которая была проведена в лаборатории «№1» ТПУ.

Характеристика рабочей зоны и рабочего места:

Рабочие место это пультовая в которой расположено оборудование для управления и диагностики ускорителя ТЕМП-4М, также часть работ производится на персональном компьютере, который расположен в кабинете, поэтому еще одним рабочим местом является рабочий кабинет. Рабочей зоной является помещение лаборатории, в котором находится ускоритель ТЕМП-4М. Установка состоит из генератора импульсных напряжений (источник высокого напряжения), двойной формирующей линии, камеры с откачивающими форвакуумными насосами и дополнительными системами водоподготовки.

5.1 Производственная безопасность

Для выбора факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [50].

Таблица 5.1 - Опасные и вредные факторы при выполнении работ по облучению металлов МИП на ускорителе ионных частиц.

Источник фактора, наименование работ	Факторы по «ГОСТ 12.0.003-74		Нормативные документы
	Опасные	Вредные	
1. Установка тепловизора <i>Fluki Ti400</i> в лаборатории с ускорителем 2. Облучение металлической мишени на ускорителе ТЕМП-4М; 3. Видеозапись на тепловизор охлаждения мишени по облучения. 4. Диагностика процесса охлаждения мишени, используя персональный компьютер.	1. Источник термической опасности; 2. Повышенный уровень ионизирующих излучений 3. Высокое напряжение 4. Статическое электричество	1. Повышенный уровень шума; 2. Недостаточная освещенность на рабочем мете; 3. Повышенный уровень электромагнитного излучения; 4. Неблагоприятные условия микроклимата	1. ГОСТ 12.1.003 - 83* «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности»; 2. Нормы искусственного освещения устанавливаются СП 52.13330.2011; 3. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях» 4. ГОСТ 12.1.045-84 «ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля» 5. СанПиН 2.2.4.548-96 устанавливает гигиенические требования к микроклимату производственных помещений; 6. СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ". 7. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 устанавливает гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы;

5.1.1 Анализ вредных факторов производственной среды

Рассмотрены следующие вредные факторы:

- 1 повышенный уровень шума;
- 2 недостаточное освещение на рабочем месте;
- 3 повышенный уровень электромагнитного излучения;
- 4 неблагоприятные условия микроклимата.

Повышенный уровень шума

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются, форвакуумные и криогенные насосы, вытяжка, генератор импульсного напряжения.

Шум оказывает на организм человека неблагоприятное воздействие и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе тугоухость и глухоту. Длительное воздействие шума оказывает вредное влияние на ЦНС и психику человека. В результате воздействия шума у человека появляются симптомы переутомления и истощения нервной системы. Со стороны психики наблюдается подавленное настроение, понижение внимания, задерживаются интеллектуальные процессы, повышается нервная возбудимость. Шум снижает работоспособность и производительность труда. При выполнении экспериментов в лаборатории по тематике ВКР уровень шума составляет около 75 дБА. Для обеспечения гигиенической нормы шума при выполнении экспериментов в лабораториях необходимо пользоваться ГОСТ 12.1.003 - 83* «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» и СН 2.2.4/2.1 .8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий» согласно данным нормативным документам уровень шума в лабораториях не должен превышать 65 дБА [51].

Для снижения шума от его источников в лаборатории применяются различные методы:

1. Применяют звукопоглощающие материалы (специальные

перфорированные плиты, панели, минераловатные плиты).

2. Используют глушители шума (например, индивидуальные наушники)

3. Шумное оборудование располагают в отдельном помещении от персонала (эксперименты проводятся в закрытой комнате, комнату с установкой от пультовой отделяет металлическая дверь и бетонная стена).

Так как персонал при проведении экспериментов находится в закрытой пультовой отделенной от шумного оборудования металлической дверью и бетонной стеной, то шум не оказывает влияния на персонал, также для более надежной защиты можно использовать наушники для снижения воздействия шума на организм.

Недостаточное освещение на рабочем месте

Плохое освещение помещений (лабораторий) может неблагоприятно сказываться на работе. При недостаточном освещении в помещении (особенно опасных зон) может привести к травматизму, также слепящие лампы, резкие тени приводят к потере зрения, ориентации, нарушения обмена веществ и т.д. Данные факторы нормируются СП 52.13330.2011, нормы освещенности рабочих помещений представлены в таблице 5.2. Для улучшения показателей освещения, необходимо использовать искусственное освещение в виде светильников, дополнительного внешнего освещения.

Таблица 5.2 – Нормы освещенности производственных помещений [52]

	Характеристика зрительной работы	Наименьший размер или объект различения	Разряд зрительной работы	Под-разряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк
Рабочее место в пультовой	Средней точности	Свыше 0.5 до 1.0	<u>IV</u>	г	Средний, большой	Светлый, средний	200
Рабочее место в кабинете	Высокой точности	От 0.3 до 0.5	<u>III</u>	в	Малый, средний, большой	Светлый, средний, темный	200

При выполнении диагностики радиационных процессов в металлах после облучения на ускорителе ТЕМП-4М приходится длительное время работать с

персональным компьютером. Соответственно также существуют требования и при работе с персональным компьютером. В случае неправильно настроенного контраста, сильной или же недостаточной яркости приводит к быстрой утомляемости и, следовательно, к снижению работоспособности человека. Также может наблюдаться значительное снижение зрения. Существует несколько мероприятий для снижения этого фактора:

1. Необходимо отрегулировать яркость персонального компьютера.
2. В случае низкой освещенности в помещении, необходимо использовать светильники местного использования.
3. Необходимо делать перерывы в работе.

При использовании светильников для создания искусственного освещения, величина коэффициента пульсации не должна превышать 5%. Также, любой персональный компьютер должен удовлетворять требованиям СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Повышенный уровень электромагнитного излучения

Как и любая электроустановка, ионный ускоритель способен создавать электромагнитные поля.

Ранними клиническими проявлениями последствия воздействия электромагнитного излучения на организм человека являются функциональные нарушения со стороны нервной системы, проявляющиеся в виде вегетативных дисфункций неврастенического и астенического синдрома. Лица, продолжительное время находившиеся в зоне электромагнитного излучения, имеют жалобы на слабость, раздражительность, быструю утомляемость, ослабление памяти, расстройства сна. Зачастую этим симптомам сопутствуют расстройства вегетативных функций. Нарушения со стороны сердечно-сосудистой системы проявляются, в большинстве случаев, нейроциркуляторной дистонией: лабильность пульса и артериального давления, склонность к гипотонии, боли в области сердца. Отмечаются также фазовые изменения состава периферической крови с последующим развитием умеренной

лейкопении, нейropении, эритроцитопении. Изменения костного мозга носят характер реактивного компенсаторного напряжения регенерации. Обычно эти изменения возникают у лиц по роду своей работы постоянно находившихся под действием электромагнитного излучения с достаточно большой интенсивностью. Работающие с магнитными и электромагнитными полями, а также население, живущее в зоне действия ЭМП жалуются на раздражительность, нетерпеливость. Через 1-3 года у некоторых появляется чувство внутренней напряженности, суетливость. Нарушаются внимание и память. Возникают жалобы на малую эффективность сна и на утомляемость[53].

Предельно-допустимые значения электромагнитного поля регламентируются в специальном документе - СанПиН 2.2.4.1191-03. Существуют следующие нормы при разных частотах:

- 30–300 кГц – это напряжённость поля 25 В/м;
- 0,3–3 мгц – 15 В/м;
- 3–30 мгц – 10 В/м;
- 30–300 МГц – 3 В/м;
- от 300 мгц 300 ГГц – 10 мкВт/см².

Самое опасное в электромагнитном поле это то, что его невозможно ощутить. Тем самым эффект (ухудшение здоровья) накапливается незаметно.

Для минимизации воздействия электромагнитного поля ускоритель находится в металлическом корпусе, являющимся защитным экраном от электромагнитного излучения.

Неблагоприятные условия микроклимата

Согласно СанПину 2.2.4.548-96 на любом рабочем месте должен осуществляться надзор по соблюдению санитарных правил. Научно исследовательская работа относится к работе средней тяжести (категория IIa), микроклиматические условия на рабочих местах должны соответствовать требованиям, указанным в таблице 5.3[54]

Таблица 5.3- Оптимальные метеорологические условия для рабочей зоны согласно ГОСТ 12.1.005

Параметр.	Сезон года.	
	Холодный.	Тёплый.
	Оптим.	Оптим.
Температура, °С.	17-19	19-21
Влажность, %.	60-40	60-40
Скорость воздуха, м/с	0,2	0,2

Неблагоприятные условия микроклимата приводят к нарушению теплового баланса. Понижение температуры окружающего воздуха приводит к увеличению теплоотдачи от организма за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Понижение температуры и повышение скорости движения воздуха также увеличивает теплоотдачу от организма и может привести к переохлаждению организма за счет возрастания отдачи теплоты конвекцией и при испарении пота. При переохлаждении организма уменьшается функциональная деятельность органов человека, скорость биохимических процессов, снижается внимание, затормаживается умственная деятельность и, в конечном счете, снижается активность и работоспособность.

При повышении температуры, тепловыделения человека начинают превышать теплоотдачу, может возникать перегрев организма. Ухудшается самочувствие и падает работоспособность. Действие высокой температура воздуха на организм нередко вызывает серьезные и стойкие изменения в деятельности сердечно-сосудистой системы, наблюдаются изменения со стороны дыхания, снижается секреция желудочного и поджелудочного сока, желчи, угнетается моторика желудка, снижается сила условных рефлексов, ослабляется внимание, ухудшается координация движения, что может быть причиной роста травматизма, снижение работоспособности и производительности труда.

При обеспечении допустимых показателей микроклимата температура внутренних поверхностей конструкции, ограждающих рабочую зону (стен, потолка, пола) не должна превышать предел допустимых величин температуры воздуха.

В холодный период года следует применять средства защиты рабочего места от радиационного охлаждения от остекленных поверхностей оконных проемов, в теплый период от попадания прямых солнечных лучей. Производственное помещение располагается в цокольном этаже и не имеет оконных проемов.

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей оборудования, осветительных приборов не должна превышать 70 Вт/м при величине облучения поверхности от 25 % до 50 % на постоянных рабочих местах[55].

Температура в рабочей зоне поддерживается отоплением в холодный период и системой вентиляции в теплый период.

5.1.2 Анализ опасных факторов производственной среды

К опасным факторам относятся:

- 1 источник термической опасности;
- 2 повышенный уровень ионизирующих излучений;
- 3 высокое напряжение;
- 4 статическое электричество.

Источник термической опасности

Термическая опасность – это опасность, возникающая при горении, повышенной температуре поверхности и повышенной температуры вдыхаемого газа.

Термические опасности могут приводить к:

- ожогам и ошпариванию из-за соприкосновения с предметами или материалами, имеющими чрезвычайно высокую или низкую температуру, вызванную, например, пламенем или взрывом, а также излучением источников тепла;
- ущерб здоровью из-за воздействия высокой или низкой температуры окружающей производственной среды.

При выполнении данной выпускной квалификационной работы имеется один очаг термической опасности – это печь паромасляного насоса для откачки камеры с ионным диодом. Температура печи при работе может достигать от (200- 300) °С, данная температура опасна при соприкосновении и может привести к ожогам так и ошпариванию мягкой ткани человека.

