

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки Техническая физика
Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Взаимодействие и накопление водорода в циркониевом сплаве, подвергнутом плазменной ионно-иммерсионной имплантации титана

УДК 621.039.517:621.039.58:539.2:539.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Д41	Захарченко С.А.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭФ	Кашкаров Е.Б.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОБД	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2018 г.

**Результаты обучения бакалавров
направления 16.03.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Использовать фундаментальные законы природы и естественнонаучных дисциплин, физико-математический аппарат, методы математического анализа, моделирования, оптимизации и статистики для решения задач в различных отраслях технической физики.	Требования ФГОС (ПК-2, 3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Участвовать в теоретических и экспериментальных исследованиях в различных отраслях технической физики, связанных с современными высокотехнологическими способами обработки материалов, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков; самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий, изучать научно-техническую информацию, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых объектов.	Требования ФГОС (ПК-4, 10, 11, 12, 13). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Владеть основными методами работы с информацией, самостоятельно работать на компьютере в средах современных операционных систем и наиболее распространенных прикладных программ, и программ компьютерной графики, применять современные образовательные и информационные технологии.	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Знать иностранный язык на уровне, позволяющем работать с научно-технической литературой и участвовать в международном сотрудничестве в области технической физики.	Требования ФГОС (ПК-8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Участвовать в производственно-технологической деятельности, определять основные параметры технологических процессов, анализировать свойства физико-технических объектов, изделий и материалов, применять современные информационные технологии, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов и изделий.	Требования ФГОС (ПК-14, 15, 17). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации изделий, элементы экономического анализа производственно-технологических циклов, знать и выполнять правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда.	Требования ФГОС (ПК-16, 18). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, разрабатывать функциональные и структурные схемы элементов и узлов экспериментальных и промышленных электрофизических установок, реализующих современные пучковые и плазменные технологии, проектировать технологические процессы и оборудование с использованием	Требования ФГОС (ПК-19, 20). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	современных информационных технологий.	
P8	Участвовать в организационно-управленческой деятельности, уметь работать в команде и организовывать работу исполнителей, находить и принимать управленческие решения.	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-21, 22, 23). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Внедрять и коммерциализировать результаты исследований и проектно-конструкторских разработок, уметь оценивать инновационный потенциал новой продукции в области современных технологий, основанных на использовании радиационных и плазменных потоков.	Требования ФГОС (ПК-21, 22, 23, 24). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Универсальные компетенции		
P10	Осознавать социальную значимость своей профессии, развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение, повышать свою квалификацию и мастерство, поддерживать здоровый образ жизни	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6, ПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового и профессионального общения, владеть навыками публичной дискуссии, создавать и редактировать тексты профессионального назначения.	Требования ФГОС (ОК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Уметь критически переосмысливать свой накопленный социальный и профессиональный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, следовать этическим и правовым нормам и нести ответственность за последствия своей профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, 7, ПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) Техническая физика
Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОД41	Захарченко Светлане Александровне

Тема работы:

Взаимодействие и накопление водорода в циркониевом сплаве, подвергнутом плазменно-иммерсионной ионной имплантации титана

Утверждена приказом директора (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ol style="list-style-type: none">1. Циркониевый сплав Zr1Nb;2. Установка для пучковой обработки и вакуумно-дугового напыления «Радуга- спектр»;
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Общие сведения о взаимодействии водорода с цирконием (литературный обзор);2. Исследование сорбции водорода циркониевым сплавом до и после плазменно- иммерсионной ионной имплантации (ПИИИ) титана;3. Исследование элементного и фазового состава до и после насыщения водородом циркониевого сплава в зависимости от режимов ПИИИ титана;

	<p>4. Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</p> <p>5. Социальная ответственность;</p>
Перечень графического материала	<p>1. Взаимодействие и накопление водорода в циркониевом сплаве, подвергнутом плазменно-иммерсионной ионной имплантации титана;</p> <p>2. Актуальность;</p> <p>3. Цель и задачи работы;</p> <p>4. Экспериментальная установка;</p> <p>5.Наводороживание образцов;</p> <p>6. Сорбция водорода;</p> <p>7. Рентгеноструктурный анализ;</p> <p>8. Распределение элементов в модифицированном слое;</p> <p>9.Заключение;</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Екатерина Валентиновна
Социальная ответственность	Федорчук Юрий Митрофанович

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭФ	Кашкаров Е.Б.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Д41	Захарченко С.А.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОД41	Захарченко Светлана Александровна

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Техническая физика

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования: материально-технических, финансовых и человеческих</i>	<i>Определение материально-технических, финансовых ресурсов, а также заработной платы исполнителей проекта</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>База данных об окладах исполнителей проекта, районный коэффициент (для Томска – 1,3), нормативы о расходовании электроэнергии</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Ставка на отчисления выплат во внебюджетные фонды учреждений – 27,1%</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Определение целевого рынка ТОТЭ. Анализ конкурентных технических решений. SWOT-анализ</i>
<i>2. Составление графика проведения НИР. Формирование и расчет бюджета исследования</i>	<i>Планирование основных этапов НИР с привязкой к исполнителям. Расчет бюджета научных исследований по основным исполнителям</i>
<i>3. Оценка научно-технического эффекта исследования</i>	<i>Определение коэффициента научно-технического эффекта НИОКР на основе оценок признаков работы</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. График проведения и бюджет НИ 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к. ф. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОД41	Захарченко С.А.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОД41	Захарченко Светлана Александровна

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Техническая физика

Тема дипломной работы: Взаимодействие и накопление водорода в циркониевом сплаве, подвергнутом плазменно-иммерсионной ионной имплантации титана

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Целью данной работы является исследовать процессы взаимодействия водорода с модифицированным поверхностным слоем титана, формируемым методом плазменно-иммерсионной ионной имплантации в циркониевый сплав, при эксплуатационных и сверхвысоких температурах водо-водяных энергетических реакторов.

1. Описание рабочего места на предмет возникновения:

- а) вредных проявлений факторов производственной среды (производственный шум, микроклимат, освещенность)
- б) опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной природы).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:

- а) физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- б) действие фактора на организм человека;
- в) приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
- г) предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).

2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности

- а) механические опасности (источники, средства защиты);
- б) термические опасности (источники, средства защиты);
- в) электробезопасность;
- г) пожаробезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

3. Охрана окружающей среды:

- а) анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);
- б) анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);
- в) анализ воздействия объекта на литосферу (отходы).

4. Защита в чрезвычайных ситуациях:

- а) перечень возможных ЧС на объекте;
- б) выбор наиболее типичной ЧС: 1) сильные морозы и 2) попытка несанкционированного проникновения посторонних на рабочее место;
- в) разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;
- г) разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;
- д) разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.

5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:

- специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- организационные мероприятия при компоновке рабочей зон.

Перечень графического материала:

- 1) Схема размещения светильников в помещении
- 2) План эвакуации рабочих помещений

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Д41	Захарченко Светлана Александровна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 89 с., 19 рис., 19 табл., 104 источника литературы.

Ключевые слова: плазменно-иммерсионная ионная имплантация, наводороживание, циркониевый сплав, сорбция водорода, распределение элементов.

Объектом исследования является циркониевый сплав Zr-1Nb подвергнутый плазменно-иммерсионной ионной имплантации титана.

Цель работы: исследовать влияние плазменно-иммерсионной ионной имплантации титана, в циркониевый сплав Zr-1Nb на скорость поглощения водорода.

В процессе исследования был проведен литературный обзор по диффузии водорода в цирконий, методам защиты циркониевого сплава от водородного охрупчивания. В ходе работы были определены скорости сорбции водорода, образцами циркониевого сплава Zr-1Nb имплантированными титаном, в зависимости от температуры газофазного наводороживания. Изучена структура модифицированного сплава Zr-1Nb и распределение элементов в модифицированном слое.

Установлено, что имплантация титана в циркониевый сплав Zr-1Nb приводит к существенному снижению интенсивности поглощения водорода. До температуры наводороживания 450 °С имплантируемый слой обеспечивает снижение наводороживания сплава. При температуре 800 °С сорбция водорода протекает стремительно, при этом титан из модифицированного слоя диффундирует вглубь циркониевого сплава.

Оглавление	
РЕФЕРАТ	9
Введение.....	12
Глава 1. Взаимодействие Н с Zr.....	15
1.1.Фазовая диаграмма состояний Zr – Н	16
1.2. Абсорбция водорода цирконием	19
1.3. Адсорбция водорода на цирконии	19
1.4. Кинетика абсорбции водорода α -Zr	22
1.5. Термодинамика абсорбции	24
1.5.1. Общие положения	24
1.6. Растворимость водорода в цирконии	29
1.8. Методы защиты циркониевых сплавов от водородного охрупчивания	30
1.9. Плазменно – иммерсионная ионная имплантация	32
Глава 2. Приборы и методы исследования.....	35
2.1. Установка «Радуга-Спектр».....	35
2.2. Насыщение водородом из газовой среды	37
2.3. Оптическая спектрометрия высокочастотного тлеющего разряда «GDProfiler2»	38
2.4. Рентгеновский дифрактометр «XRD-7000S»	39
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	41
4.1.Анализ конкурентных технических решений	41
4.1.2. SWOT-анализ.....	43
4.2.Планирование научно-исследовательских работ	44
4.4. Определение трудоемкости выполнения работ	45

4.5.Бюджет	научно-технического	исследования	(НТИ)	48
4.5.1.Расчет	материальных	затрат	НТИ	49
4.5.2.	Основная заработная плата исполнителей темы	.....		51
4.5.3.	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	....		53
4.6.	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	.....		54
Глава 5. Социальная ответственность.....				55
5.1.	Вредные факторы проектируемой производственной среды.....			55
5.1.2.	Производственный шум	.....		56
5.1.3.	Промышленная санитария	.....		56
5.1.4.	Микроклимат	.....		57
5.1.5.	Расчет искусственной освещенности.....			58
5.2.	Электробезопасность	.....		62
5.3.	Пожаровзрывобезопасность.....			65
5.4.	Охрана окружающей среды	.....		68
5.4.1.	Защита в чрезвычайных ситуациях	.....		69
5.4.2.	Правовые вопросы обеспечения безопасности.....			71
Заключение				72
Список публикаций:				73
Список литературы				74

Введение

Цирконий и его сплавы являются важными конструкционными материалами ядерных реакторов. Циркониевые сплавы используются в ядерных реакторах в качестве оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), корпусов топливных сборок, технологических каналов и др. При эксплуатации реакторов происходит радиолиз теплоносителя (воды) под действием излучения, что приводит к выделению водорода. Таким образом, в результате взаимодействия с водой или паром при высоких температурах (573...673 К) наружная поверхность оболочки окисляется: $Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 4H$ и образующийся атомарный водород растворяется в оболочке. Накопление водорода в оболочках ТВЭЛов в процессе эксплуатации приводит к водородной коррозии и охрупчиванию материала. Наличие высоких температур, давления, механических нагрузок также оказывают влияние на скорость коррозии и деградацию физико-механических свойств циркониевых сплавов.

Проникновение водорода в металлах и сплавах осуществляется через ряд последовательных стадий, таких как физическая адсорбция молекул, их диссоциация на атомы, абсорбция атомов (проникновение атомов в решетку металла или растворение), диффузия в объеме, рекомбинация атомов в молекулы водорода, десорбция молекул. Иногда вводят дополнительные стадии, например, миграцию атомов и молекул по поверхности. В каждом конкретном случае исследования кинетики проникновения водорода в металлах необходимо выяснить лимитирующую стадию процесса, которая может меняться в зависимости от условий эксперимента, – температуры, давления,

состояния поверхности и др. Модифицируя поверхность образца, например, подвергая ее химико-термической, плазменной обработке или нанося различного рода покрытия, можно управлять процессом поглощения водорода, а сравнивая характеристики сорбции при одних и тех же условиях, делать вывод об эффективности метода обработки [1].

Анализ литературных данных показал, что в качестве метода модификации микроструктуры и элементного состава поверхностных слоев конструкционных и инструментальных материалов может быть использована плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ), которая широко используются для модификации поверхности металлических изделий [2–4]. В данном методе модификации на мишень (образец) подается отрицательное импульсное напряжение смещения, которое ускоряет положительно заряженные ионы.