Работа печи осуществляется в закрытом корпусе и рабочему персоналу сложно подобраться к месту излучения тепла. При необходимости соприкосновения с печью для выполнения каких-либо работ (ремонт или наладка), печи изначально дают остыть, проверяя температуру тепловизором, после остывания до допустимых значений температуры, приступают к выполнению работы.

Повышенный уровень ионизирующих излучений

При выполнении работы также нужно учитывать радиационное излучение, обусловленное возможностью облучения персонала тормозным излучением, возникающим при попадании ионного пучка на катод диода и мишень.

Радиационное излучение оказывает сильнейшее ионизирующее действие на человека. Механизм разрушительного действия гамма-квантов заключается в следующем:

- 1) Благодаря огромной проникающей способности «энергичные» гамма-кванты легко проникают в живые клетки, вызывая их повреждение и отравление.
- 2) По пути своего движения они оставляют разрушенные ими молекулы (ионы). Эти повреждённые частицы ионизируют новую порцию молекул.
- 3) Такая трансформация клеток вызывает сильнейшие изменения в её различных структурах. А изменившиеся или разрушенные составные части облучённых клеток разлагаются и начинают действовать как яды.
- 4) Заключительным этапом является рождение новых, но дефектных клеток, которые не могут выполнять необходимые функции.

Опасность гамма-излучения усугубляется отсутствием у человека механизма способного ощутить это воздействие вплоть до смертельных доз. Особая опасность гамма-излучения заключается в его способности накапливаться в организме, а также наличие скрытого периода воздействия.

Нормами радиационной безопасности СП.2.6.25.23-09 (НРБ-99/2009) устанавливаются следующие категории облучаемых лиц[56]:

персонал:

- 1) лица, работающие с техногенными источниками (группа А);
- 2) лица, по условиям работы находящиеся в сфере воздействия источников (группа Б).

население – все население, включая лиц из персонала вне сферы и условий их производственной деятельности (студенты относятся к группе население).

Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни группы Б, не должны превышать $\frac{1}{4}$ значения для персонала группы А.

Таблица 5.4 – Основные пределы доз[56]

Нормируемые величины	Дозовые пределы	
	Персонал группы А	население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год.	1,0 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5,0 мЗв в год.
Эквивалентная доза за год		
- в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
- в коже	500 мЗв	50 мЗв
- кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Радиационная защита ускорителей элементарных частиц выполняется так, чтобы обеспечить суммарную дозу облучения для персонала и населения не превышающую 20 мЗв в год для персонала группы А, и 5 мЗв в год для персонала группы Б, и 1 мЗв в год для населения. Все эти данные регламентируются документом НРБ-99/2009. Также следует учитывать время, в течении которого ускоритель будет работать с коэффициентом запас равным 2. Расчет радиационной защиты производится с помощью СанПин 2.6.1.2573-10.

При проведении экспериментов в комнате, где располагается ускоритель, доза радиации не превышает 5 мкЗв в час (120 мЗв в год при 1700 рабочих часах). Во избежание облучения при работе используется средство коллективной защиты: защищенное место от воздействия радиационного излучения, где рабочий персонал находится в пультовой, отделенной от установки толстой бетонной стеной и металлической дверью, не пропускающих рентгеновское тормозное излучение, в которой доза радиации не превышает 1 мЗв в час.

Высокое напряжение

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА [57].

Одной из особенностей поражения электрическим током является отсутствие внешних признаков, грозящих опасности, которые человек мог бы заблаговременно обнаружить с помощью органов чувств.

Ток приводит к серьезным повреждениям центральной нервной системы таких жизненно важных органов как сердце и легкие. Поэтому второй особенностью воздействия тока на человека является тяжесть поражения.

Третья особенность поражения человека электрическим током заключается в том, что токи промышленной частоты силой в (10-15) мА способны вызвать резко интенсивные судороги мышц.

Окружающая среда (влажность и температура воздуха, наличие заземленных металлических конструкций и полов, токопроводящей пыли и др.) оказывает дополнительное влияние на условия электробезопасности. Степень поражения электрическим током во многом зависит от плотности и площади контакта человека с токоведущими частями.

Безопасность эксплуатации при нормальном режиме работы установок обеспечивается следующими защитными мерами:

- применение изоляции;
- недоступность токоведущих частей;
- изоляция электрических частей от земли.

В отношении опасности поражения людей электрическим током различаются [58]:

1 Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность;

2 Помещения с повышенной опасностью, характеризующиеся наличием в них одного или следующих условий, создающих повышенную опасность:

- а) сырости или токопроводящей пыли;
- б) токопроводящих полов (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.);
- в) высокой температуры;
- г) возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования,- с другой.

3 Особо опасные помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

- а) особой сырости;
- б) химически активной или органической среды;
- в) одновременно двух или более условий повышенной опасности;

4 Территории размещения наружных электроустановок. В отношении опасности поражения людей электрическим током эти территории приравниваются к особо опасным помещениям.

Рабочее помещение лаборатория в отношении опасности поражения людей электрическим током относится к 1 группе, т.е. без повышенной

опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность. Рабочее место удовлетворяет всем требованиям безопасности жизнедеятельности: нет доступа к токоведущим частям, все источники питания пронумерованы.

В случае поражения электрическим током пострадавшего необходимо немедленно освободить от действия тока. При этом не забывать о мерах личной предосторожности, используя защитные резиновые перчатки, коврики и сапоги. В зависимости от степени повреждения здоровья необходимо оказать соответствующие меры первой помощи.

В случае если человек в сознании требуется уложить человека, тепло укрыть и дать отдохнуть.

В случае если человек потерял сознание, но при этом пульс и дыхание присутствуют, необходимо обеспечить приток свежего воздуха в помещение и выполнить первую помощь. Для этого необходимо осмотреть полость рта, если стиснуты зубы, раскрыть рот вытянуть язык и повернуть голову на бок. Затем пострадавшему дают вдыхать кислород. Если пострадавший пришел в сознание, ему необходимо обеспечить полный покой. Но часто бывает, что последствия поражения током проявляется после некоторого времени: появляется прерывистое дыхание, проявляется бледность кожных покровов, а также сердечная недостаточность, поэтому необходимо вызвать скорую помощь.

В самом критичном случае, когда человек не подает признаки жизни необходимо:

1. Провести вышеперечисленные действия (освободить рот, уложить и т.д.).
2. Приступить к производству искусственного дыхания «изо рта в рот» и одновременно осуществлять непрямой массаж сердца.

Статическое электричество

Статическое электричество - это совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда

на поверхности, или в объеме диэлектриков, или на изолированных проводниках (ГОСТ 12.1.018). Образование и накопление зарядов на перерабатываемом материале связано с двумя следующими условиями:

Заряды статического электричества могут накапливаться и на теле человека (при работе или контакте с наэлектризованными материалами и изделиями). Высокое поверхностное сопротивление тканей человека затрудняет отекание зарядов, и человек может длительное время находиться под большим потенциалом [59].

Основной опасностью при электризации различных материалов является возможность возникновения искрового разряда, как с диэлектрической наэлектризованной поверхности, так и с изолированного проводящего объекта.

Для предупреждения образования статического электричества на элементах металлических конструкций, трубопроводах разного назначения, расположенных на расстоянии менее 10 см параллельно друг друга, применяются замкнутые контуры, создаваемые с помощью устанавливаемых между ними металлических заземленных перемычек через каждые 20 м и менее. Для непрерывного снятия электростатических зарядов с человека используются электропроводящие полы, заземленные зоны или рабочие площадки, оборудование, трапы, а также средства индивидуальной защиты в виде антиэлектростатических халатов и обуви, с кожаной подошвой или подошвой из электропроводной резины.

5.2 Экологическая безопасность

Защита окружающей среды - это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий, является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это требует решения целого комплекса сложных

технологических и конструктивных задач, основанных на исследовании новейших научно-технологических достижений.

Основными факторами, обуславливающим необходимость обращения особого внимания вопросам охраны окружающей среды, являются следующие[60]:

- токсичность или другое физиологическое действие порошков ряда металлов и неметаллов, газов, применяемых в производстве;
- взрывоопасность и пожароопасность некоторых материалов и газов;
- слив кислот, щелочей, солей отходов вредных веществ в общую систему канализации;
- пыль на рабочем месте.

В настоящее время на первый план выдвигаются задачи борьбы с загрязнением атмосферы, так как от их решения в значительной мере зависит здоровье людей.

Охрана атмосферы включает в себя:

- уменьшение и полное прекращение выбросов вредных веществ в атмосферу;
- сохранение и увеличение биомассы производителей кислорода и поглотителей углекислоты;
- сохранение и восстановление оптимальной циркуляции атмосферы в региональном масштабе;
- утилизация отходов вредных производств.

Совершенствование техники газоочистителей повышает степень очистки выбросов. Для обезвреживания выделяемых производствами органических растворителей применяются адсорбционные методы, которые наряду с полным извлечением примесей из газов обеспечивают и их рекуперацию.

В лаборатории в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли материалов мишеней (металлов) которые облучают на ускорителе мощными ионными пучками. Для их удаления используют вытяжную

вентиляцию, а для снижения выбросов этих веществ в атмосферу использует фильтры. Данный фильтр обеспечит задержку частиц меньше 0.1 микрона и защитит окружающую среду от радиоактивной пыли и аэрозольных примесей. В результате выполнения работы, наличие отходов не планируется.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Среди возможных ЧС наиболее вероятным является возникновение пожара и взрыва. Пожар может произойти вследствие перегрева электродов или проблем с изоляцией. Взрыв может произойти вследствие разрушения емкости, содержащей взрывоопасные вещества. На ускорителе ТЕМП-4М используется баллон с азотом в работе при основных и газовых разрядниках. Имеется инструкция по технике безопасности для работников, использующих при работе баллонов со сжатыми и сжиженными газами.

На рабочем месте баллоны должны находиться в металлических шкафах или в специально оборудованных местах, обеспечивающих их защиту от воздействия солнечных лучей, осадков, нагревания, механического воздействия и падения. В свою очередь баллоны должны быть надежно укреплены с помощью хомутов, цепочки или троса. Расстояние от ближайшего радиатора или отопительного прибора до баллона должно быть не менее 1 м, от газовых горелок – не менее 1,5 м, от печей и других источников тепла с открытым пламенем – не менее 5 м. Работа с газами, находящимися в баллонах, опасна и требует большой осторожности, внимания и соблюдения установленных правил и инструкций.

Помещение лаборатории имеет категорию Г (Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности") [61]. Помещение лаборатории имеет «Знак зоны-1» и «Зона класса В-Ia» класса зоны по ПУЭ (Классификация и маркировка взрывозащищенного электрооборудования по ГОСТ 12 2020-76) [62].

Для предотвращения возникновения пожара применяются следующие шаги: проверка персонала на предмет знаний пожарной безопасности, выполнение работ в соответствии с правилами, плановый осмотр установок[63].