Имплантация ионов, как правило, приводит к изменению элементного состава, кристаллической структуры, размеру зерен, образованию многочисленных дефектов, которые, в свою очередь, влияют на диффузию водорода. Так, например, при формировании вакансионных кластеров предел растворимости водорода в цирконии возрастает [5]. В работе [6] продемонстрировано, что одна вакансия может содержать до девяти атомов водорода. Кроме того, в результате ПИИИ возможно образование интерметаллидных соединений и твердых растворов высокой концентрации [4], которые приводят к изменению физико-механических свойств.

В данной работе в качестве имплантируемого материала в циркониевые сплавы был выбран титан. Это обусловлено тем, что при имплантации титана в сталь, никель, алюминий повышается твердость, улучшаются трибологические свойства и коррозионная стойкость изделий [7 – 10]. Также в работах [11, 12] по исследованию влияния имплантации титана на коррозионную стойкость циркониевых сплавов наблюдается снижение скорости роста оксидного слоя, что возможно связано со стабилизацией оксида циркония при добавлении титана. Одновременное формирование оксидов титана и циркония на

поверхности влияет не только на скорость окисления, но и на сорбцию водорода [13].

Таким образом, есть основание предполагать, что имплантация титана в циркониевые сплавы может привести к снижению скорости сорбции водорода за счет формирования модифицированного слоя, а также обеспечить захват водорода формируемой дефектной структурой. Однако на данный момент влияние имплантации титана в циркониевые сплавы на скорость сорбции водорода при эксплуатационных и повышенных температурах не было изучено.

В соответствии с вышесказанным, целью данной работы является исследование влияния плазменно-иммерсионной ионной имплантации титана в циркониевый сплав Zr-1Nb на скорость поглощения водорода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Механическая обработка образцов циркониевого сплава.
- Подготовка образцов содержащих поверхностно легированный слой Ti.
- Исследование сорбции водорода образцами циркониевого сплава имплантированных титаном.
- Анализ изменения структурно фазового состояния и состава образцов после наводороживания.
- Анализ распределения водорода по глубине модифицированного слоя.

Глава 1. Взаимодействие H с Zr

Цирконий (Zr) представляет собой переходный металл с сильными анизотропными физическими свойствами из-за гексагональной плотноупакованной кристаллической структуры. Он используется в ядерных реакторах из-за низкого поглощения тепловых нейтронов и хорошей коррозионной стойкости при высоких температурах [14]. Почти все ядерные реакторы имеют структурные элементы из циркониевых сплавов [15].

Водород, образующийся при работе реактора, оказывает пагубное влияние на механические свойства циркония [16]. Цирконий может растворять до 450 ppm при температуре 500 °C, но растворимость резко уменьшается до 65 ppm при 300 °C и затем уменьшается до 0,05 ppm при комнатной температуре. Низкая растворимость водорода приводит к образованию хрупких гидридных трембоцитов [17]. Эти гидриды являются хрупкими при приложении напряжения, что сокращает продолжительность эксплуатации ядерных компонентов.

Гидриды играют важную роль в водородном охрупчивании различных циркониевых сплавов [18]. Испытания на ударную вязкость разрушения при растяжении проводились на образцах объемного δ -гидрида, получавшие чрезвычайно низкую вязкость разрушения $\sim 1 \text{ МПа}^{1/2}$ при комнатной температуре [19]. Поскольку гидрид в образцах сплава Zr может содержать дефекты, такие как пустоты или микротрещины, и часто бывает несоответствие между гидридной и циркониевой матрицей, результаты, полученные для чистого гидрида, не могут быть непосредственно применены к гидриду в реакторе.

Видимо, эти гидриды преимущественно осаждаются в $\langle 001 \rangle \alpha\text{-Zr} // \langle 111 \rangle \text{ZrH}_{1,5}$ [20] кристаллографической ориентации. Под воздействием напряжения водород в гидриде начинает диффундировать и, как видно, переосаждается в направлении, перпендикулярном приложенному напряжению [17].

1.1. Фазовая диаграмма состояний Zr – H

В настоящее время известны фазовые диаграммы большинства бинарных систем металл–водород [21].

При этом исследования фазовых состояний в системе Zr–H были одними из первых [22]. Диаграмма фазовых состояний в Zr–H постоянно уточняется; хорошо отработана методика расчета положения линий (границ раздела) на фазовой диаграмме [23].

По состоянию на сегодня принято считать равновесными четыре фазы (рис. 1.1) [24], [25], [26], [27], [28]: твердый раствор водорода в гексагональном плотноупакованном α -Zr; твердый раствор водорода на основе объемноцентрированной кубической высокотемпературной фазы β -Zr; нестехиометрический дигидрид δ -ZrH_{2-y} с гранецентрированной кубической (ГЦК) подрешеткой Zr; а также дигидрид ϵ -ZrH_{2-x} с тетрагональной (ГЦТ, $c/a < 1$), у которого область гомогенности простирается вплоть до стехиометрического состава ($x = H/Zr = 2$). ϵ -фаза образуется из δ -фазы при мартенситном превращении δ -гидрида [28]. Высокотемпературная фаза β -Zr находится в эвтектоидном равновесии с α -Zr(H) и δ -ZrH_{2-y} в точке с координатами $T = 547$ °C и $x = 0,5$. В дополнение к этому при определенных условиях образуется метастабильная γ -фаза с тетрагональной (ГЦТ, $c/a > 1$) решеткой, которая распадается на α -Zr и δ -ZrH_{2-y} с повышением температуры до 255 °C [24].

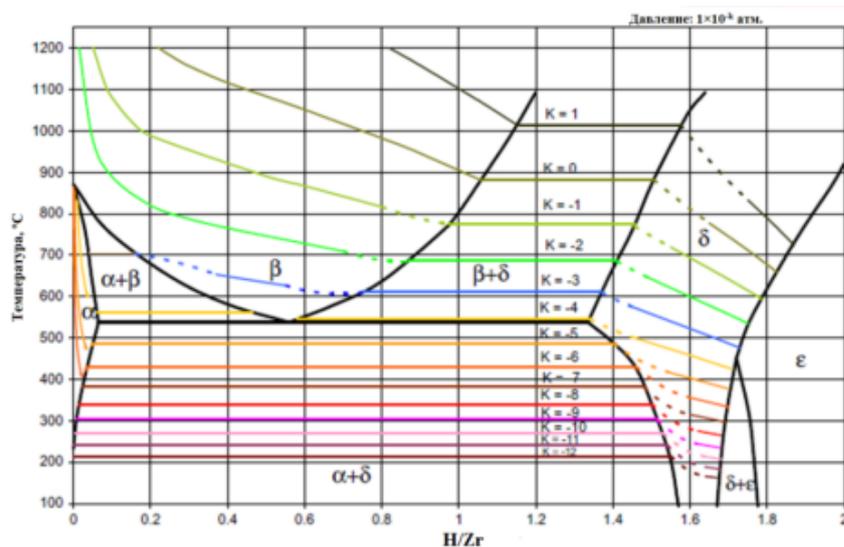


Рисунок 1.1 – Диаграмма фазовых состояний в системе Zr – H.

Кристаллографические данные о фазах систем Zr-H приведены в таблице 1.1.

В зависимости от влияния на полиморфное превращение в Zr все легирующие элементы и добавки подразделяются на α - и β -стабилизаторы. Водород относится к очень сильным β -стабилизаторам: с увеличением концентрации водорода температура перехода $\alpha \rightarrow \beta$ уменьшается с 863°C для нелегированного Zr до $\sim 547^\circ\text{C}$ с концентрацией водорода в Zr ~ 6 ат.% [26], [27].

Таблица 1.1 – Кристаллографические данные

Фаза	Формула	Структура	Символ Пирсона	Пространственная группа	Точечная группа	Параметры решетки
α -Zr	Zr	ГПУ	hP2	$P6_3/mmc$ (№ 194)	D_{6h}^{17} ; $6/mmm$	$a=0.3232$ нм; $c=0.5147$ нм[29]
β -Zr	Zr	ОЦК	cI2	$Im\bar{3}m$ (№229)	O_h^2 ; $m\bar{3}m$	0.36090 нм при 862°C , 0.35453 нм при 20°C [30]
δ	$ZrH_{1,66}$	ГЦК	cF14	$Fm\bar{3}m$ (№225)		0.4781 нм[29]
ϵ	ZrH_2	ГЦТ	tI6	$14/mmm$ (№ 139)	D_{4h}^{19} ; $4/mmm$	$a=0.3520$ нм; $c=0.4450$ нм [29]
Метастабильные фазы						
γ	ZrH	ГЦТ	tP6	-	-	$a=0.3520$ нм; $c=0.4450$ нм [29]

Насыщение циркония водородом при температуре, несколько меньше температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода (например, при 800 °С), вызывает концентрационное превращение, заключающееся в переходе из области α -фазы в двухфазную ($\alpha + \beta$)-область, далее с переходом в однофазную β -область при дальнейшем увеличении концентрации водорода [31].

В α -Zr термическая растворимость водорода очень мала, она составляет ~6 ат. % (~600 ppm) при температуре эвтектоидного превращения и быстро уменьшается при понижении температуры (рис. 1.2) [23]. При комнатной температуре растворимость водорода α -Zr не больше 1 ppm [26].

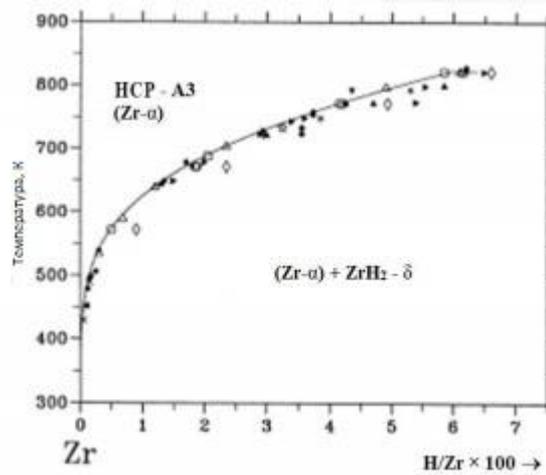


Рисунок 1.2 – Термическая растворимость водорода в α -Zr [23]

Кирнс [32] систематизировал и проанализировал данные о термической растворимости водорода в Zr, получены результаты исследований поглощения и диффузии водорода в цирконии в изотермических условиях. Он получил следующее уравнение, описывающее температурную зависимость водорода на границе $\alpha/\alpha + \delta$ ($C_H^{\alpha-\delta}$):

$$C_H^{\alpha-\delta} = 1.61 * 10^5 \exp\left(-\frac{37447}{RT}\right),$$

где $C_H^{\alpha-\delta}$ - концентрация водорода на границе $\alpha/\alpha + \delta$ (ppm); R – газовая постоянная ($R = 8,314462$ Дж / (моль · К)).

1.2. Абсорбция водорода цирконием

Под абсорбцией (растворением, поглощением, окклюзией) водорода металлом обычно подразумевается переход водорода из H_2 в металл. Под термином абсорбированный водород понимается весь поглощенный водород, находящийся как в твердом растворе, так и в гидридах. Растворимость – предельное содержание водорода в твердом растворе. Водородная ёмкость – предельное количество водорода, которое способен поглотить рассматриваемый металл.

Процесс абсорбции водорода включает несколько стадий:

- приход молекулярного водорода к поверхности;
- накопление молекул водорода на поверхности и их диссоциация (физическая адсорбция, диссоциация и химическая адсорбция (хемосорбция) молекул водорода);
- перераспределение атомов водорода по объему (диффузия);
- образование гидридов по достижении предела растворимости водорода в гидридообразующих металлах, к которым относится и цирконий.

1.3. Адсорбция водорода на цирконии

Основные реакции на поверхности газа / металла показаны на рис. 1.3

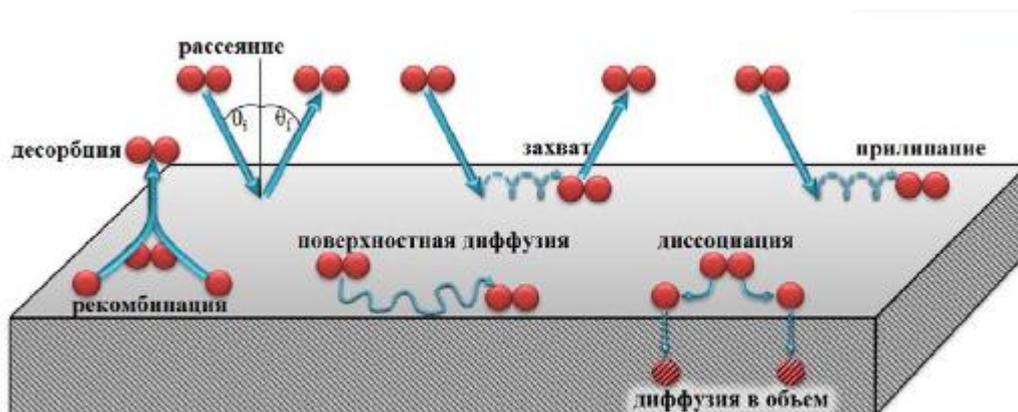
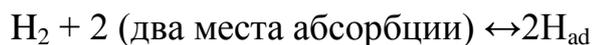


Рисунок 1.3 – Реакция на границе раздела газ/поверхность

Реакция адсорбции:



Следует отметить, что не существует особых сил, вызывающих адсорбцию [33]. Адсорбция молекул водорода на поверхности твердого тела происходит за счет сил притяжения молекул водорода поверхностными атомами адсорбента. Молекулы газа могут адсорбироваться на поверхности как за счет физической, так и химической адсорбции. Физическая адсорбция основана на взаимодействии Ван-дер-Ваальса между молекулярным водородом и атомами адсорбента. В этом процессе молекула водорода взаимодействует с несколькими атомами адсорбента. Потенциальная энергия молекулы имеет минимум на расстоянии приблизительно один радиус молекулы адсорбата (0,2 нм) [34], [35]. Энергия физической адсорбции обычно отрицательная, её значение по модулю не превышает 20 кДж/моль Н (-0,2 эВ). Для многих металлов энергия физической адсорбции близка к -5 кДж/моль Н (-0,05 эВ) [34]. Поскольку взаимодействие слабое, значительная физическая адсорбция имеет место только при низких температурах (<273 К) [35], [36].

Другая стадия реакции металл-водород (М-Н): молекула водорода диссоциирует, и атомный водород преодолевает энергетический барьер. Этот процесс известен как хемосорбция. Его энергия обычно отрицательна, а значения составляют от -20 до -400 кДж/моль Н. Для многих металлов и для углерода энергия хемосорбции близка к -50 кДж/моль Н [34].

При диссоциации и преодолении энергетического барьера атомы водорода диффундируют в объем.

Диаграмма связи молекулярной водородной потенциальной энергии и реакции взаимодействия между молекулярным и атомарным водородом с атомами металла показана на рис. 1.4 [37].

Цирконий относится к металлам с очень активной химической адсорбцией [38], [39]. Наито [39] определил кинетические параметры адсорбции водорода, энергия адсорбции водорода на поликристаллическом α -Zr равна -2,84 эВ; сила сцепления атомов подповерхностного слоя с их

окружением лишь незначительно отличается от силы сцепления поверхностных атомов (разность энергий связи составляет всего 0,06 эВ); энергия активации адсорбции атомов водорода равна -0,02 эВ, энергия атомной диффузии на объем равна 0,475 эВ. Полученные результаты показывают, что водород легко проникает в цирконий, а процесс адсорбции водорода цирконием контролируется объемной диффузией атомов водорода. Согласно теоретическим оценкам, приведенным в [40], энтальпия хемосорбции водорода на цирконии, как в тетраэдрической, так и в октаэдрической пустотах, для двух поверхностных слоев равна -3,00 эВ.

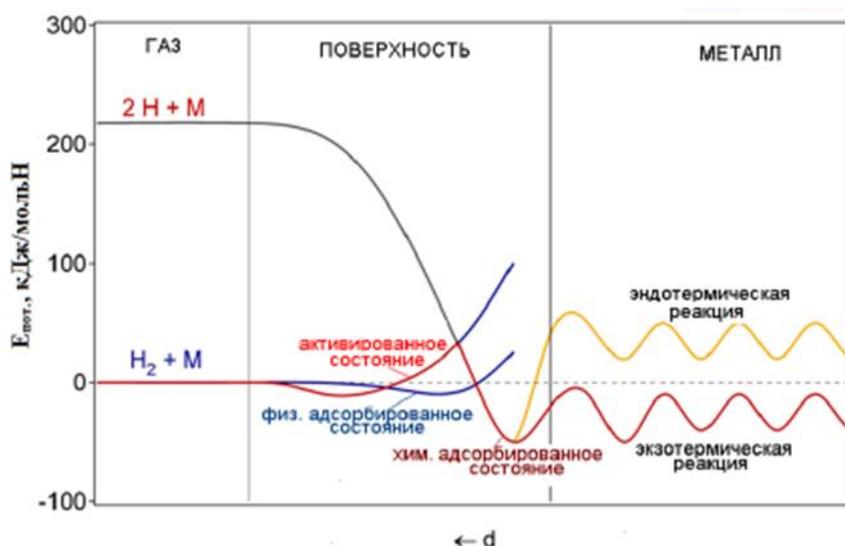


Рисунок 1.4 – Схема энергии и реакций потенциала молекулярного и атомного водорода и потенциальная энергия атомарного водорода с атомами металла. При физической адсорбции взаимодействие определяется силами Ван-дер-Ваальса. Перед объемной диффузией H_2 диссоциирует для создания адсорбированного состояния [34], [37].

Согласно теоретической оценке П. Чжана и его коллег [40], процесс адиабатической диссоциации в системе $H_2/Zr(0001)$ имеет низкий барьер (0,05 эВ) вдоль почти стабильных энергетических каналов; диссоциация молекул H_2 на атомы происходит на расстоянии 0,2 нм над поверхностью $Zr(0001)$.

1.4. Кинетика абсорбции водорода α -Zr

В ряду переходных металлов наилучшими абсорбентами являются первые члены, d-зона которых заполнена менее чем наполовину [41]. По мере заполнения d-зоны электронами абсорбционные возможности металла убывают. Исключение составляет палладий, атомы которого содержат 10 d-электронов, но который является хорошим абсорбентом. В полном соответствии с данной закономерностью цирконий легко абсорбирует водород (рис. 1.5) [42], [43], [44], [45].

Кинетика абсорбции водорода цирконием (изменение количества накопленного водорода со временем при заданной температуре и давлении) исследована в работах [46], [47], [48]. В подавляющем большинстве работ сообщается, что количество водорода, абсорбированного в α -Zr, изменяется со временем по параболическому закону:

$$C_H^2 = k_{ab}t$$

где C_H – количество поглощенного водорода, k_{ab} – параболическая скоростная константа:

$$k_{ab} = k_0 \exp\left(\frac{-E_{ab}}{RT}\right)$$

E_{ab} – энергия реакции абсорбции водорода α -цирконием.

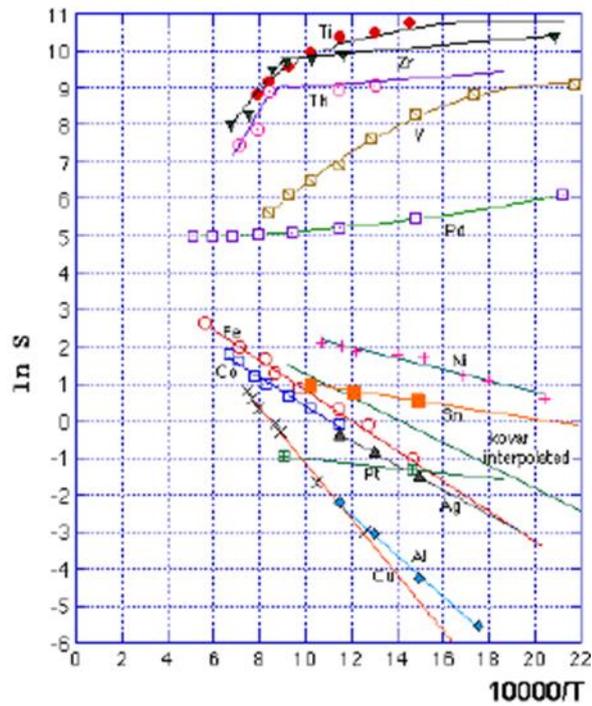


Рисунок 1.5 – Зависимость $\ln S$ (S – количество водорода в см^3 , которое способно поглотить 100 г металла при 1 атм) от температуры [45].

Согласно [47] при температурах в интервале 250...425 °С и давлении 1 атм. реакция абсорбции водорода цирконием подчиняется параболическому закону; параболическая скоростная константа $[(\text{мл}/\text{см}^2)^2 \text{ за секунду}]$ рассчитывается из уравнения:

$$k_{ab} = 2,3 * 10^5 \exp\left(\frac{-71964,8 \mp 836,8}{RT}\right),$$

где R – газовая постоянная ($R = 8,31467 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$), а $(71,9648 \pm 0,8368) \text{ кДж}/\text{моль}$ – энергия реакции абсорбции водорода $\alpha\text{-Zr}$.

Некоторые коррективы в кинетику абсорбции могут внести состояние поверхности и окисление в процессе гидрирования [48].

Зависимость скорости абсорбции водорода цирконием (на начальном этапе гидрирования) проходит через максимум при 500 °С [49].

С увеличением времени гидрирования количество абсорбированного водорода выходит на насыщение.

При определенном давлении абсорбционные возможности циркония уменьшаются с повышением температуры (см. рис. 1.5) [42], [43], [44], [45], что

свойственно всем экзотермическим реакциям (энтальпия растворения водорода цирконием отрицательная).

При атмосферном давлении и температуре 20 °С предельное количество абсорбированного цирконием водорода составляет 240 см³ водорода на 1 г циркония. При 400, 800 и 1100 °С эта величина соответственно равна 235, 160 и 40 см³/г [43].

Оптимальная температура гидрирования циркония 300...400 °С [42].

В отличие от азота и кислорода почти весь поглощенный водород может быть удален из циркония при нагреве в вакууме до температуры 1000...1200 °С [42].

1.5. Термодинамика абсорбции

1.5.1. Общие положения

Исходя из характера химических связей, согласно принятой классификации все соединения М–Н (металл–водород) подразделяются на три основных класса:

- ионные гидриды (соли);
- металлические гидриды;
- ковалентные гидриды (молекулярные соединения).

В полном соответствии с положением Zr в периодической таблице Менделеева (рис. 1.6) гидриды циркония относятся к металлическим [50].

Исследование изменений структуры металла при гидрировании свидетельствует [51], что внедрение водорода в решетку металла может:

- сопровождаться принципиальной перестройкой металлической решетки или, иными словами, изменением типа упаковки металлических атомов, например, переходом от объемноцентрированной кубической (ОЦК) упаковки в структуре индивидуального металла к гранецентрированной кубической (ГЦК) упаковке в металлической подрешетке гидрида;

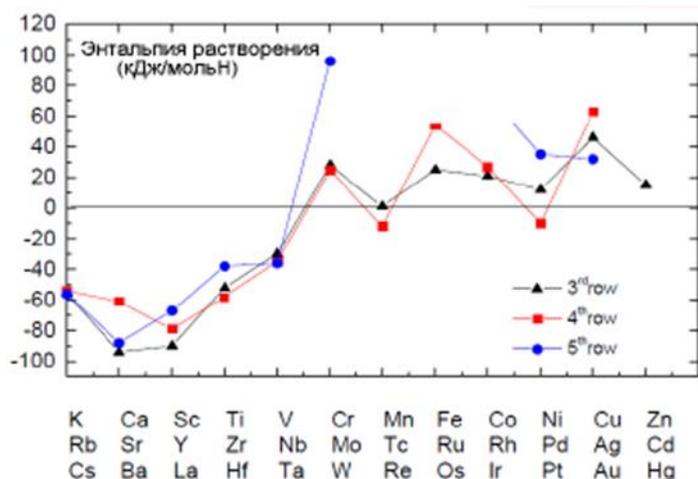


Рисунок 1.7 – Изменение энтальпии растворения в ряду 3d, 4d и 5d переходных d-металлов [54].

Термодинамическое равновесие в системе металл–водород (М–Н) обычно представлено диаграммой давление–состав–температура P–C–T (изотермой давление–состав). Обычный вид изотермы давление–состав схематически показан на рис. 1.8.