Экспериментальная установка устойчива к возникновению пожара, т.к., все токоведущие части надежно изолированы и проверяются согласно плану. Если все же возникнет пожар, персонал будет действовать в следующем порядке:

- 1 Сообщить о пожаре по телефону 01 в пожарную охрану;
- 2 Отключить все электроустановки;
- 3 Закрыть окна и двери, чтобы убрать сквозняк и доступ кислорода для горения;
- 4 Организовать эвакуацию из лаборатории и параллельно приступить к ликвидации очага пожара первичными средствами пожаротушения (огнетушитель ОУ-5-ВСЕ, пожарный рукав) При невозможности – покинуть опасную зону.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Нормируемые уровни шума обеспечиваются путем использования малошумного оборудования, применением звукопоглощающих материалов (специальные перфорированные плиты, панели, минераловатные плиты). Кроме того, необходимо использовать подвесные акустические потолки.

В соответствии с пунктом 13.1 статьи 13 Постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.2003 № 118". О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03" лица, работающие с ПЭВМ более 50% рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке.

Нормативная продолжительность рабочего времени согласно статье 91 Трудового кодекса РФ не может превышать 40 часов в неделю. Согласно

статье 92 Трудового кодекса РФ сокращенная продолжительность рабочего времени при проведении работ профессионально связанных с эксплуатацией ПЭВМ не предусмотрена.

В соответствии с типовой инструкцией по охране труда при работе на персональном компьютере ТОИ Р-45-084-01, сотруднику можно работать за компьютером в непрерывном режиме в течении 2 часов, затем необходим отдых. При выполнении в течение рабочей смены работ, относящихся к различным видам трудовой деятельности, за основную работу с компьютером следует принимать такую, которая занимает не менее 50% времени в течение рабочей смены или рабочего дня.

Согласно статье 111 Трудового кодекса РФ работникам необходимо предоставить один выходной день при шестидневном рабочем графике.

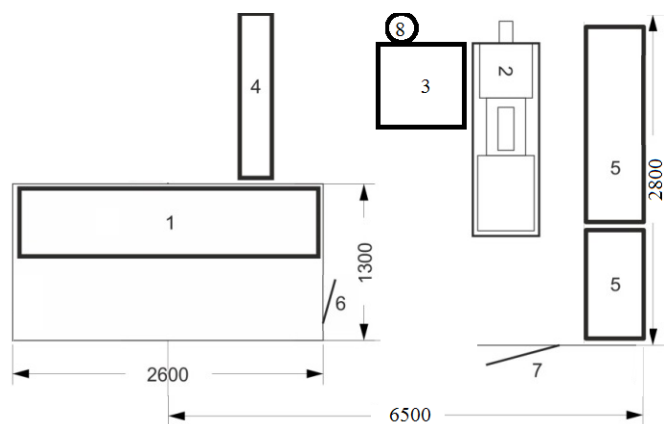
Расположение и компоновка рабочего места

Рабочее место - это часть пространства, в котором инженер (работник) осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности инженера, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

При правильной организации рабочего места, возрастает производительность труда инженера (работника).

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы.

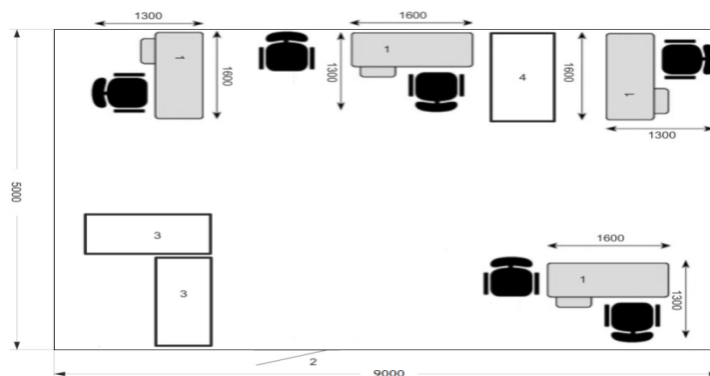
Расположение и компоновка рабочего места лаборатории с пультовой представлена на рисунке 5.1.



1 – рабочее место, с оборудованием управления и мониторинга ускорителя; 2 – импульсный ионный ускоритель ТЕМП-4М; 3 – ГИН (генератор импульсных напряжений); 4 – стеллаж с запасными частями; 5 – стол для выполнения работ; 6 – металлическая дверь, отделяющая пультовую и помещение с ускорителем; 7 – входная металлическая дверь; 8 – баллон сжатым газом (азот)

Рисунок 5.1 – компоновка рабочего места лаборатории с пультовой

Расположение и компоновка рабочего места кабинета с компьютером представлена на рисунке 5.2.



1 - рабочее место, оборудованное компьютером; 2 - входная дверь; 3 - шкаф; 4 - стол с МФУ.

Рисунок 5.2 – компоновка рабочего кабинета.

Размерные характеристики рабочего места, требования к размещению органов управления и требования к расположению средств отображения информации соответствуют требованиям ГОСТ 12.2.032-78 на двух рабочих местах[64].

Заключение

Целью магистерской работы было использовать телевизионную диагностику облученных мишеней для изучения быстрых радиационных процессов в металлах, проверки этой диагностики мощным ионным пучком на генераторе, и возможности определения чувствительности и погрешности измерения параметров радиационных дефектов. Актуальность использования данной методики для изучения быстрых радиационных процессов заключается в том, что когда металлическая мишень облучается мощным ионным пучком, легко измерить ее охлаждение и в реальном времени идентифицировать основные механизмы, ответственные за миграцию и отжиг радиационных дефектов. Таким образом данная методика вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к методам исследования радиационной стойкости материалов, т.к. позволяет проводить испытания в реальном времени в условиях интенсивной радиационной нагрузки, что позволяет выполнить оперативный анализ исследуемых материалов и является доступной для большого круга исследователей.

В первой главе был проведен литературный обзор методов исследования быстрых радиационных процессов. Обзор литературы показал, что ионные пучки обеспечивают хорошо зарекомендовавший себя метод формирования радиационных дефектов в материалах, так как облучение материалов МИП вызывает быстрый нагрев и быстрое охлаждение поверхностного слоя материалов, что приводит к формированию в их кристаллической структуре точечных дефектов, типа пар Френкеля (межузельный атом+вакансия). Помимо тепловизионной диагностики рассмотрены методы исследования радиационных процессов в материалах с использованием электронного микроскопа в реальном времени, при облучении электронным и непрерывным ионным пучком. Так метод исследования быстрых радиационных процессов с помощью электронного микроскопа в реальном времени при облучении мишени непрерывным

электронным пучком, не позволяет детально изучить структуру радиационных дефектов, динамику их формирования, агрегирования, миграции и др. при нагревании исследуемой мишени до $(200-500)^\circ\text{C}$, а метод исследования при облучении непрерывным ионным пучком является дорогостоящим и требует много времени. Также существует калориметрический метод исследования радиационных процессов при охлаждении металлической мишени, но он не больших успехов в развитии за счет того, что очень низкая равновесная концентрация дефектов и ошибка определения их параметров очень велика.

Во второй главе приведено описание конструкции и основных параметров генератора сильноточных импульсных ионных пучков ТЕМП-4М и ТЕМП-6 на которых проводились эксперименты. Уделено внимание объектам исследования. Так исследование проводилось на объектах, размеры которых были намного меньше, чем поперечные размеры ионного пучка. Металлический диск диаметром 10 мм и толщиной от $(0,75-0,2)$ мм был установлен в центральной отверстии большой мишени и закреплен тонкой проволокой диаметром 0,1 мм. Такая конструкция мишени позволяет обеспечить его равномерное нагревание во время облучения и почти исключить токопроводящее охлаждение.

Основная часть экспериментальной работы описана в третьей главе. Кривые охлаждения для различных мишеней после облучения МИП были проанализированы с использованием модели, которая включает в себя эффекты радиационного охлаждения, отжига и миграции радиационно-индуцированных дефектов, образовавшихся в мишени при облучении МИП. В течение первых 30с после облучения МИП динамика охлаждения малых мишеней из нержавеющей стали, титана и удовлетворительно описывается двумя процессами потери тепловой энергии в мишени из-за радиационного охлаждения и выделение энергии из-за быстрого термического отжига радиационных дефектов.

Учет потребления энергии ионного пучка для формирования радиационных дефектов объясняет существенное изменение концентрации

энергии МИП (1,4-1,6 раза), измеряемое с помощью тепловизионной диагностики с использованием мишеней из разных материалов без изменения режима работы ускорителя.

В начальный момент после облучения МИП (t меньше 15 с) экспериментальная мощность потерь энергии в мишени превышает рассчитанную с учетом теплового излучения от мишени и радиационно-индуцированного отжига дефектов в мишени. Это можно объяснить дополнительным потреблением энергии в мишени из-за миграции вакансий при высокой температуре. Позже экспериментальная и расчетная мощность совпадают в пределах 10%.

Исследование охлаждения мишени после облучения МИП позволяет определить основные характеристики радиационных дефектов сразу после мощного облучения.

Время для выравнивания температуры по толщине металлической мишени 0,1 мм не превышает 1 мс, поэтому диагностика тепловидения позволяет исследовать быстро протекающие процессы миграции и отжига радиационных дефектов в реальном времени после облучения МИП с помощью временного разрешения 1 мс.

В разделе финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение были определены концепция проекта, анализ рынка продукта, SWOT-анализ. Был составлен план управления научно-техническим проектом; отмечены контрольные события проекта; посчитан бюджет научного исследования. Также был проведен анализ финансовой эффективности, ресурсоэффективности и сравнения эффективностей.

В разделе социальная ответственность определены вредные факторы при работе. Это: шум, недостаточная освещенность, повышенный уровень электромагнитного излучения, микроклимат. К опасным факторам можно отнести ионизирующее излучение, источник термической опасности, высокое напряжение и статическое электричество. При выполнении исследований

возможными чрезвычайными ситуациями являются: замыкание электрической цепи, поражение электрическим током, и как следствие, пожар.

В качестве раздела для перевода на иностранный язык была выбрана третья глава.

Список использованных источников

- 1 Трушин Ю.В. Физическое материаловедение. -СПб.: Наука, 2000. - 286с.
- 2 Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. - М: Физматлит, 2003. - 286 с.
- 3 Хайлов И.П., Стабилизация генерации мощного ионного пучка в диоде с магнитной самоизоляции: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Томск: ТПУ, 2015. – 109 с.
- 4 Ремнев Г. Е. Модификация материалов с использованием мощных ионных пучков / Г. Е. Ремнев // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. - 2000. - Т. 303, вып. 2: Радиационная физика твердого тела и радиационные технологии. — [С. 59–70].
- 5 Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки металлов. Учебник. М.: Круглый год, 2001. – 508 с.
- 6 Satoh Y., Matsui H. Obstacles for one-dimensional migration of interstitial clusters in iron. Philosophical Magazine. – 2009. Vol.89, № 18, P. 1489–1504.
- 7 Satoh Y., Sohtome T., Abe H., Matsukawa Y. & Kano S. Athermal migration of vacancies in iron and copper induced by electron irradiation, Philosophical Magazine. – 2017. Vol.97, № 9, P. 638–656.
- 8 Satoh Y., Abe Y., Abe H., Matsukawa Y., Kano S., Ohnuki S. & Hashimoto N. Vacancy effects on one-dimensional migration of interstitial clusters in iron under electron irradiation at low temperatures. Philosophical Magazine. – 2016. Vol.96, № 21, P. 2219–2242.
- 9 Shimada M., Nakahigashi S., Terasawa M. Swelling of Type 304 Stainless Steel Bombarded with 200 keV C⁺ Ions // Journal of Nuclear Science and Technology, 1976, Vol.13, №.12, P. 743–751.