Начальный крутой подъем соответствует растворению водорода в исходной фазе (обычно обозначаемой α). В этой области (вплоть до предела растворимости) растворение водорода происходит без существенных изменений α -решетки, и зависимость концентрации водорода (СН) от давления описывается уравнением Сиверта:

$$C_H^\alpha = K_H^\alpha \sqrt{P_{H_2}},$$

где K_H – константа Сиверта (константа растворения водорода в α -фазе); C_H^α – концентрация водорода в твердом растворе; P_{H_2} – давление водорода над металлом.



Рисунок 1.7 – Схематическое представление изотермы давление–состав.

По достижении предела растворимости в α -фазе начинается образование гидридов из пересыщенного твердого раствора α -фазы [36].

Температурная зависимость равновесного давления над металлом на этапе растворения водорода в твердом растворе исходной фазы описывается уравнением [54]:

$$\frac{1}{2} \ln \frac{P_{H_2}}{P_0} = \frac{\Delta H_s}{RT} - \frac{\Delta S}{R},$$

где P_0 – стандартное давление (1 атм).

Энтальпия растворения водорода в α -Zr $\Delta H_s = -58$ кДж/моль Н (-0,601 эВ) [54].

По достижении предела растворимости водорода в α -фазе начинается образование гидридов. С появлением второй фазы давление над гидрируемым металлом (оно в равновесии с внутренним давлением в твердом растворе) не изменяется, и дальнейшее увеличение количества абсорбированного водорода идет без повышения давления (область $\alpha \rightarrow \beta$ -перехода). Концентрация водорода в каждой из фаз остается постоянной, однако изменяется объемная доля каждой из фаз. Равновесное давление гидридообразования ($\alpha(H_x) \rightarrow \alpha + \beta$) описывается уравнением ван'т-Гоффа [34], [35], [36]:

$$\ln \frac{P_{eq}}{P_0} = \frac{\Delta H_f}{RT} - \frac{\Delta S_f}{R},$$

где P_{eq} – давление водорода над металлом в двухфазной области α - β (на плато, см. рис. 1.6 и рис. 1.7); ΔH_f и ΔS_f – энтальпия и энтропия гидридообразования.

Если логарифм давления при гидридообразовании построить в зависимости от $1/T$, то получим линию (график ван'т Гоффа), как это представлено на рис. 1.8. Из наклона этой зависимости определяют энергию активации образования гидридов из пересыщенного твердого раствора в α фазе.

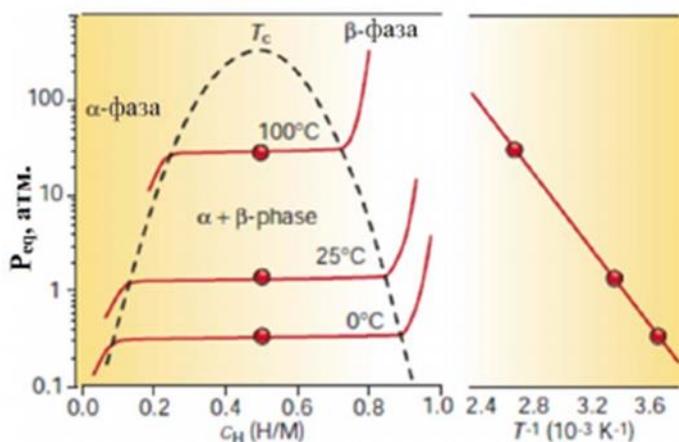


Рисунок 1.8 – Схематическое представление диаграммы P–C–T и график ван'т Гоффа: α – твердый раствор водорода в α -фазе; β – фаза; $\alpha + \beta$ – область двухфазного состояния [34], [35], [55].

Так как изменение энтропии в основном обусловлено изменением состояния водорода от молекулярного в газообразном состоянии до диссоциированного в абсорбированном и это практически стандартная энтропия водорода ($S_0 = 130$ Дж/моль $H_2 \cdot K$), то, следовательно, $\Delta S_f \approx -130$ Дж/моль $H_2 \cdot K$ для всех систем M–H [27], [35].

Наименьшую стабильность имеют гидриды $FeH_{0,5}$; $NiH_{0,5}$ и $MoH_{0,5}$ с энтальпией образования $\Delta H_f = +20$ кДж/моль H_2 , $\Delta H_f = +20$ кДж/моль H_2 и $\Delta H_f = +92$ кДж/моль H_2 соответственно [35].

По завершении перехода от α к β имеет место растворение водорода в гидриде.

Иногда изотерма давление–состав имеет несколько плат, свидетельствующих о том, что при абсорбции водорода система М–Н проходит несколько этапов двухфазного состояния.

1.6. Растворимость водорода в цирконии

Водород находится в цирконии в растворенном виде до того момента, пока концентрация поглощенного водорода не достигнет точки предела растворимости (ПРТ). В этом случае раствор становится насыщенным. В результате избыток водорода выделяется в виде гидридов [56–59]. Температура, при которой образуются гидриды, называется температурой ПРТ. Низкая растворимость водорода в цирконии приводит к образованию хрупких гидридов [60]. Снижение растворимости водорода с увеличением температуры также характерно для ниобия и титана.

При воздействии радиационного облучения на циркониевые сплавы предел растворимости водорода возрастает [61, 58, 62, 63]. Это может быть связано с захватом дефектами водорода, создаваемыми при облучении, в частности вакансионными кластерами [61]. В работе [64] было показано, что одна вакансия может содержать до девяти атомов водорода.

Водород диффундирует в ГПУ структуру циркония через тетраэдрические и октаэдрические поры. ГПУ цирконий имеет две тетраэдрические и одну октаэдрическую пору [65]. Существует ряд предположений относительно положения атомов водорода в порах. Самый простой геометрический критерий, основанный на рассмотрении устойчивости упаковки твердых сфер. В основе метода лежит зависимость координационного окружения от отношения R_H/R_M (R_H , R_M – радиусы атомов водорода и металла) [66, 67]. Авторы полагают [66], что при $0,41 R_H/R_M \leq 0,73$ преимущественно заполняются октаэдрические поры, в то время как при $0,22 R_H/R_M \leq 0,41$

процесс насыщения металла водородом начинается с заполнения тетраэдрических пор. В α -Zr $R_H/R_{Zr}=0,2875$, поэтому атомы водорода в первую очередь заполняют тетраэдрические поры.

1.8. Методы защиты циркониевых сплавов от водородного охрупчивания

Большинство работ по предотвращению коррозии и снижению водородопроницаемости циркониевых сплавов связано с нанесением защитных покрытий на основе оксидов и нитридов металлов. Так покрытия Al_2O_3 являются химически стабильными и обладают низкой скоростью роста при высоких температурах [68]. Однако, сформированный слой Al_2O_3 на поверхности циркониевых сплавов склонен к растрескиванию в процессе загрузки ядерного топлива из-за его хрупкости.

Покрытия оксида титана TiO_2 и оксида циркония ZrO_2 вызывают большой интерес исследователей, благодаря наличию таких свойств, как коррозионная стойкость, низкий коэффициент диффузии водорода, термическая стойкость. Однако, несмотря на ряд преимуществ, данные покрытия обладают низкой адгезией и стойкостью к высокотемпературному окислению. Более того, при фазовых переходах происходит локальное увеличение объема, что приводит к образованию микротрещин.

В ряде работ [69, 70] для защиты конструкционных материалов предлагаются нитридные покрытия ZrN , CrN и TiN и их комбинации. Как известно, что данные покрытия, обладают высокими показателями износостойкости, твердости, термической стойкости, а также коррозионной стойкостью. Ранее в работах [71, 72], покрытия TiN , сформированные вакуумными ионно-плазменными способами, было продемонстрировано существенное снижение диффузии водорода сквозь мембраны из никеля и нержавеющей стали. Тонкие пленки нитрида титана, нанесенные на оболочки

ТВЭЛов стали HT-9 и MA957, существенно увеличивают механическую прочность сплавов, термостойкость, а также образуют диффузионный барьер для проникновения ядерного топлива вглубь оболочки ТВЭЛа [73]. Защитное покрытие нитрида титана образует на поверхности тонкий оксидный слой. Формирование оксидной пленки, образующейся на TiN покрытиях, дополнительно увеличивает коррозионную стойкость [74]. Несмотря на ряд преимуществ, для данных покрытий характерна проблема адгезионной стойкости.

Положительное влияние на коррозионную стойкость и защиту от водородного охрупчивания оказывает добавление иттрия в циркониевые сплавы. Так в работах [75, 76] приведено влияние добавление иттрия различных концентрации (0,1–0,2 масс.%) на сорбцию водорода сплавами Zr–1Nb и Zr–2,5Nb. В процессе насыщения водородом при температуре 400 °С в течение 6 ч концентрация водорода уменьшилась более чем в два раза по сравнению с исходным Zr–1Nb при добавлении 0,2 масс.% иттрия. Наблюдается так же снижение образование внутризеренных гидридов. Однако при варьировании соотношения иттрия/ниобия и повышении рабочей температуры наблюдается улучшение коррозионной стойкости и снижение водородной стойкости [75].

Последнее время широкое распространение получили методы модификации поверхности электронными и ионными пучками, лазерным облучением, ионной имплантацией [77, 78]. Уменьшение водородопроницаемости данными методами связано с изменением микроструктуры приповерхностного слоя. К одному из таких методов относится ПИИИ. Во время ПИИИ на мишень (образец) подается высокий отрицательный импульс напряжения смещения, который ускоряет положительно заряженные ионы [79]. Имплантация приводит к изменению элементного состава, микроструктуры, переносу и перераспределению вакансий и примесей в имплантированном слое, также влияет на механические свойства модифицируемого материала [80]. Кроме того, в результате модификации образуются интерметаллидные соединения и твердые растворы

высокой концентрации [81, 82]. Данный метод модификации исключает проблему адгезионной прочности, что является существенным критерием для тонкопленочных покрытий. Известно, что при имплантации титана в стали, никель, алюминий повышается твердость, улучшаются трибологические свойства, повышается коррозионная стойкость [83, 84].

1.9. Плазменно – иммерсионная ионная имплантация

В качестве источника ионов использовали вакуумно – дуговой разряд. ПИИИ является методом модификации поверхности ускоренными ионами из плазмы дугового разряда путем применения высокого напряжения импульсного тока. ПИИИ позволяет внедрять ионы в объемные мишени различной формы, а также модифицировать глубокие слои материалов. Во время ПИИИ в вакуумной камере в газоразрядной плазме формируются ионы, которые ускоряются и имплантируются в образец при прохождении через держатель образца высокочастотного импульсного напряжения. Основным отличием данного метода от ионной имплантации является воздействие импульса потока ионов высокой плотности на поверхность образца. Высокая плотность ионных потоков и быстрота набора дозы (в течение первой микросекунды имплантируется доза 10^{11} ион/см²) приводят к разогреву образцов в интервале температур 100...950 °С [85].

ПИИИ широко применяется в обработке полупроводников, металлов и сплавов, используемых в деталях, работающих при высоких нагрузках, а также в производстве имплантатов, имеющих сложную форму.

Получение тонкопленочных покрытий из плазмы дугового разряда проходит по следующей схеме, вакуумная дуга, возникающая между катодом и анодом, испаряет материал катода. Дуговой разряд низкого давления горит в быстро перемещающихся катодных пятнах. Продукт эрозии – поток ионов материала катода. Осаждение из плазмы испаряемого материала происходит

при высоких и управляемых энергиях, это обеспечивает нагрев и термоактивацию подложки в процессе осаждения покрытия, предварительную очистку подложки за счет ионной бомбардировки, высокую точность и воспроизводимость. В вакуумно-дуговом методе подложка может сильно нагреваться, поэтому данный метод не подходит для осаждения тонких пленок на легкоплавкие материалы.

Одним из недостатков вакуумной дуги является наличие микрокапель в плазме (рисунок 1.10), которые представляют собой частицы металла размером от 0,1–10 мкм, испаряемых из катодного пятна. Микрокапли осаждаются на подложку, что ведет к снижению эксплуатационных характеристик покрытия: износостойкости, коррозионной стойкости [86, 87]. Современные установки сводят этот фактор к минимуму: снижают размер и количество микрокапельных фаз. Для устранения микрокапельных фаз используют плазменные фильтры (ПФ).

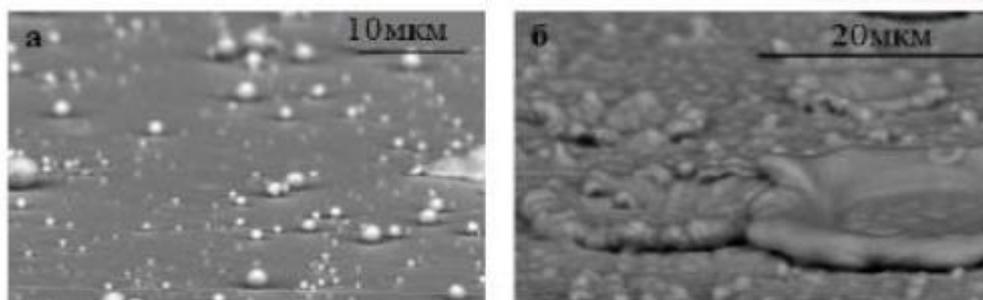


Рисунок 1.10 – Микрокапли на поверхности титана, осажденные при вакуумно-дуговом испарении катодов: а) титана, б) алюминия [87]

Для управления дугой используют электромагнитное поле, которое контролирует перемещение дугового разряда по катоду, для достижения равномерной эрозии. Так же это снижает количество микрокапель.

Метод вакуумно-дугового осаждения обеспечивает высокую адгезию и скорость осаждения покрытий (~10 мкм/ч), благодаря высокой степени ионизации плазмы (20–100 %) и высокой плотности тока, по сравнению с магнетронным распылением, имеет широкий диапазон рабочего давления (10^{-1} – 10^{-4} Па) [88–90].

Как мы видим, на сегодняшний день проблема водородного охрупчивания не решена, несмотря на многообразие методов защиты циркониевых изделий от проникновения водорода. Наиболее оптимального метода, снижающего диффузию водорода в циркониевые изделия и удовлетворяющего эксплуатационным требованиям, не разработано. Каждый рассмотренный выше способ имеет как недостатки, так и преимущества.

Глава 2. Приборы и методы исследования

Имплантация титана в мишень из циркониевого сплава Zr-1Nb проводили методом ПИИИ с использованием установки «Радуга-Спектр». Образцы с размером $20 \times 20 \times 0,5$ мм предварительно шлифовались до средней шероховатости $R_a 0,045$ мкм. Остаточное давление в камере составляло $2,5 \times 10^{-3}$ Па. Непосредственно перед имплантацией, проводилась ионная очистка поверхности образцов в плазме тлеющего разряда (аргона) при напряжении 1500 В в течение 5 мин. В качестве материала катода использовался титан марки VT1-00 (99,95 %). Параметры имплантации: давление в камере 0,17 Па (аргон), ток дуги 70 А, напряжение смещения 1500 В, время имплантации 15 мин.

Гидрирование образцов проводилось на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller при разной температуре 360 °С, 400 °С, 450 °С, 800 °С, давлении водорода в камере 2 атм. до концентрации 700 ppm. Изучение элементного состава образцов проводилось с помощью оптической спектроскопии плазмы тлеющего разряда (GD-OES) с использованием установки GD-Profilер 2 фирмы Horiba. Рентгеноструктурный анализ был проведен на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (излучение $\text{CuK}\alpha$).

2.1. Установка «Радуга-Спектр»

Установка «Радуга-Спектр» предназначена для реализации гибридных технологий ионно-плазменной модификации свойств поверхностных слоев, а также для нанесения покрытий из газоразрядной, магнетронной плазмы и плазмы дугового разряда. Возможна очистка поверхности от загрязнений из плазмы тлеющего разряда. Схема установки представлена на рис. 2.1. Для уменьшения нагрева при ионном облучении образцы устанавливались на массивный металлический держатель.

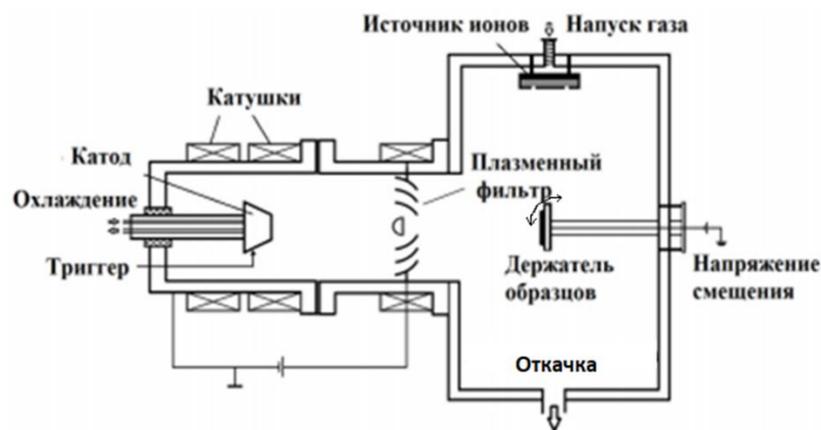


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки «Радуга-Спектр»

Технические данные установки. Размеры рабочей камеры: диаметр – 600 мм, высота 600 мм; предельное остаточное давление в камере: $6,6 \cdot 10^{-4}$ Па; рабочее давление $6,5 \cdot 10^{-2}$ – $6,5 \cdot 10^{-1}$ Па; время откачки до давления $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па 30 мин.

На данной установке возможна реализация режима ионной очистки и активации поверхности обрабатываемых изделий вакуумно-дуговым генератором плазмы непрерывного действия. В качестве источника ионов для очистки поверхности используются ионы Ag. Скорость распыления достигает 20 нм/мин при ускоряющем напряжении 3,5 кВ. Диаметр ионного пучка составляет 100 мм. Параметры вакуумно-дугового испарителя с плазменным фильтром. Материал катода – любые электропроводящие металлы; ток разряда 40–200 А; напряжение холостого хода 70 В; диаметр плазменного потока 200 мм; потребляемая мощность до 4,5кВт. В «Радуга-Спектр» установлен плазменный фильтр жалюзийного типа. На рисунке 2.2 представлено изображение данного фильтра.

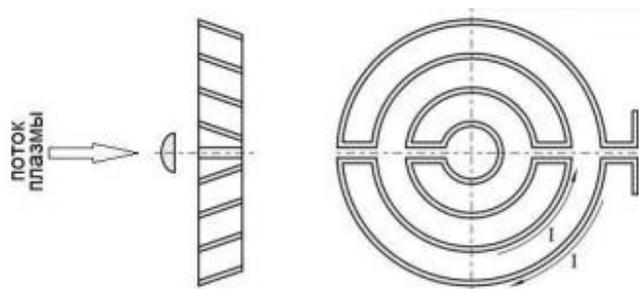


Рисунок 2.2 – Конструкция плазменного фильтра жалюзийного типа [91]

Подробное описание жалюзийного фильтра изложено в работе [92].

2.2. насыщение водородом из газовой среды

Для насыщения образцов из газовой атмосферы водорода использовался автоматизированный комплекс «Gas Reaction Controller». В установке предусмотрены два вида реакционных камер: маленькая, объемом 2 см³ и большая, объемом 175 см³. Температура образца регулируется в диапазоне от 20 до 900 °С. В каждой из камер установлены термопары для отслеживания температуры непосредственно в реакционной камере.

Принцип работы данной установки можно понять по схеме, представленной на рисунке 2.3.

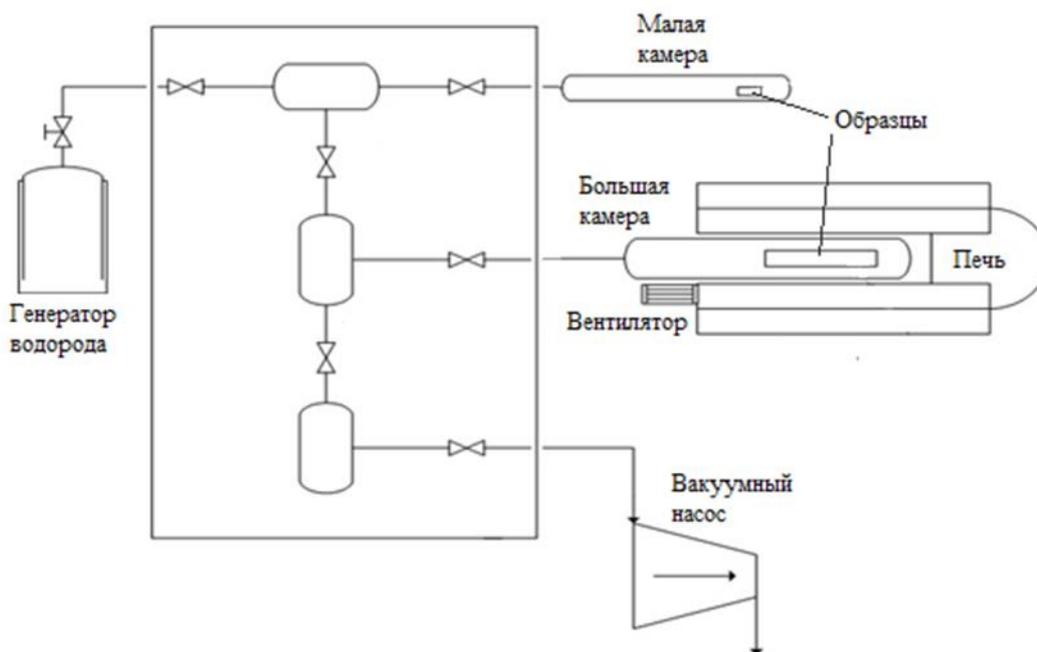


Рисунок 2.3 – Схема автоматизированного комплекса «Gas Reaction Controller»

Процесс насыщения водородом осуществляется следующим образом. Первоначально исследуемый образец помещается в камеру для насыщения.

Затем происходит вакуумирование камеры с образцом и нагрев до необходимой температуры с заданной скоростью нагрева. Напуск водорода осуществляется открытием соответствующих клапанов между генератором водорода и соответствующей камерой. Образцы выдерживаются необходимое время в среде водорода. Завершив процедуру наводороживания, производится отключение печи, и последовательно открываются клапана от вакуумного насоса для откачки водорода и остывания системы.

2.3. Оптическая спектроскопия высокочастотного тлеющего разряда «GDProfiler2»

Оптический спектрометр высокочастотного тлеющего разряда «GDProfiler2» представляет собой оптический эмиссионный спектрометр плазмы тлеющего разряда. На рис.2.4 представлен внешний вид «GDProfiler2».

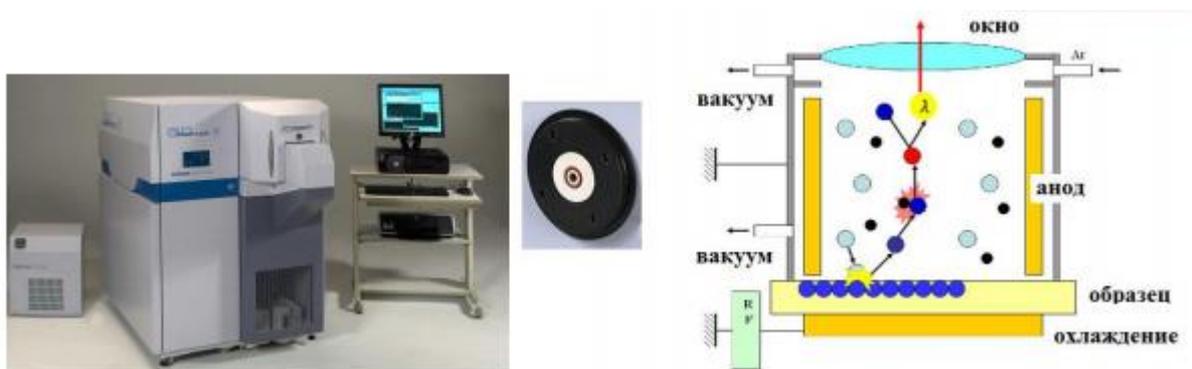


Рисунок.2.4 – Внешний вид (слева) и принцип работы «GD-Profiler2» (справа)

Принцип работы «GD-Profiler2» основан на контролируемом распылении атомов с поверхности образца под воздействием ионов аргона, бомбардирующих площадь диаметром несколько миллиметров (рис. 2.4). Анод представляет собой медную трубку диаметром, как правило, 4 мм. Катодом является образец, располагаемый перед анодом и отделенный от анода керамикой с кольцевым уплотнением. Образец прикладывается к кольцевому

уплотнению. Пространство внутри анода вакуумируется, после чего в трубку поступает аргон. Под воздействием электрического поля ионы аргона ускоряются и движутся к образцу, обладая достаточной энергией для распыления поверхности образца. Распыленные частицы, в свою очередь, поступают в плазму и возбуждаются через соударения. Возникающая оптическая эмиссия характеризует элементный состав образца.