10 Meimei Li, Kirk M.A., Baldo P.M., Donghua Xu and Wirth B.D. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling // *Philosophical Magazine*. – 2012. Vol. 92, №. 16, P. 2048–2078.

11 Wirth B.D., Maroudas D., Lucas G.E., Energetics of formation and migration of self-interstitials and self-interstitial clusters in α -iron // *Journal of Nuclear Materials*. – 1997. Vol. 244, № 3, P. 185–194.

12 Kizuka Y., Satoh Y., Arai S., and Kiritani M. Identification of the nature of neutron-irradiation-induced defects in copper by means of electron irradiation // *Radiation Effects and Defects in Solids*. - 1998. Vol.145, № 2, P. 143–167.

13 Iwase A., Iwata T., Nihira T. & Sasaki S. Defect recovery and radiation annealing in FCC metals irradiated with high-energy ions // *Radiation Effects and Defects in Solids*. – 1992. Vol.124, № 1. P. 117–126.

14 Masayuki SHIMADA, Shigeo NAKAHIGASHI & Mititaka TERASAWA Swelling of Type 304 Stainless Steel Bombarded with 200 keV C^+ Ions // *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1976, Vol. 13, № 12, P. 743–751.

15 Myers M.T., Charnvanichborikarn S., Shao L., and Kucheyev S.O. Pulsed Ion Beam Measurement of the Time Constant of Dynamic Annealing in Si // *Physical Review Letters*. – 2012. – 109 p.

16 Yuko Kizuka, Yuhki Satoh, Shigeo Arai & Michio Kiritani. Identification of the nature of neutron-irradiation-induced defects in copper by means of electron irradiation // *Radiation Effects and Defects in Solids*, 1998, Vol. 145, № 1, P.143– 167.

17 Van Renterghem W., Konstantinovic M.J., Vankeerberghen M. Evolution of the radiation-induced defect structure in 316 type stainless steel after post-irradiation annealing // *Journal of Nuclear Materials* 452. – 2014. P. 158–165.

18 Granberg F., Nordlund K., Ullah M.W., Jin K., Lu C., Bei H., Wang L. M., Djurabekova F., Zhang Y., Weber W. J. Mechanism of Radiation Damage Reduction in Equiatomic Multicomponent Single Phase Alloys // *Physical review letters*. – 2016. – 116p.

19 Oberdorfer B., Steyskal E., Sprengel W., Pikart W., Hugenschmidt C., Zehetbauer M., Pippan R., Schmid E., and Wu'rschum R., In Situ Probing of Fast Defect Annealing in Cu and Ni with a High-Intensity Positron Beam. *Physical Review Letters*. – 2010. –105 p.

20 Freysoldt C., Grabowski B., Hickel T., Neugebauer J., Kresse G., Janotti A., Van de Walle C. First-principles calculations for point defects in solids // *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, 2014, Vol. 86, P. 253–305.

21 Marian J., Wirth B.D., Perlado J.M., Odette G.R., Diaz de la Rubia T. Dynamics of self-interstitial migration in Fe-Cu alloys // *Physical Review B*, –2001. Vol. 64. P. 78–85

22 Ortiz C. J. and Caturla M. J. Simulation of defect evolution in irradiated materials: Role of intracascade clustering and correlated recombination // *Physical Review B*, – 2007. Vol.75, P. 52–67

23 Cao B. S., Lei M. K. Nonlinear diffusion of interstitial atoms // *Physical Review B*, –2007. Vol. 76, P. 102–116

24 Guarini G., Schiavini G. M.. Vacancy contribution to the heat content in aluminium, *Philosophical Magazine*. – 1966. Vol 14, № 127, P. 47–52

25 Setman D., Kerber M.B., Schafler E., and Zehetbauer M.J. Activation enthalpies of deformation-induced lattice defects in severe plastic deformation nanometals measured by differential scanning calorimetry // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2010. Vol. 41 № A, P. 810–815.

26 Shimada M., Nakahigashi S., Terasawa M. Swelling of Type 304 Stainless Steel Bombarded with 200 keV C⁺ Ions // *Journal of Nuclear Science and Technology*, –1976, Vol 13, №12, P. 743–751

27 Bringa E.M., Wirth B.D., Caturla M.J., Stölken J., Kalantar D. Metals far from equilibrium: From shocks to radiation damage // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2003. Vol. 202, P. 56–63

28 Davis H.A., Bartsch R.R., Olson J.C., Rej D.J., Waganaar W.J. Intense ion beam optimization and characterization with infrared imaging // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 82. – № 7. – P. 3223.

29 Pushkarev A.I., Isakova Y.I., Xailov I.P., Zhong H. Generation and diagnostics of pulsed intense ion beams with an energy density of 10 J/cm^2 // Review of Scientific Instruments. – 2015. Vol. 86, № 1, P. 75–98

30 Hegeler F., Friedman M., Myers M.C., Sethian J.D., Swanekamp S.B. Phys. Plasmas, –2002. – 125p.

31 Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Сазонов Р.В., Холодная Г.Е. Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом. - М: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 240 с.

32 Xiang W., Zhao WJ., Yan S., Q Zeng B. Simulations of intense pulsed ion beam uniformity in a planar magnetically insulated ion diode. Review of scientific instruments, – 2002. – Vol.73 №2, P. 857–859.

33 Bystritskii V.M., Didenko A.N., KrasikYa.E., Matvienko V.M. Generation of a homogeneous large cross section ion beam in a magnetically insulated diode. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, – 1986. Vol. 17, № 2, P. 182–185.

34 Zhu X.P., Zhang Z.C., Pushkarev A.I., Lei M.K. Ion beam enhancement in magnetically insulated ion diodes for high-intensity pulsed ion beam generation in non-relativistic mode // Phys. Plasmas. – 2016. Vol. 23. № 1, – 36 p.

35 Pushkarev A.I., Isakova Yu.I., Khailov I.P. Intense ion beam generation in a diode with explosive emission cathode in self-magnetically insulated mode // The European Physical Journal D section Plasma Physics. – 2015. Vol. 69, № 40, –13 p.

36 Pushkarev A.I., Isakova Y.I., Xailov I.P. Stabilization of ion beam generation in a diode with self-magnetic insulation in double-pulse mode // Laser and Particle Beams, – 2015, Vol. 33, № 2, P. 283–291.

37 Xiao Yu, Jie Shen, Miao Qu, Haowen Zhong, Jie Zhang, Yanyan Zhang, Sha Yan, Gaolong Zhang, Xiaofu Zhang, Xiaoyun Le. Distribution and evolution of

thermal field formed by intense pulsed ion beam on thin metal target // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B –2015, Vol. 365, № A, P. 225–229.

38 Incropera F.P. and Dewitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley, –1990. – 1039 p.

39 Wolfgang Stiller Arrhenius Equation and Non-Equilibrium Kinetics. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, – 1989, – 160 p.

40 R.S. Nelson The use of ion beams to study radiation effects in metals // Contemporary Physics, – 1978, Vol.19, № 6, P. 543-569.

41 Ohsawa K. and Kuramoto E., Activation energy and saddle point configuration of high-mobility dislocation loops: A line tension model // Physical Review B – 2005, Vol.72. P 54 – 105.

42 Michio Kiritani, Hikoshi Takata, Koji Moriyama & Eiichi Fujita F. Mobility of lattice vacancies in iron // Philosophical Magazine A. –1979 Vol. 40 № 6, P. 779- 802.

43 L. N. Bystrov , L. I. Ivanov & V. M. Ustinovschikov Radiation-induced structure-phase transformations in austenitic stainless steels, Radiation Effects, –1983, Vol.79, № 4, P 63-73.

44 D.A. Terentyev, L. Malerba, and M. Hou, Dimensionality of interstitial cluster motion in bcc-Fe // Physical Review B –2007, Vol. 75, P.104 –108.

45 B.D. Wirth, G.R Odette, D Maroudas, G.E Lucas. Dislocation loop structure, energy and mobility of self-interstitial atom clusters in bcc iron // Journal of Nuclear Materials –2000, Vol. 276, № 1, P. 33–40.

46 M.I. Mendeleev, T.L. Underwood, and G.J. Ackland Development of an interatomic potential for the simulation of defects, plasticity, and phase transformations in titanium // The Journal of Chemical Physics –2016, Vol.145, –12 p.

47 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский

политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

48 Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утверждено Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, 1999 г, – 289 с.

49 Регламентирующие документы планово-финансового отдела ТПУ - [Электронный ресурс <http://portal.tpu.ru>] – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 3.04.2018)

50 Романенко С.В., Анищенко Ю.В. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения. - Томск ТПУ, 2016, - 11 с.

51 СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

52 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 2003.

53 ГОСТ 12.1.002 – 84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.

54 СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997.

55 ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

56 Нормы радиационной безопасности, НРБ–99. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999.

57 ГОСТ 12.1. 045 – 84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

58 ПУЭ «Правила устройства электроустановок. Издание 6», 1999. – 123 с.

59 ГОСТ 12.1.018-93. Пожаровзрывобезопасность статического электричества.

60 Инструкция по охране окружающей среды при строительстве скважин на суше на месторождениях углеводородов поликомпонентного состава, в том числе сероводородсодержащих, утверждено Минтопэнерго РФ и Минприроды РФ 25.01,10.08.1996 г . [электронный ресурс]. – режим доступа – http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/481560/instruktsiya_po_okhrane_okruzhayushchei_sredy_pri_stroitelstve_skvazhin_na.pdf

61 ППБ 01–03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. – М.: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2003.

62 Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности". Статья 27. Определение категории зданий, сооружений и помещений по пожарной и взрывопожарной опасности.

63 Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности". Статья 19. Классификация взрывоопасных зон

64 ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

Приложение А

Thermal imaging diagnostics of fast radiation-induced processes

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Бондаренко Ю.С.		

Руководитель ВКР:

Должность	Ф.И.О.	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение материаловедения, профессор	Пушкарев А.И.	Доктор физико-математических наук		

Консультант - лингвист отделения ШБИП:

Должность	Ф.И.О.	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение иностранных языков, старший преподаватель	Квашнина О.С.			

A1 Thermal imaging diagnostics of fast radiation-induced processes

A1.1 Fast radiation-induced processes studying methods

The improvement in properties of machine-building products is impossible without new technological processes that allow increasing the life and reliability of parts and components in the severe operating conditions. The active development in the outer space and nuclear industries and studies of thermonuclear fusion require the materials with a resistance to high-dose radiation. To develop new technologies for their production an operational method for studying the radiation resistance of materials is needed, which makes it possible to conduct in-situ tests in the conditions of intense irradiation.

Most studies on the formation, migration, and annealing of radiation-induced defects were performed using an electron microscope in-situ observation during the irradiation with an electron beam [1,2,3] or continuous ion beam [4,5]. However, this method does not allow investigating the formation of radiation-induced defects under intense irradiation like the one achieved in nuclear reactors or outer space. The thickness of the sample should not exceed 0.1 μm for the transmission electron microscope, which does not allow to study the radiative processes in the volume of structural materials. Our researches revealed that when the thickness of the target decreases from 200 μm to 75 μm , the consumption of thermal energy is significantly increases in the initial period of time after ion beam irradiation. Moreover, such method of in situ electron microscopy investigation of radiation-induced damages is expensive and time consuming. Another widely used method is the prior irradiation (with energetic neutrons in nuclear reactors [6,7] or with ion beams [8,9,10]) and post irradiation study of radiation-induced defects using an electron microscope [11,12], by Rutherford backscattering [13] or changes in targets properties (radiative swelling [4], conductivity [8], length-change measurements [14] etc.). However, this method does not allow in situ investigating behavior of structural materials under the exposure of radiation. Radiating defects in metals have high mobility at room temperature,

characteristic time constant of dominant dynamic annealing processes in Si at room temperature is about 6 ms [10]. Therefore, the prior irradiation is necessary to spend at low temperature that considerably complicates researches. In [7] neutron beam irradiation of a copper target a spent at temperature 16 K, in [8] - at temperature low 10 K. In addition, irradiation of the samples with an intense neutrons beam, formed during the operation of a nuclear reactor, creates conditions for the formation of residual radiation, which significantly complicates their further investigation. This method of investigation of radiation-induced defects in samples is also expensive and difficult for quick research. In recent years, methods of numerical simulation of the formation, migration, aggregation and annihilation of radiation-induced defects in metals (molecular dynamics simulations [15.16], kinetic Monte Carlo and rate theory [17], nonlinear kinetic discrete model [18] and others) have been actively developing. However, the results of simulation should be checked experimentally.

The study of the cooling of metal target makes it possible to determine the concentration of radiation-induced defects, the activation energy of their migration and annealing. By means of a high precision microcalorimeter, the heat absorbed or released by a metal due to either the formation or the annealing of radiation-induced defects was measured in situ [19]. However, this method has not found the further development, as equilibrium concentration of defects very low and an error of determination of their parameters is very high. Post irradiation study of radiation-induced defects by differential scanning calorimetry [20] does not allow in situ investigating fast radiation processes.

Ion beams provide a well-established technique to formation of the radiation-induced defects in materials. At the ion energy of less than 300 keV formation of the radiation-induced defects is the main mechanism for it dissipation in the metal target[21]. High-energy particles radiation can drive materials far from thermodynamic equilibrium and enable novel scenarios in the processing of materials [22]. When a metal target is irradiated with a pulsed ion beam, it is easy to measure its cooling [23.24], which allows us in situ to identify the main mechanisms responsible for the

defects migration and annealing. The purpose of this work is to employ the thermal imaging diagnostics of irradiated targets to study fast radiation-induced processes in metals; to test this diagnostics at the high intense pulsed ion beam (HIPIB) generator, and determine the possibility, sensitivity and the error in measurement of the parameters of radiation-induced defects.

A1.2 Experimental setup

The experiments have been performed on TEMP-6 HIPIB apparatus operated in a double pulse mode [25]. The schematic of the diode chamber of the accelerator and typical waveforms are shown in figure A.1.

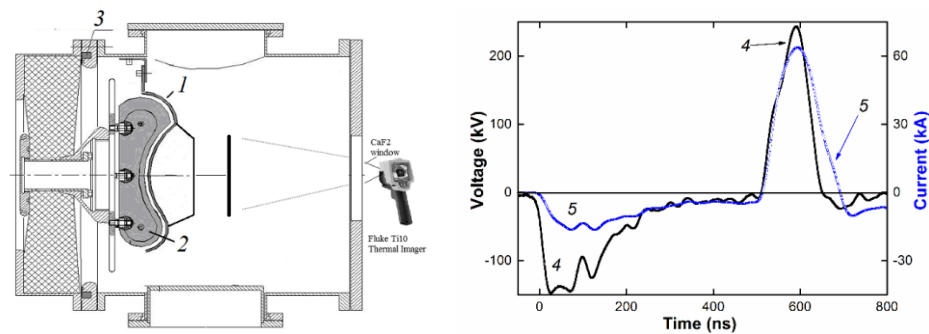


Figure A.1 - Schematic of the diode unit (1 - cathode, 2 - anode, 3 – Rogowski coil), waveforms of the accelerating voltage (4) and the total diode current (5)

The apparatus mainly comprises two parts for ion beam generation, i.e., pulsed-power system of a Marx generator and a double coaxial pulse-forming line and an ion diode system of a self-magnetic field ion diode (MID) installed in a vacuum chamber. The bipolar pulse of self-magnetic field MID on TEMP-6 has a first negative voltage of (150-200) kV up to 500 ns for plasma formation, followed by the second positive one of (200-250) kV with 120 ns duration for ions acceleration. The ion diode in a self-magnetic insulation mode forms an ion beam, containing carbon ions (80-90) % and protons [26]. At HIPIB energy density (3-5) J/cm² the range of penetration of C⁺ ions in steel is 0.3 μm and the rate of point defect formation is (3-5)·10⁶ dpa/s (threshold energy 20 eV). Short-to-short standard deviation of the total energy and energy density of the beam does not exceed 10% [27].

The study was performed on targets, the dimensions of which were much smaller than the HIPIB transverse dimensions. A stainless steel disk with a diameter of ≈ 10 mm and a thickness 0.1 mm was installed in the central hole of the large stainless steel target and fixed with thin wires of 0.1 mm in diameter, see in figure A.2. Such design of the target made it possible to ensure its uniform heating during irradiation and almost eliminate the conductive cooling.

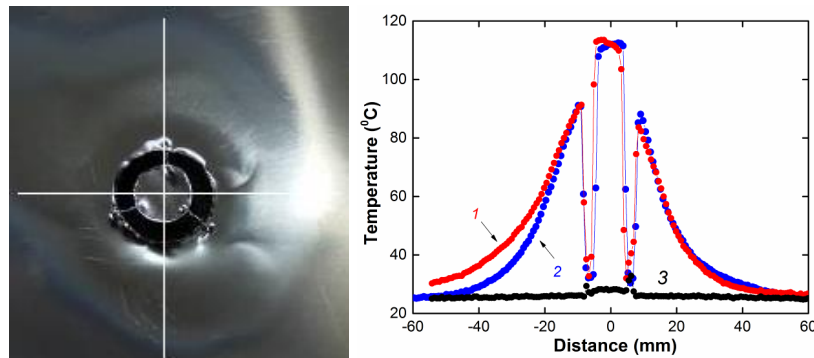


Figure A.2 - Photo of the target with a central disc. Temperature distributions in horizontal (1) and vertical (2) cross-sections. Line 3 – initial temperature of the target

Ion beam energy density was measured by the infrared imaging method, described earlier in [23], which allows measuring the HIPIB energy density with a spatial resolution of (1-2) mm at a high sensitivity of (0,01-0,02) J/cm². In. Figure A.2 the results of IR-diagnostics are shown, thermograms are recorded at 0.1 s after irradiation with one HIPIB pulse.

The infrared images were taken by a Fluke Ti400 infrared camera through a barium fluoride (BaF₂) window fixed on the vacuum chamber (see Figure A.1). Since BaF₂ features incomplete transmission in the spectral range of the IR-camera (7– 14 μ m) the records of the camera after the window were calibrated [23]. After heating the front side of the target by the ion beam, we measured temperature on its rear side using an infrared camera, see figure. A.1. For a 0.1 mm stainless steel target the time of heat transfer from the front surface to the rear surface of the target is 1 ms [23,28]. The Fluke Ti400 IR-camera provides registration of the thermal image on the target in video mode (step 100 ms) at 100 ms after the generation of the HIPIB with

the duration of 120 ns. Therefore, heat transfer along the depth of the target does not introduce a large error in the HIPIB energy density measurement by IR-diagnostics.

A.3 Cooling of stainless steel target

At a uniform temperature distribution along the depth of the target, the bulk thermal energy density in the target is:

$$J_{\text{exp}}(x, y, t) = c_v \cdot \rho \cdot [T(x, y, t) - T_0], \quad J / \text{cm}^3 \quad (3.1)$$

where c_v and ρ - specific heat and density of the target material, respectively;

$T(x, y, t)$ – temperature of the target;

T_0 – initial temperature of the target, equal to the temperature of the diode chamber walls.

Experimental power energy loss due to cooling of the central disc was calculated by differentiating the thermal energy density:

$$W_{\text{exp}}(t) = \left| \frac{d[S \cdot \Delta \cdot J_{\text{exp}}(t)]}{dt} \right| = S \cdot c_v \cdot \Delta \cdot \rho \left| \frac{dT_m(t)}{dt} \right|, \quad W \quad (3.2)$$

where S is the area of the central disc,

Δ is the disc thickness;

$T_m(t)$ is its average temperature.

To estimate the target cooling due to thermal radiation, we calculated the power of radiative heat flux using the experimental values of target temperature. It is necessary to consider radiative cooling from both front and rear sides of the target, as well as heat flow from the chamber walls. The power density of radiative heat flux, given by the Stefan-Boltzmann law, is:

$$w_{\text{ir}}(x, y, t) = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot \sigma [T_m^4(t) - T_0^4], \quad W / \text{cm}^2 \quad (3.3)$$

where ε_1 и ε_2 are the emissivity of the front and rear sides of the target,

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4).$$

The power of radiation from the central disc was calculated by using Eq. (3.3):

$$W_{ir}(t) = S[(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot \sigma [T_m^4(t) - T_0^4]], \quad W \quad (3.4)$$

The area of a target is much smaller than area of the diode chamber walls, therefore reradiation from the chamber walls can be considered negligible [29]. The emissivity of the front surface of the stainless steel target (beam irradiation side) was taken 0.7 (not polished stainless steel with erosion after HIPIB irradiation), while the emissivity of the rear surface of the target was 0.95, as it was sprayed with matt black paint [23]. To increase the accuracy of the calculation of the power density, the experimental target temperature curves was approximated by a sixth-degree polynomial function; the approximation error was less than 1%.

The results of calculations on Eq. (3.2) and Eq. (3.4) are shown in figure A.3. The initial temperature of target was 22°C, specific heat of stainless steel is 0.46 J/(g·K).

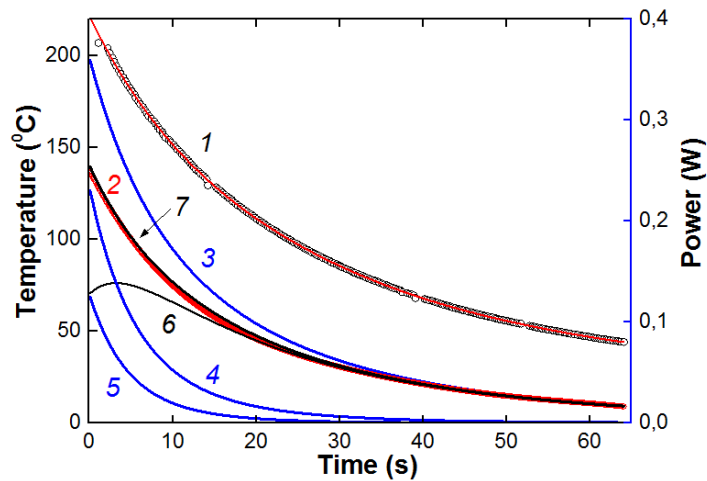


Figure A.3 - Target temperature (1), modulus of experimental power of energy loss in the target (2, points), power of radiative heat flux from the target (3). Calculated power of annealing of radiation-induced defects (4), power of defects migration (5).