Для поддержания плазмы тлеющего разряда в спектрометре Profiler-2 используется радиочастотный генератор. Генератор работает на частоте 13,56 МГц и может функционировать в импульсном режиме, что дает возможность анализировать хрупкие и низкотеплопроводные образцы. Геометрия источника тлеющего разряда сконструирована так, что распыляется только образец. Глубина распыления зависит от типа образцов и, как правило, лежит в диапазоне от нескольких нм до 150–200 мкм. В спектрометрах GD-Profiler2 используется полихроматор Пашена-Рунге высокого разрешения. Спектральный диапазон спектрометра GD-Profiler2 достаточно широк от 120 до 766 нм.

2.4. Рентгеновский дифрактометр «XRD-7000S»

Для определения фазового состава использовался рентгеновский дифрактометр XRD-7000 (Shimadzu, Япония). В таблице 2.1 представлены технические характеристики дифрактометра.

Таблица 2.1 – Технические характеристики дифрактометра XRD-7000

Рентгеновская трубка	
Материал и тип анода	Cu , Co , Fe , Cr
Размеры фокуса и максимальная мощность	1,0 x 10,0 мм; максимальная мощность 2,0 кВт; 0,4 x 12,0 мм; максимальная мощность 2,2 кВт; 2,0 x

	12,0 мм; максимальная мощность 2,7 кВт
Гониометр	
Тип	Вертикальный (θ - θ)
Минимальный шаг сканирования	0,0001 градуса (θ)
Режимы работы	Непрерывное сканирование, пошаговое сканирование, калибровка, позиционирование, осцилляция по оси тета
Скорость сканирования	0,1~50 градусов/мин (θ_s , θ_d), 0,1~100 градусов/мин (2θ)
Детектор/счетчик	
Сцинтилляционный счетчик	Сцинтилятор NaI, количество каналов: 1
OneSight (опция)	Высокоскоростной широкоугольный детектор, количество каналов: 1280

Параметры съемки при исследовании образцов Zr-1Nb составляли 40 кВ и 30 мА, угол съемки 5°.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

Целью данной главы является расчет затрат, необходимых для проведения НИОКР.

Потенциальные потребители результатов исследования. Потенциальными потребителями результатов НИР являются предприятия ядерной энергетики, энергетическое машиностроение.

Отрасль применения: атомная промышленность.

Основными сегментами данного рынка являются предприятия ядерной энергетики.

4.1. Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления

для ее будущего повышения. Для этого составлена оценочная карта, приведенная в таблице 4.1.

В качестве конкурентных покрытий, которые применяются в науке были выбраны тонкопленочные покрытия TiN (k1) и Ti-Al-N (k2).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы (макс. 5)			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1 Повышение срока эксплуатации ТВЭЛов	0,25	5	3	2	1,25	0,75	0,5
2 Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
3 Энергоэкономичность	0,16	4	2	4	0,6	0,3	0,6
4. Сложность получения пленочного покрытия	0,08	5	4	3	0,4	0,32	0,24
Экономические критерии оценки эффективности							
1 Конкурентоспособность продукта	0,12	5	2	3	0,6	0,24	0,36
2 Уровень проникновения на рынок	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
3 Цена	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
4 Предполагаемый срок эксплуатации	0,09	5	4	3	0,45	0,36	0,27
5 Срок выхода на рынок	0,04	4	3	3	0,16	0,12	0,12
Итого	1	42	29	29	4,7	3,08	2,98

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

Где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i-го показателя.

Таким образом, конкурентоспособность разработки составила 4,7, в то время как двух других аналогов 3,08 и 2,98 соответственно. Результаты

показывают, что данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной и имеет преимущества по таким показателям, как удобство в эксплуатации, надежность, цена, предполагаемый срок эксплуатации.

4.1.2. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и надежность технологии С2. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Большое количество конкурентов Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл3. Недостаток финансовых средств.</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Повышение стоимости конкурентных разработок В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p>	<p>1. Исследование взаимодействия водорода с циркониевым сплавом позволяет вывести определенные закономерности, которые увеличивают срок эксплуатации тепловыделяющих элементов.</p>	<p>1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ для тестирования технологии в реальных рабочих условиях 2. Привлечение новых заказчиков</p>

Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Развитая конкуренция технологий производства У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	1. Продвижение технологии с целью создания спроса 2. Создание конкурентных преимуществ готовой технологии 3. Сертификация и стандартизация технологии	1. Результаты НИР можно использовать для дальнейших исследований. 2. Продвижение технологии с целью создания спроса 3. Создание конкурентных преимуществ готовой технологии
---	---	---

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

4.2. Планирование научно-исследовательских работ

Структура работ в рамках научного исследования. На данном этапе определены этапы формирования тонкопленочных покрытий с привязкой к исполнителям. Работа выполнялась студентом (бакалавр) под руководством научного руководителя (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Бакалавр
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Построение плана экспериментов	Руководитель
	5	Подготовка циркониевых сплавов	Бакалавр
	6	Исследование экспериментальной установки	Руководитель, Бакалавр
	7	Выбор параметров режима нанесения покрытий	Руководитель, Бакалавр
Проведение основных работ	8	Имплантация Ti	Руководитель, Бакалавр
	9	Гидрирование образцов	Руководитель,

			Бакалавр
	10	Измерение скорости сорбции водорода	Руководитель, Бакалавр
	11	Измерение концентрации поглощения водорода	Бакалавр
	12	Рентгеноструктурный анализ	Руководитель, Бакалавр
	13	Измерение распределения элементов по глубине	Руководитель, Бакалавр
	14	Описание полученных результатов	Руководитель, Бакалавр
	15	Подготовка ВКР	Бакалавр

4.4. Определение трудоемкости выполнения работ

Разработка графика проведения научного исследования. Продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях T_{ki} рассчитывается по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{299} = 1,22$$

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

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

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

Количество календарных дней равно 365, выходных 52, а праздничных 14.

Таблица 4.4 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость						Исполнители		Длительность в рабочих днях, Т _р		Длительность в календарных днях, Т _к	
	t _{min} , чел.-дн.		t _{max} , чел.-дн.		t _{ож} , чел.-дн.							
	Руковод.	Бакалав.	Руковод.	Бакалав.	Руковод.	Бакалав.	Руковод.	Бакалав.	Руковод.	Бакалав.	Руковод.	Бакалав.
Составление и утверждение технического задания	2	-	10	-	7	-	1	-	7	-	9	-
Выбор направления исследований и способа решения задач	22	-	29	-	24,8	-	1	-	24,8	-	31	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	42	-	42	-	45,2	-	1	-	45,2	-	55
Построение плана экспериментов	9	-	24	-	15	-	1	-	15	-	18	-
Подготовка циркониевых сплавов	-	38	-	42	-	39,6	-	1	-	39,6	-	48
Исследование экспериментальной установки	7	7	15	15	10,2	10,2	1	1	10,2	10,2	12	12
Выбор параметров режима нанесения покрытий	7	7	15	15	10,2	10,2	1	1	10,2	10,2	12	12
Имплантация Ti	25	25	38	38	30,2	30,2	1	1	30,2	30,2	37	37
Гидрирование образцов	38	38	42	42	39,6	39,6	1	1	39,6	39,6	48	48
Измерение скорости сорбции водорода	7	7	15	15	10,2	10,2	1	1	10,2	10,2	12	12
Измерение концентрации поглощения водорода	-	1,5	-	10	-	4,9	-	1	-	4,9	-	6
Рентгеноструктурный анализ	7	7	15	15	10,2	10,2	1	1	10,2	10,2	12	12
Измерение распределения элементов по глубине	7	7	15	15	10,2	10,2	1	1	10,2	10,2	12	12

Описание полученных результатов	25	25	38	38	30,2	30,2	1	1	30,2	30,2	37	37
Подготовка ВКР	-	70	-	89	-	77,6	-	1	-	77,6	-	95
Итого	156	275	256	376	198	318			198	318	240	386

Таблица 4.5 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Ис-и	Т _к , кал, дн.	апр. ел.		май .		сен.		окт.		нояб .		дек.		январ.		фев .		мар т		апр.		май		ию нь	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
				1	Составление и утверждение технического задания	Р	9	1																			
2	Выбор направления исследований и способа решения задач	Р	31	1																							
3	Подбор и изучение материалов по теме	Б	55			1	2																				
4	Построение плана экспериментов	Р	18			1																					
5	Подготовка циркониевых сплавов	Б	48					1	2																		
6	Исследование экспериментальной установки	Р Б	12							1																	
7	Выбор параметров режима нанесения покрытий	Р Б	12									1															
8	Имплантация Ti	Р Б	37											1	2												
9	Гидрирование образцов	Р Б	46													1	2										
10	Измерение скорости сорбции	Р Б	12																								

- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.5.1. Расчет материальных затрат НТИ

В ходе формирования тонкопленочных покрытий и исследования их взаимодействий с водородом были использованы расходные материалы. Ниже в таблице 4.6 приведен расчет их стоимости.

Таблица 4.6 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Спирт	100 мл (90%)	2	45	90
Двухсторонний скотч		1	70	70
Абразивная бумага для полировки	Диаметр 300мм	40	500	20000
Всего за материалы				20160
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1008
Итого по статье C_m				21168

На статью «Материалы» относятся следующие затраты:

- сырьё, основные и вспомогательные материалы;
- покупные полуфабрикаты и комплектующие изделия;
- электроэнергия на технологические цели.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об},$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию;

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Амортизация была посчитана для вакуумной установки:

$$A = \frac{\text{Стоймость оборудования}}{\text{Срок службы} \cdot 12 \text{ месяцев} \cdot \text{количество дней в месяце}} * 4 = \frac{256000}{10 \cdot 12 \cdot 30} * 4 = 284,4 \text{ руб}$$

для спектрометра «GD-Profiler2»

$$A = \frac{\text{Стоймость оборудования}}{\text{Срок службы} \cdot 12 \text{ месяцев} \cdot \text{количество дней в месяце}} * 1 = \frac{8962000}{10 \cdot 12 \cdot 30} * 1 = 2489,4 \text{ руб}$$

для автоматизированного комплекса «Gas Reaction Controller»

$$A = \frac{\text{Стоймость оборудования}}{\text{Срок службы} \cdot 12 \text{ месяцев} \cdot \text{количество дней в месяце}} * 6 = \frac{850000}{10 \cdot 12 \cdot 30} * 6 = 1416,6 \text{ руб}$$

Таблица 4.7 – Электроэнергия на технологические нужды

Используемое оборудование	Цена за 1 кВт в час	Мощность оборудования, Вт	Время использования оборудования, ч	Стоимость эл. Энергии, руб.
Вакуумная установка	5,8	2,6	24	361,92
Системный блок	5,8	0,3	750	1305
Монитор	5,8	0,45	750	7957,5
Рентгенноструктурный анализ	5,8	1	2	11,6
Спектрометр «GD-Profiler2»	5,8	1	5	29
Автоматизированный комплекс «Gas Reaction Controller»	5,8	1	42	243,6
Итого				9908,6

4.5.2. Основная заработная плата исполнителей темы

Научно-техническое исследование было выполнено младшим сотрудником (бакалавром) с месячным окладом 9893 рублей под руководством ассистента кафедры, не имеющего ученой степени с месячным окладом 17 000 рублей.

Таким образом, среднедневная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Средняя заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{33\,150 \cdot 10,4}{250} = 1379,04 \text{ руб}$$

Среднедневная заработная плата бакалавра:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{12\,860,9 \cdot 10,4}{250} = 535,01 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника; $T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Вычислим продолжительность выполняемых работ, исходя из данных таблицы 4.4:

для руководителя:

$$T_{\text{р}} = \sum T_{\text{р}i} = 7 + 24,8 + 15 + 10,2 + 10,2 + 30,2 + 39,6 + 10,2 + 10,2 + 10,2 + 30,2 = 198$$

раб. дн.