Calculated powers of energy loss in the target, taking into account radiation and defects annealing (6); taking into account radiation, defects annealing and migration (7, line)

The performed studies have shown that during first (35-40) s after HIPIB irradiation the experimental power of energy loss is less than the power of thermal

radiation, i.e. cooling of the target is slower than it should be when cooled by thermal radiation only. This indicates that an additional energy in the target is being released. Later, the experimental and calculated powers coincide within 10%, which confirms the correctness of the calculation power of thermal radiation and experimental power of energy loss. The ion diode and target were in vacuum-processed diode chamber at pressure 0.1 Pa, therefore convective cooling was insignificant.

A.4 Calculation of the annealing power of radiation-induced defects

We assume that the source of additional energy released in the target during cooling can be fast thermal annealing of radiation-induced defects, formed in target during HIPIB irradiation. At an ion energy less than 300 keV, the elastic (nuclear) mechanism of its deceleration in the target is realized with formation of radiation-induced defects. Light ion, which mass is much smaller than the mass of the target atom, form point defects (Frenkel pairs) distributed along the track of the ion.

The performed researches revealed that the concentration of radiation defects in the target after HIPIB irradiation does not exceed 0.2% (which corresponds to an average distance between defects of more than 15 interatomic distances of the target material), so the process of their annihilation can be considered as a first-order reaction. Rate of such a reaction is proportional to the radiation defects concentration (law of mass action):

$$\frac{dN_d}{dt} = -k(T) \cdot N_d,$$

where k – is radiation defects annihilation rate constant

Then radiation defects concentration equals:

$$N_d(t) = N_{d0} \exp[-k(T) \cdot t]$$

where N_{d0} – initial defects concentration after HIPIB irradiation.

The power of energy that is being released during the defects annihilation equals:

$$W_{an}(t) = \varepsilon_d \frac{dN_d(t)}{dt} = -\varepsilon_d \cdot N_{d0} \cdot \exp(-k \cdot t) \cdot \frac{dk(T)}{dt} \quad (3.5)$$

where ε_d - the defect formation energy.

The radiation defects annihilation rate constant depends on the temperature of the target and decreases when it is cooled. The rate of change can be written down as:

$$\frac{dk(T)}{dt} = \frac{dk(T)}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = V_T \cdot \frac{dk(T)}{dT} \quad (3.6)$$

where $V_T(t)$ – the rate of temperature change when the target is cooled.

The temperature dependence of the radiation defects annihilation rate constant can be written in the form of the Arrhenius equation [30]:

$$k(T) = A \exp(-\varepsilon_{an} / k_B T) \quad (3.7)$$

Here the pre-exponential factor A characterizes the annihilating defects collision frequency, k_B - Boltzmann's constant; ε_{an} - activation energy of defects annihilation; Then out of equations (3.5) - (3.7) we can get:

$$\begin{aligned} \frac{dk(T)}{dT} &= \frac{A \cdot \varepsilon_{an}}{k_B T^2} \exp(-\varepsilon_{an} / k_B T), \\ \frac{dk(T)}{dt} &= \frac{A \cdot \varepsilon_{an} \cdot V_T}{k_B T^2} \exp(-\varepsilon_{an} / k_B T) \\ W_{an} &= -\frac{N_{do} \cdot A \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_{an} \cdot V_T}{k_B T^2} [\exp(-\varepsilon_{an} / k_B T)] \cdot [\exp(-k \cdot t)] \end{aligned}$$

The calculated annealing power of radiation-induced defects can be written in the form:

$$W_{an}(t) = -\frac{K_{an} \cdot V_T}{T^2} [\exp(-\varepsilon_{an} / k_B T)] \cdot [\exp(-k \cdot t)], \quad W \quad (3.8)$$

where K_{an} – a constant equal to:

$$K_{an} = \frac{N_{do} \cdot A \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_{an}}{k_B}, \quad J \cdot K \quad (3.9)$$

When the target is cooled $V_T < 0$ and from the relation (3.8), we get that $W_{an} > 0$, which means, that when annihilation of defects takes place, energy is released in the target.

The calculated power of energy loss in the target, taking into account thermal radiation and annealing of defects is equal to:

$$W_{calc} = W_{ir} - W_{an} \quad (3.10)$$

The calculated annealing power of radiation-induced defects (Eq. 3.8) and calculated power of energy loss in the target (Eq. 3.10) are shown in figure 3.3. Calculation of annealing power of radiation-induced defects (Eq. 3.8) carried out at $\epsilon_{an} = 0.30$ eV and $A = 1$, which corresponds to defects annihilation for each collision of a vacancy and an interstitial atom.

For more accurate determination of the activation energy of annealing of radiation-induced defects, the calculated (Eq. 3.8) and experimental annealing powers of radiation-induced defects are shown in Arrhenius scale $\log(W) = f(1000/T)$, see figure A.4

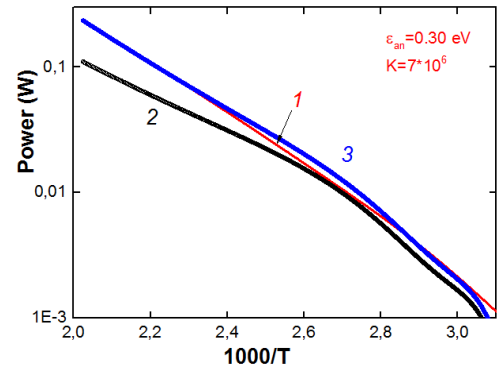


Figure A.4 - Arrhenius plots of the calculated (1, line) and experimental annealing power of radiation-induced defects without (2) and taking into account (3, points) migration of the defects in the target

The experimental annealing power of radiation-induced defects was calculated as:

$$W_{an}^{exp} = W_{ir} - W_{exp} \quad (3.11)$$

After the first (15-20) s cooling of a small target is satisfactorily described by two processes – removal of the energy in the target due to radiative cooling and a release of the energy due to fast thermal annealing of radiation-induced defects.

Annealing of radiation-induced defects in a stainless steel target is described by the annealing model of point defects with an activation energy of 0.3 eV and $K_{an} = (7-13) \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{K}$. At high temperature ($T > 100^\circ\text{C}$ in Figure A.3) the calculated values of annealing power of radiation-induced defects exceed experimental values, which can be attributed to additional consumption of energy in the target. This energy is (10-15) % of the target thermal radiation energy during its cooling.

A.5 Cooling of copper, brass and titanium targets

The next part of the research was performed on copper, brass and titanium targets, the dimensions of which were much smaller than the HIPIB transverse dimensions. A disk with a diameter of 9.7 mm and a thickness 100 μm (Cu), 75 μm (brass) and 50 μm (Ti) was installed in the central hole of the large target from stainless steel and fixed with wires of 0.1 mm in diameter, see figure A.5.

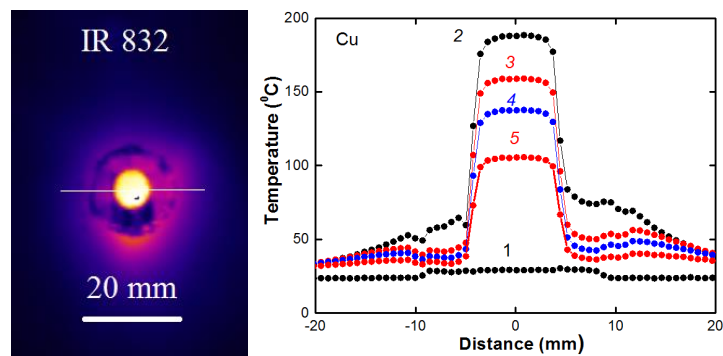


Figure A.5 - Infrared image of the target with a copper central disc. Temperature distributions in horizontal direction before (1) and 0.2 (2), 5 (3), 10 (4) and 20 s (5) after HIPIB irradiation

The results of calculation of the experimental power of thermal energy loss in the copper, brass and titanium targets (Eq. 3.2) and power of thermal radiation from this targets (Eq. 3.4) are shown in figure A.6. Specific heat of copper is 0.385 J/(g·K), brass 0.38 J/(g·K), and titanium 0.527 J/(g·K). The emissivity of the front surface of the target (beam irradiation side) was taken 0.6 (not polished); the emissivity of the

rear surface of the targets was 0.95 as it was sprayed with a thin layer of matt black paint.

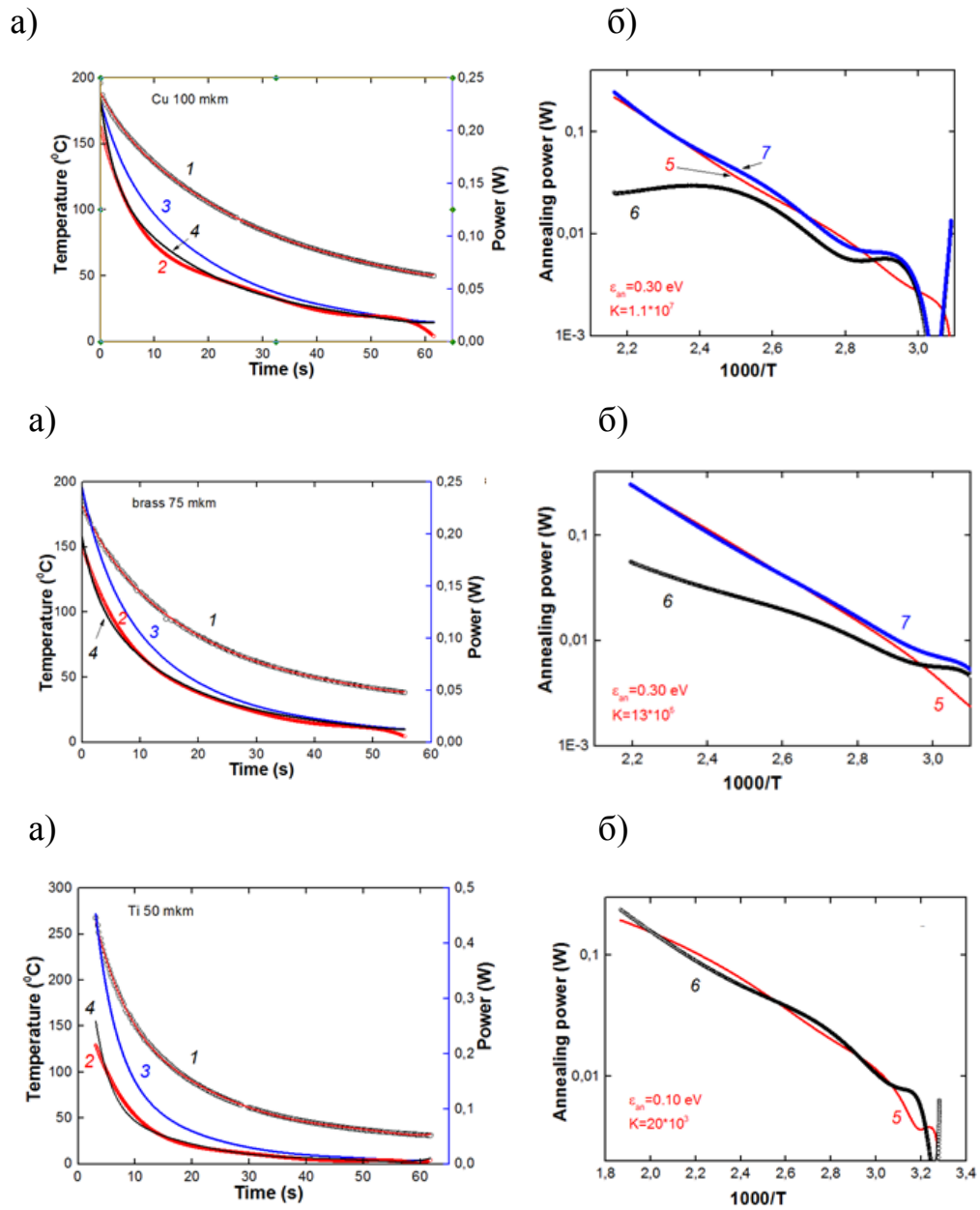


Figure A.6 - Targets temperature (1), experimental power of the energy loss in the target (2, points), power of radiative energy flux from the target (3), calculated power of the energy loss in the target, taking into account thermal radiation, annealing and migration of the defects (4, line). Calculated (5) and experimental annealing power of radiation-induced defects without (6) and taking into account (7, points) migration of the defects. Change at targets cooling (a) and Arrhenius plots (b)

The performed studies have shown that the cooling of the copper, brass and titanium targets (with dimensions smaller than HIPIB diameter) is slower than it should

be when cooled by thermal radiation - experimental power of the energy loss is less than power of thermal radiation. This can be explained by a mechanism, which involves a release of additional energy in the target such as fast thermal annealing of radiation-induced defects, formed in target during HIPB irradiation. Figure A.6 shows calculation of the energy loss power in these targets, taking into account annealing of radiation-induced defects and radiative cooling (Eq. 3.7). The annealing power of radiation-induced defects was calculated on Eq. (3.5).

Similar to the stainless steel target, in the initial time after HIPB irradiation the experimental power of energy loss in copper, brass and titanium targets exceeds the calculated values, obtained taking into account radiation from the target surface and annealing of radiation-induced defects. Later the experimental and calculated power coincide within 10%. The annealing of radiation-induced defects in titanium target is described by a model which accounts for annealing of point defects with an activation energy of 0.1 eV and $K_{an} = (4-6) \cdot 10^3$. For the copper target the activation energy was 0.30 eV and $K_{an} = (4-8) \cdot 10^4$.

A.6 Analysis of vacancies migration

In the initial time after HIPB irradiation ($t < 15$ s, see figure A.3) the experimental power of energy loss in targets exceeds the calculated values which were obtained taking into account thermal radiation from the target and annealing of radiation-induced defects. It can be attributed to additional consumption of energy in the target due to migration of vacancies at high temperature. Generally, an Arrhenius relation of the thermal energy in the target, absorbed due to vacancies migration is:

$$E_m(T) = N_m \cdot \varepsilon_m \exp(-\varepsilon_m / kT)$$

where N_m – quantity of vacancies in the target near the melting point,

ε_m – activation energy of its migration.

The vacancies migration power (modulus) is:

$$W_m(t) = \frac{dE_m}{dt} = \frac{dE_m}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{N_m \cdot \varepsilon_m^2 \cdot V_T}{k \cdot T^2} [\exp(-\varepsilon_m / kT)]$$

The vacancies migration power (modulus) can be written as

$$W_m(t) = \frac{K_m \cdot V_T}{T^2} \exp(-\varepsilon_m / kT) \quad (3.12)$$

where K_m is equal to

$$K_m = \frac{N_m \cdot \varepsilon_m^2}{k}, \quad J \cdot K$$

The experimental migration power in the target is

$$W_m^{\text{exp}}(t) = W_{\text{exp}} - W_{\text{ir}} + W_{\text{an}} \quad (3.13)$$

The calculated (Eq. 3.12) and experimental (Eq. 3.13) migration powers in small targets are shown in figure A.7.

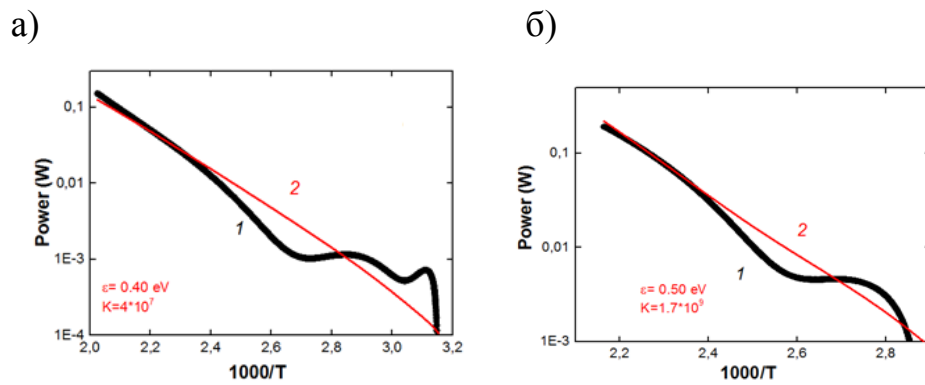


Figure A.7 - Arrhenius plots of the experimental (1, points) and calculated (2, line) vacancies migration power in stainless steel (a) and copper (b) targets

The power of energy loss in the target calculated taking into account thermal radiation, defects annealing and vacancies migration in the stainless steel, copper, brass and titanium targets are shown in figure A.3 and figure A.6. The calculation is made by the relation:

$$W_{\text{calc2}} = W_{\text{ir}} - W_{\text{an}} + W_m$$

The experimental annealing power of radiation-induced defects, considering migration of the defects (see figure 3.6b), was calculated as:

$$W_{\text{an}}^{\text{exp2}} = W_{\text{ir}} - W_{\text{exp}} + W_m \quad (3.14)$$

The performed researches showed, that the energy expended for the migration of vacancies (during the target cooling after irradiation with an ion beam) is 60-70% of the annihilation energy of radiation defects in this target, see figure A.8.

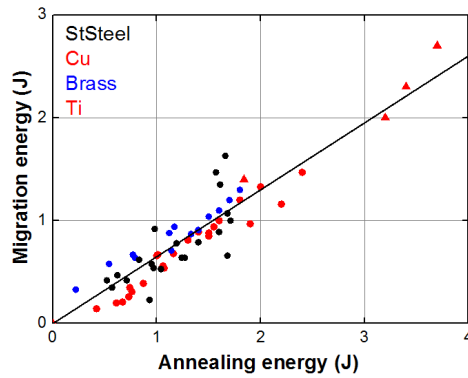


Figure A.8 - Dependence of the energy expended on the migration of vacancies on the defects annihilation energy

Radiation defects annihilation energy was calculated by integrating the power of their annihilation, see Eq. (3.8), and the migration energy is calculated by integrating the migration power, see Eq. (3.12).

The threshold migration energy of vacancies exceeding threshold migration energy of interstitial atoms and vacancies influence on target cooling is shown only at high temperature ($T > 100^{\circ}\text{C}$ for a target from stainless steel), in initial 10-15 s after HIPIB irradiation. Performed studies revealed, that at a high target temperature after an ion beam exposure during initial 3-5 seconds vacancies migration power can exceed experimental power of the energy loss in the target, see figure A.9.

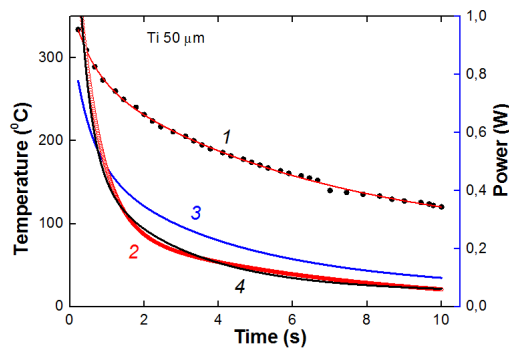


Figure A.9 - Titanium target temperature (1), experimental power of the energy loss in the target (2, points), power of radiative energy flux from the target (3), calculated power of the energy loss in the target, taking into account thermal radiation, annealing and migration of the defects (4, line).

The vacancies migration in stainless steel target is described by the migration model of point defects with threshold activation energy of $(1.4 \pm 0.2) \text{ eV}$ and $K_m = (0.9 - 9) \cdot 10^{21} \text{ J} \cdot \text{K}$ (at different HIPIB energy density). For titanium target the activation energy was $(0.3 \pm 0.1) \text{ eV}$ and $K_m = (1 - 4) \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{K}$. For copper target the activation energy was $(1.4 \pm 0.2) \text{ eV}$ and $K_m = (2 - 4) \cdot 10^{20} \text{ J} \cdot \text{K}$. The received experimental data do not contradict results of other researches. In the case of hcp Ti ($T < 1150 \text{ K}$), the calculations predict the vacancy migration energy $(0.4 - 0.52) \text{ eV}$ [30]. For copper threshold activation energy of vacancy migration is $(0.7 - 1.0) \text{ eV}$, for iron $(1.2 - 1.3) \text{ eV}$ [31].

Under equilibrium conditions, migration of vacancies, like interstitial atoms, does not consume thermal energy of the target, since each vacancy makes a series of displacements between different energetically equal positions in the lattice. Only the migration of a vacancy with an exit on the target surface leads to energy costs. We have obtained results which show that increasing of the target thickness significantly reduces consumption of thermal energy during an initial period of time after ion beam irradiation, figure A.10.

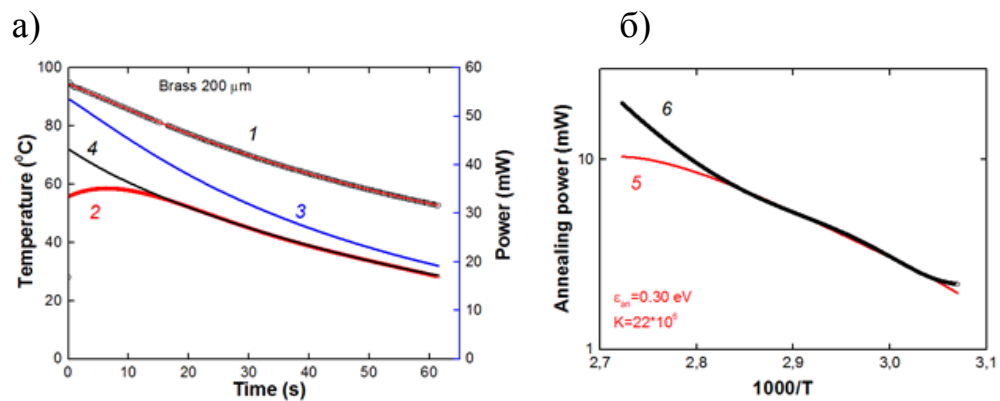


Figure A.10 - Temperature of the brass target $200 \mu\text{m}$ (1), experimental power of the energy loss in the target (2, points), power of radiative energy flux from the target (3), calculated power of the energy loss in the target, taking into account thermal radiation and annealing of the defects (4, line). Calculated (5) and experimental (6) annealing power of radiation-induced defects without taking into account migration of the defects. Change at targets cooling (a) and Arrhenius plots (b)

A.7 Concentration of radiation-induced defects

The obtained experimental data make it possible to calculate the concentration of interstitial atoms after HIPIB irradiation. Assuming that the energy released during fast thermal annealing of one interstitial atom is equal to the threshold energy atom displacement by ion, the concentration of defects is:

$$n_i = \frac{100E_{an}}{\varepsilon_d \cdot N_0}, \quad \% \quad (3.15)$$

The energy of annihilation of interstitial atoms in the target E_{an} can be calculated by integrating the annealing power of radiation-induced defects (Eq. 3.5). Figure A.11 shows the results of calculation of interstitial atoms concentration at $\varepsilon_d=20$ eV. In a case of an elastic collision of accelerated ions with target atoms, the energy transferred at short time (comparable with the period of thermal fluctuations of atoms) and threshold displacement energy of atoms are larger than in equilibrium conditions. Experiments and theoretical estimations show that $\varepsilon_d=(10-30)$ eV [31]. At thermal generation of defects this energy makes some eV [30].