для бакалавра:

$$T_p = \sum T_{pi} =$$

$$45,2 + 39,6 + 10,2 + 10,2 + 30,2 + 39,6 + 10,2 + 4,9 + 10,2 + 10,2 + 30,2 + 77,6 = 318 \text{ раб.дн.}$$

Теперь вычислим величину основной заработной платы за период выполнения работ:

для руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p = 1379,04 \cdot 198 = 273\,049,92 \text{ руб.}$$

для бакалавра:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p = 535,01 \cdot 318 = 170\,133,18 \text{ руб}$$

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

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

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

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

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

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

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад	$k_{\text{пр}}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{\text{дн}}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.

Руководитель	17000	-	-	1,3	33 150	1379,04	198	273 049,92
Бакалавр	9893	-	-	1,3	12 860,9	535,01	318	170 133,18

4.5.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 4.10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Величина отчислений во внебюджетные фонды
Руководитель проекта	273 049,92	73 996
Бакалавр	170 133,18	46 106
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды		27,1%
Итого	443 183	120 102

Таблица 4.11. – Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	21 168
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	443 183
3. Отчисления во внебюджетные фонды	120 102
4. Накладные расходы	10 969
5. Амортизация	4190
6. Бюджет затрат НТИ	599 612

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

Таблица 17 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Ti	TiN	Ti-Al-N
1. Повышение срока эксплуатации ТВЭЛов	0,1	5	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4	3	3
3. Сложность получения пленочного покрытия	0,15	5	4	3
4. Энергоэкономичность	0,20	4	2	3
5. Надежность	0,25	5	3	4
6. Материалоемкость	0,15	4	4	3
ИТОГО	1			

$$I_{p-исн1} = 5*0,1 + 4*0,15 + 5*0,15 + 5*0,20 + 5*0,25 + 4*0,15 = 4,7;$$

$$I_{p-исн2} = 4*0,1 + 3*0,15 + 4*0,15 + 2*0,20 + 3*0,25 + 4*0,15 = 3,2;$$

$$I_{p-исн3} = 3*0,1 + 3*0,15 + 3*0,15 + 3*0,2 + 4*0,25 + 3*0,15 = 3,25.$$

Из приведенных расчетов выявлено, что текущий проект по интегральному показателю ресурсоэффективности вариантов является выгодным и превосходит аналоги. Так как данный проект является только научной разработкой и началом исследования, то интегральный финансовый показатель разработки рассчитать не представляется возможным. В целом, данный проект является перспективным с точки зрения ресурсопотребления, так как в отличие от аналогов в проекте предусмотрены меньшие затраты на себестоимость будущей продукции за счет использования местных недорогих сырьевых материалов и возможное достижение требуемых характеристик.

Глава 5. Социальная ответственность

В связи с различными чрезвычайными ситуациями, происходящими на предприятии, соответственно очень важным является обеспечение безопасности рабочих мест на предприятии, и предотвращение возможных опасных ситуаций.

Для выполнения выпускной квалификационной работы по теме взаимодействие и накопление водорода в циркониевом сплаве, подвергнутом плазменно-иммерсионной ионной имплантации титана использовали установку “Радуга-Спектр” для модификации образцов. В соответствии с этим данная глава предполагает рассмотрение правил безопасной работы при выполнении основных этапов нанесения покрытий, а также их последующего испытания. Рассмотрены условия работы с установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы.

5.1. Вредные факторы проектируемой производственной среды

При проведении работ на установке возможно воздействие вредных факторов таких, как [94]:

- 1) Производственный шум.
- 2) Микроклимат.
- 3) Освещенность.

5.1.2. Производственный шум

Имплантация титана осуществлялась на установке «Радуга-Спектр», одними из основных частей которой являются форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создающие производственный шум. Воздействие шума в первую очередь влияет на органы слуха, нервную и сердечно-сосудистую системы [95]. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет 75 дБА. Зоны с уровнем звука или эквивалентным уровнем звука выше 80 дБА обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026 [96]. Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: акустические экраны, выгородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски.

В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон.

5.1.3. Промышленная санитария

В данной дипломной работе проводилась работа по имплантации титана в образец Zr-1Nb.

По ГОСТу 12.1.007-76 ССБТ существует определенная классификация по степени воздействия на организм вредные вещества подразделяют на четыре класса опасности:

- 1-й - вещества чрезвычайно опасные;
- 2-й - вещества высокоопасные;
- 3-й - вещества умеренно опасные;
- 4-й - вещества малоопасные.

Титана относится к 3 классу опасности поскольку его ПДК составляет 10 мг/м^3 , также обладает фиброгенным действием. Цирконий также относится к 3 классу опасности поскольку его ПДК составляет 6 мг/м^3 .

Необходимо использовать индивидуальные средства защиты (перчатки, очки, защитный рабочий халат).

5.1.4. Микроклимат

При работе установки включены охлаждающие системы и одновременно с этим процессом происходит, нагрев вакуумной камеры, что приводит к изменению микроклимата в помещении. Параметрами, характеризующими микроклимат, являются [97]:

1. температура воздуха;
2. относительная влажность воздуха;
3. скорость движения воздуха.

Выполняемые работы относятся к 6 категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат $121\text{--}150 \text{ ккал/ч}$ ($140\text{--}174 \text{ Вт}$), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Температура воздуха, $^\circ\text{C}$	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения
-------------	---------------------------------------	------------------------------------	-------------------

			воздуха, м/с
Холодный	21-23	60-40	0,1
Теплый	22-24	60-40	0,1

Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

5.1.5. Расчет искусственной освещенности

Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 150 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 5,7$ м, ширина $B = 4,3$ м, высота = $3,7$ м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B,$$

где A – длина, м;

B – ширина, м.

$$S = 5,7 \times 4,3 = 24,51 \text{ м}^2$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c = 50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\Pi} = 70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_z = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Выбираем лампу дневного света OSRAM DULUX L 32W/840 2G11, световой поток которой равен $\Phi_{\text{лд}} = 2900$ Лм.

Выбираем светильники ССП-158 32Вт 4000К IP65 LLT 4690612008950 Этот светильник имеет одну лампу мощностью 32 Вт, длина светильника равна 1150 мм, ширина – 60 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda = 1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,3$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса,

h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3700 - 300 = 3400$$

Высота рабочей поверхности над полом: $h_{\text{рп}} = 800$.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{\text{рп}} = 3400 - 800 = 2600 = 2,6 \text{ м}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,6 = 2,86 \text{ м}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{4,3}{2,86} = 1,5 \approx 2$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{5,7}{2,86} = 1,99 \approx 2$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 2 = 4$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,86}{3} = 0,953 \text{ м}$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Однако необходимо провести дополнительные расчеты:

$$4300=L_2+\frac{2}{3}L_3+2*1150$$

$$L_2=\frac{(4300-2300)*3}{5}=1200$$

$$l=\frac{L_2}{3}=\frac{1200}{3}=400$$

Аналогичные расчеты проводим для длины комнаты:

$$5700=L_1+\frac{2}{3}L_1+2*60$$

$$L=\frac{(5700-120)*3}{5}=3348$$

$$l=\frac{L_1}{3}=\frac{3348}{3}=1116$$

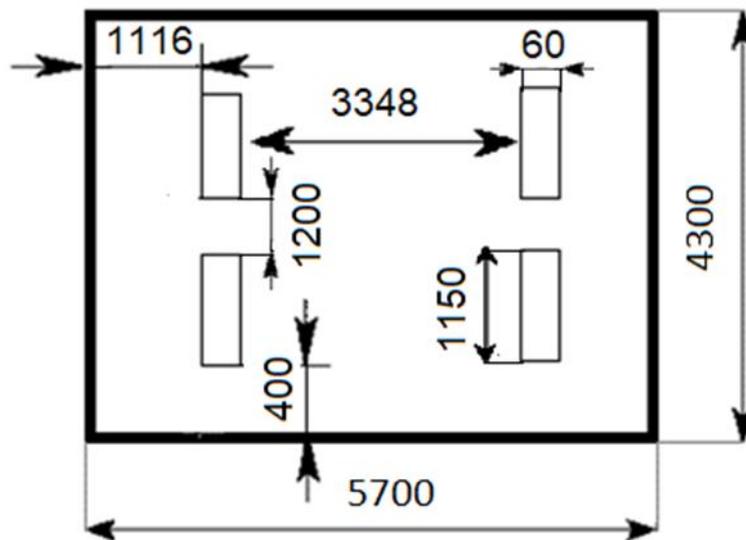


Рисунок 5.1 – Схема размещения светильников в помещении

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5,7 \cdot 4,3}{2,6 \cdot (5,7 + 4,3)} = 0,94$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения:

= 50% и потолка = 30%. Значения коэффициента использования светового потока светильников с люминесцентными лампами примем равным 53 %.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 5,7 \cdot 4,3 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,53} = 2861,42 \text{ лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2900 - 2861,42}{2900} \cdot 100\% = 1,3\%.$$

Таким образом: $-10\% \leq 1,3\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

5.2. Электробезопасность

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6–16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий [98].

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Согласно [99] помещения разделяются на три класса опасности.

1. Помещение без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18—20°, с влажностью 40—50%, $U < 1000 \text{ В}$).

2. Помещение с повышенной опасностью (где имеется один из следующих признаков: повышенная температура, влажность 70—80%, токопроводящие полы, металлическая пыль, наличие заземления, большого к-ва оборудования, $U < 1000 \text{ В}$).

3. Помещения особо опасные, в которых имеется наличие двух признаков из второй группы или имеются в помещении едкие или ядовитые взрывоопасные вещества, $U > 1000 \text{ В}$.

Используемое помещение относится к классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования с другой стороны. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет $>25 \text{ В}$ переменного тока и $>60 \text{ В}$ постоянного тока [100].

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

1. содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. своевременно проводить техническое обслуживание;
3. соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
4. проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. изоляция токоведущих частей;
2. малое напряжение в электрических цепях;
3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;

4. применение разделяющих трансформаторов;

5. использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;

6. защитные средства и предохранительные приспособления.

Индивидуальные защитные средства подразделяются на основные и дополнительные. К основным защитным изолирующим средствам в установке до 1000 В относятся изолирующие штанги, клещи изолирующие и электроизмерительные указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками. К 85 дополнительным изолирующим защитным средствам относятся средства, которые дополняют основные средства защиты, а также могут служить для защиты от напряжения прикосновения и шагового напряжения. Дополнительными защитными средствами в установках до 1000 В служат диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки [101].

Безопасным для организма человека можно считать переменный ток силой не выше 0,05 А ток силой более 0,05 - 0,1 А опасен и может вызвать смертельный исход.

Безопасным напряжением для человека считается напряжение 42 В в нормальных условиях и 12 В в условиях повышенной опасности (сырость, высокая температура, металлические полы и др.).

Величина измерения сопротивления заземления - Ом и оно должно быть минимально низким по значению. Идеальным случаем считается, если величина будет нулевая, это означает при пропускании "вредных" электротоков какое-либо сопротивление отсутствует, что гарантирует полное поглощение их землей. Так как достигнуть идеала практически невозможно, то вся электроника и электрооборудование создаются на основе некоторых нормированных величин сопротивления заземления равно 60, 30, 15, 10, 8, 4, 2, 1 и 0,5 Ом. Исходя из ПУЭ 1.7.101, требуется не более чем 2, 4 и 8 Ом

сопротивление заземления для источника тока (генератора или трансформатора).

5.3. Пожаровзрывобезопасность

Используемое помещение относится к категории Б по пожарной и взрывопожарной опасности, так в данном помещении расположены горючие легковоспламеняемые материалы, также баллоны с газами. Помещение, в котором находится установка, оснащено аварийными выходами, обеспечено средствами пожаротушения, сигнализацией оповещения пожара. План эвакуации представлен на рисунке 5.2.

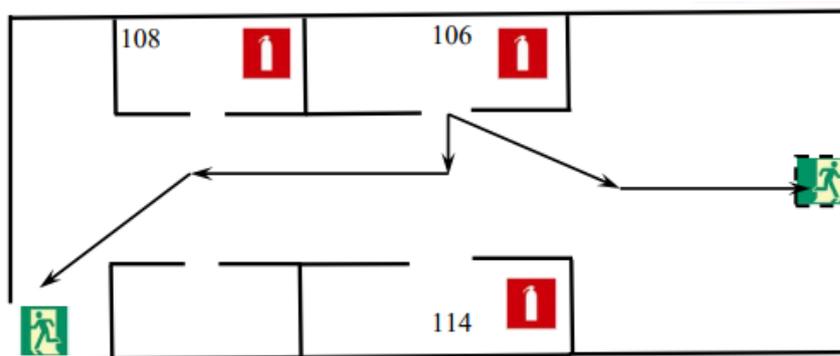


Рисунок 5.2 – План эвакуации рабочих помещений

Работники допускаются к работе только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, во всех помещениях вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации.