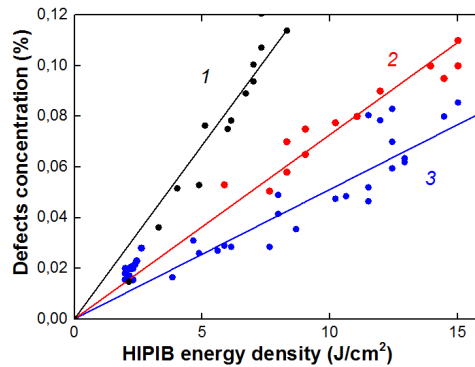


Figure A.11 - Dependence of the average concentration of interstitial atoms in brass (1), copper (2) and stainless steel (3) targets on the HIPIB energy density

The obtained experimental data also make it possible to calculate the vacancies concentration:

$$n_v = \frac{100E_m}{\varepsilon_m \cdot N_0}, \quad \% \quad (3.16)$$

The thermal energy in the target, consumed for migration of vacancies E_m can be calculated by integrating of the experimental migration power in the target (Eq.3.12). In stainless steel target the thermal energy, consumed for migration of vacancies is (12-30) mJ (for the data figure A.6b), threshold activation energy of vacancy migration in iron is (1.2-1.4) eV [31] and see figure A.4, its corresponds vacancies concentration (0,0 1-0,025)%. In copper target $E_m = (50-80)$ mJ, $\varepsilon_m = 1.4$ eV in a copper (see figure A.6) and vacancies concentration is (0,03-0,05)%.

The executed researches have shown, that vacancies concentration in stainless steel and copper targets is equal to interstitial atoms concentration, see figure A.11. It specifies in absence of formation of interstitial clusters in stainless steel and copper at temperature low 150 °C during 30 s after HIPB irradiation. The concentration of ion-radiation-induced defects in a stainless steel target exceeds the equilibrium concentration of point defects of the iron by a factor of 100-200 [30].

In titanium target the thermal energy, consumed for migration of vacancies, is 210 mJ (for the data figure A.6b), it corresponds vacancies concentration 2.2% (at $\varepsilon_m=0.3$ eV, see figure A.7), what considerably exceeds concentration of interstitial atoms, see figure A.11. It can be connected with repeated migrations of one vacancy (on the average 20 migrations), that is not considered in the Eq. (3.14), or with effective formation of interstitial clusters. Analytical study based on an elastic model has shown that the activation energy for migration of interstitial in iron slightly increases with increasing cluster size [32].

References

- 1 Satoh Y., Matsui H. Obstacles for one-dimensional migration of interstitial clusters in iron. *Philosophical Magazine.* – 2009. Vol.89, № 18, P. 1489–1504.
- 2 Satoh Y., Sohtome T., Abe H., Matsukawa Y. & Kano S. Athermal migration of vacancies in iron and copper induced by electron irradiation, *Philosophical Magazine.* – 2017. Vol.97, № 9, P. 638–656
- 3 Satoh Y., Abe Y., Abe H., Matsukawa Y., Kano S., Ohnuki S. & Hashimoto N. Vacancy effects on one-dimensional migration of interstitial clusters in iron under electron irradiation at low temperatures. *Philosophical Magazine.* – 2016. Vol.96, № 21, P. 2219–2242.
- 4 Shimada M., Nakahigashi S., Terasawa M. Swelling of Type 304 Stainless Steel Bombarded with 200 keV C⁺ Ions // *Journal of Nuclear Science and Technology,* – 1976, Vol.13, №.12, P. 743–751.
- 5 Meimei Li, Kirk M.A., Baldo P.M., Donghua Xu and Wirth B.D. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling // *Philosophical Magazine.* – 2012. Vol. 92, №. 16, P. 2048–2078.
- 6 Wirth B.D., Maroudas D., Lucas G.E., Energetics of formation and migration of self-interstitials and self-interstitial clusters in α -iron // *Journal of Nuclear Materials.* – 1997. Vol. 244, № 3, P. 185–194.
- 7 Kizuka Y., Satoh Y., Arai S., and Kiritani M. Identification of the nature of neutron-irradiation-induced defects in copper by means of electron irradiation // *Radiation Effects and Defects in Solids.* - 1998. Vol.145, № 2, P. 143–167.
- 8 Iwase A., Iwata T., Nihira T. & Sasaki S. Defect recovery and radiation annealing in FCC metals irradiated with high-energy ions // *Radiation Effects and Defects in Solids.* – 1992. Vol.124, № 1. P. 117–126.
- 9 Masayuki SHIMADA, Shigeo NAKAHIGASHI & Mititaka TERASAWA Swelling of Type 304 Stainless Steel Bombarded with 200 keV C⁺ Ions // *Journal of Nuclear Science and Technology,* – 1976, Vol. 13, № 12, P. 743–751.

10 Myers M.T., Charnvanichborikarn S., Shao L., and Kucheyev S.O. Pulsed Ion Beam Measurement of the Time Constant of Dynamic Annealing in Si // Physical Review Letters. – 2012. – 109 p.

11 Yuko Kizuka, Yuhki Satoh, Shigeo Arai & Michio Kiritani Identification of the nature of neutron-irradiation-induced defects in copper by means of electron irradiation // Radiation Effects and Defects in Solids, –1998, Vol. 145, № 1, P.143– 167.

12 Van Renterghem W., Konstantinovic M.J., Vankeerberghen M. Evolution of the radiation-induced defect structure in 316 type stainless steel after post-irradiation annealing // Journal of Nuclear Materials 452. – 2014. Vol. 452, P. 158–165.

13 Granberg F., Nordlund K., Ullah M.W., Jin K., Lu C., Bei H., Wang L. M., Djurabekova F., Zhang Y., Weber W. J. Mechanism of Radiation Damage Reduction in Equiatomic Multicomponent Single Phase Alloys // Physical review letters. – 2016. – 116 p.

14 Oberdorfer B., Steyskal E., Sprengel W., Pikart W., Hugenschmidt C., Zehetbauer M., Pippan R., Schmid E., and Wußschum R., In Situ Probing of Fast Defect Annealing in Cu and Ni with a High-Intensity Positron Beam. Physical Review Letters. – 2010. – 105 p.

15 Freysoldt C., Grabowski B., Hickel T., Neugebauer J., Kresse G., Janotti A., Van de Walle C. First-principles calculations for point defects in solids // REVIEWS OF MODERN PHYSICS, – 2014, Vol. 86, P. 253–305.

16 Marian J., Wirth B.D., Perlado J.M., Odette G.R., Diaz de la Rubia T. Dynamics of self-interstitial migration in Fe-Cu alloys // Physical Review B, – 2001. Vol.. 64. P. 78–85

17 Ortiz C. J. and Caturla M. J. Simulation of defect evolution in irradiated materials: Role of intracascade clustering and correlated recombination // Physical Review B, – 2007 Vol. 75. P. 52–67.

18 Cao B. S., Lei M. K. Nonlinear diffusion of interstitial atoms // Physical Review B, –2007. Vol. 76, P. 102–116

19 Guarini G., Schiavini G. M.. Vacancy contribution to the heat content in aluminium, *Philosophical Magazine*. – 1966. Vol 14, № 127, P. 47–52.

20 Setman D., Kerber M.B., Schafler E., and Zehetbauer M.J. Activation enthalpies of deformation-induced lattice defects in severe plastic deformation nanometals measured by differential scanning calorimetry // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2010, Vol. № 41A, P. 810–815.

21 Shimada M., Nakahigashi S., Terasawa M. Swelling of Type 304 Stainless Steel Bombarded with 200 keV C⁺ Ions // *Journal of Nuclear Science and Technology*, –1976, Vol 13, №12, P. 743–751

22 Bringa E.M., Wirth B.D., Caturla M.J., Stölken J., Kalantar D. Metals far from equilibrium: From shocks to radiation damage // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2003. Vol. 202, P. 56–63

23 Davis H.A., Bartsch R.R., Olson J.C., Rej D.J., Waganaar W.J. Intense ion beam optimization and characterization with infrared imaging // *J. Appl. Phys.* – 1997. – Vol. 82. – № 7. – P. 3223.

24 Pushkarev A.I., Isakova Y.I., Xailov I.P., Zhong H. Generation and diagnostics of pulsed intense ion beams with an energy density of 10 J/cm² // *Review of Scientific Instruments*. – 2015. Vol. 86, № 1, P. 75–98.

25 Zhu X.P., Zhang Z.C., Pushkarev A.I., Lei M.K. Ion beam enhancement in magnetically insulated ion diodes for high-intensity pulsed ion beam generation in non-relativistic mode // *Phys. Plasmas*. – 2016. Vol. 23. № 1, – 36 p.

26 Pushkarev A.I., Isakova Yu.I., Khailov I.P. Intense ion beam generation in a diode with explosive emission cathode in self-magnetically insulated mode // *The European Physical Journal D section Plasma Physics*. – 2015. Vol. 69, № 40, –13 p.

27 Pushkarev A.I., Isakova Y.I., Xailov I.P. Stabilization of ion beam generation in a diode with self-magnetic insulation in double-pulse mode // *Laser and Particle Beams*, – 2015, Vol. 33, № 2, P. 283-291.

28 Xiao Yu, Jie Shen, Miao Qu, Haowen Zhong, Jie Zhang, Yanyan Zhang, Sha Yan, Gaolong Zhang, Xiaofu Zhang, Xiaoyun Le. Distribution and evolution of thermal field formed by intense pulsed ion beam on thin metal target // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B –2015, Vol. 365, № A, P. 225–229.

29 Incropera F.P. and Dewitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley, 1990. – 1039 p

30 Wolfgang Stiller Arrhenius Equation and Non-Equilibrium Kinetics. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig. – 1989, – 160 p.

31 R.S. Nelson The use of ion beams to study radiation effects in metals // Contemporary Physics, – 1978, Vol.19, № 6, P. 543 – 569.

32 Trushin J.V. Physical materials technology. - St.-Petersburg: Science, – 2000. 286 p.