В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)-АВСЕ-02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт) [102, 103].

Причинами возникновения пожара могут быть:

1. Нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
2. Курение в неустановленных местах;

3. Перегрузка электрических сетей;
4. Нарушение правил пожарной безопасности;
5. Неправильное хранение возгорающихся веществ.

При работе на установке используются баллоны с аргоном и азотом. Эксплуатация баллонов связана с рядом опасных факторов. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов:

1. Баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких-либо предметов.

2. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0.1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей [104].

3. Выпуск газов из баллона производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет.

Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности:

А — повышенная взрывопожароопасность. Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более 28 °С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 килопаскалей, и (или) вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой,

кислородом воздуха или друг с другом, в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа.

Б — взрывопожароопасность. Горючие пыли или волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28 °С, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа.

В1 — В4 — пожароопасность. Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они находятся (обращаются), не относятся к категории А или Б.

Г — умеренная пожароопасность. Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени, и (или) горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

Д — пониженная пожароопасность. Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Используемое помещение относится к категории Б по пожарной и взрывопожарной опасности, так в данном помещении расположены горючие легковоспламеняемые материалы, также баллоны с газами.

Таблица 5.1. Типы огнетушителей и их назначение

Тип	Жидкостные	Порошковые	Углекислотные	Аэрозольные	Воздушно-пенные
Огнетушители	ОВ-1(3) ОВ-8	ОП-5 ОП-8 ОП-2	ОУ-5 ОУ-3 ОУ-10	ВВПА-500 ВВПА-400	ОВП-4 ОВП-8 ОВП-40 (ОВП-50)

Описание	Огнетушащее средство представлено водой и водными растворами химически активных веществ. Также используются поверхностно активные вещества.	Порошки общего и спец. назначения. Основа порошка – минеральные соли. Добавляют также вещества для предотвращения увлажнения и комкования порошка.	Горящее вещество углекислота. При распылении она расширяется в 400 раз, образуя газ. При этом температура понижается до - 70 градусов Цельсия.	Горящее вещество представляет собой галоидированные углеводороды, которые образуют при распылении бромистый этил, хладон.	Огнетушащее вещество – пена, которая образуется во время химической или механической реакции водных растворов.
Область применения	Используются только при плюсовых температурах. Назначенные для тушения горящих твердых веществ	Наиболее универсальны используются во всех типах пожаров.	При тушении пожаров в помещении, где нежелательно использовать воду.	Хорошо тушат твердые вещества, электрические установки под напряжением. Исключение щелочи и вещества, содержащие кислород.	Предназначенные для тушения средних пожаров. Не рекомендуется использовать при тушении веществ, поддерживающих горение без кислорода
Класс пожара	А, В	А,В,С,Е	В,С	В,С,Е	А,В,С

5.4. Охрана окружающей среды

В настоящее время одним из важных вопросов в любой сфере деятельности является вопрос экологичности. Экологичность отхода представляет собой способность отхода не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений.

В настоящий момент ведутся активные работы по переработке отходов, их утилизации или обеспечения повторного использования. Переработка является процессом деятельности, направленным на изменение физического, химического состояния отхода для дальнейшего обращения с отходами.

В данной работе отходами являются металлические порошки (алюминий, титан, медь), полученные вследствие чистки камеры и других компонентов установки.

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

- демонтаж конструкций и сбор металлических отходов;
- магнитная сепарация – способ отделения магнитных материалов от немагнитных. Основан на использовании различия магнитных свойств (магнитной восприимчивости, остаточной индукции, коэрцитивной силы и др.) компонентов механической смеси в неоднородном поле постоянных магнитов или электромагнитов;
- транспортировку отходов на перерабатывающее предприятие (ООО "Интерпром", ООО «ЭКОМЕДСЕРВИС», ООО "ПТК "Мегалион" и т.д.);
- проверка металлических отходов (в т.ч. дозиметрическая). Суть проверки исключить возможность приема и продажи металлического лома, который имеет радиоактивное загрязнение или локальные источники, организации (физические и юридические лица).

5.4.1. Защита в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. ЧС бывают техногенные и природные. Техногенные ЧС вызваны производственной деятельностью человека, в то время как

природные ЧС возникают по причине природных явлений и процессов. Так, к техногенным чрезвычайным ситуациям относятся пожары и взрывы на производстве, аварии с выбросом химически опасных или радиоактивных веществ и т.д. Природные ЧС могут возникнуть ввиду наводнения, заморозка, урагана и т.д. Рассмотрим две наиболее типичных чрезвычайных ситуации, которые могут произойти на предприятии.

Первый случай: остановка производства в результате сильных морозов.

Меры по предупреждению ЧС:

1. Повышение устойчивости системы электроснабжения. В первую очередь целесообразно заменить воздушные линии электропередач на кабельные (подземные) сети, использовать резервные сети для запитки потребителей, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы).

2. Использование запасных автономных источников теплоснабжения, заглубления теплотрасс.

3. Обеспечение устойчивости систем водоснабжения (устройство дублирования водопитания, кольцевание системы, заглубление водопроводов, обустройство резервных емкостей и водохранилищ, очистка воды от вредных веществ и т.п.).

4. Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости системы канализации достигается созданием резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети. Насосы, используемые для перекачки загрязненной воды, комплектуются надежными источниками электропитания.

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

1. Организовать контрольно-пропускной пункт.

2. Установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.

3. Установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.

5.4.2. Правовые вопросы обеспечения безопасности

К работе на установке «Радуга-спектр» допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие обучение безопасности труда и инструктаж на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний, норм и правил работы с электроустановками, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы на установке, имеющие не менее III группы по электробезопасности.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца. Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

В данной главе рассмотрены условия работы с установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы. Проведен расчет освещенности помещения, который удовлетворяет требуемым нормам общего равномерного освещения.

Заключение

В данной работе проведено исследование влияния ПИИИ титана в циркониевый сплав Zr-1Nb на сорбцию и захват водорода. В процессе исследования проведен литературный обзор по механизмам диффузии водорода в металлы и способам защиты сплавов от водородного охрупчивания.

Было установлено, что ПИИИ титана приводит к существенному снижению скорости сорбции водорода циркониевым сплавом. Проанализировано влияние температуры наводороживания в диапазоне от 360 до 800 °С на защитные свойства модифицированной поверхности сплава по отношению к водороду. Выявлено, что с увеличением температуры возрастает скорость поглощения водорода образцами циркониевого сплава Zr-1Nb после ПИИИ. При этом модифицированный слой обладает защитными свойствами от проникновения водорода до температуры наводороживания 450 °С и обеспечивает захват водорода в модифицированном слое. При температуре 800 °С сорбция водорода модифицированным сплавом протекает стремительно (за минуты), в свою очередь, титан из модифицированного слоя диффундирует вглубь сплава.

Список публикаций:

Статьи, индексируемые международными изданиями:

1. Kashkarov E.B., Vilkhivskaya O.V., Zakharchenko S.A. Thermal stability and hydrogenation behavior of Zr-1Nb alloy with TiN_x and Ti/ TiN_x coatings // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741. Article number 012192.

2. E.B. Kashkarov, N.N. Nikitenkov, A.N. Sutygina, M.S. Syrtanova, S.A. Zakharchenko, A. Obrosov. Influence of Plasma-Immersion Titanium-Ion Implantation on the Kinetics of Hydrogen Penetration into E110 Zirconium Alloy // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12. – № 3. – P. 570–575.

Список литературы

1. Glazunov G.P., Azhazha V.M., Baron D. The kinetics of hydrogen penetration through the fuel cladding membrane of Zr-1% Nb //Problems of Atomic Science and Technology. – 2009. – Vol. 4, – P.198–2011.
2. Anders A. Metal plasmas for the fabrication of nanostructures //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Т. 40. – №. 8. – С. 2272.
3. Conrad J. R. et al. Plasma source ion implantation technique for surface modification of materials //Journal of Applied Physics. – 1987. – Т. 62. – №. 11. – С. 4591-4596.
4. Chu P. K. et al. Plasma immersion ion implantation—A fledgling technique for semiconductor processing //Materials Science and Engineering: R: Reports. – 1996. – Т. 17. – №. 6-7. – С. 207-280.
5. Lewis M. B. Deuterium-defect trapping in ion-irradiated zirconium //Journal of Nuclear Materials. – 1984. – Т. 125. – №. 2. – С. 152-159.
6. Olsson P. A. T., Kese K., Holston A. M. A. On the role of hydrogen filled vacancies on the embrittlement of zirconium: An ab initio investigation //Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Т. 467. – С. 311-319.
7. Budzynski P., Youssef A. A., Kamienska B. Influence of nitrogen and titanium implantation on the tribological properties of steel //Vacuum. – 2003. – Т. 70. – №. 2. – С. 417-421.
8. Eberhardt A. W. et al. The roles of residual stress and surface topography on hardness of Ti implanted Ti6Al4V //Materials Science and Engineering: A. – 1997. – Т. 229. – №. 1-2. – С. 147-155.
9. Evans P. J., Hyvarinen J., Samandi M. Surface modification of austenitic stainless steel by titanium ion implantation //Surface and coatings Technology. – 1995. – Т. 71. – №. 2. – С. 151-158.
10. Peng D. et al. Influence of aluminum ions implantation on corrosion behavior of zircaloy-2 alloy in 1 MH 2 SO 4 //Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition. – 2007. – Т. 22. – №. 3. – С. 394-399.

11. Wan Q., Bai X., Liu X. Effect of titanium ion implantation on the corrosion behavior of zircaloy-4 //Journal of materials science. – 2006. – T. 41. – №. 7. – C. 2133-2135.
12. Zhang D. et al. Low vacuum MEVVA titanium and nitrogen co-ion implantation into D2 steel substrates //Surface and Coatings Technology. – 2004. – T. 185. – №. 2. – C. 264-267.
13. Xiong L. B. et al. Ti 3+ in the surface of titanium dioxide: generation, properties and photocatalytic application //Journal of Nanomaterials. – 2012. – T. 2012. – C. 9.
14. Puls M. P. The influence of hydride size and matrix strength on fracture initiation at hydrides in zirconium alloys //Metallurgical Transactions. – 1988. – Vol. – №. 6. – P. 1507–1522.
15. Hurst D. G. Canada Enters the Nuclear Age: A Technical History of Atomic Energy of Canada Limited //McGill-Queen's University Press. – 1997.
16. Korn C., Goren S. D. NMR study of hydrogen diffusion in zirconium hydride //Physical Review B. – 1986. – Vol. 33, №. 1. – P. 68–78.
17. Szpunar J. A., Qin W., Li H., Kumar P. K. Roles of texture in controlling oxidation, hydrogen ingress and hydride formation in Zr alloys //Journal of Nuclear Materials. – 2012. – Vol. 427, №. 1–3. – P. 343–349.
18. Johnston W. V., Jacoby W. R., Wallam J. S., Alberts A. H. Knolls atomic laboratory report //Tech. Rep. – 1959.
19. Simpson C. J., Ells C. E. Delayed hydrogen embrittlement in Zr-2.5% Nb //Journal of Nuclear Materials. – 1974. – Vol. 52, №. 2. – P. 289–295.
20. Kiran Kumar A. P., Szpunar J. A., Zhang H. Preferential precipitation of hydrides in textured zircaloy-4 sheets //Journal of Nuclear Materials. – 2010. – Vol. 59, – P. 7010–7021.
21. Davis J.R. Alloy phase diagrams //ASM Handbook. – 1992. – Vol. 3, – P. 1–1471.
22. Х.Д. Гольдшмидт. Сплавы внедрения. Выпуск II. М.: «Мир», 1971.

23. Dupin N., Ansara I., Servant C., Toffolon C., Lemaignan C., Brachet J. C. A thermodynamic database for zirconium alloys // *Journal of Nuclear Materials*. – 1999. – Vol. 275, №. 3. – P. 287-295.
24. Terrani K.A., Balooch M., Wongsawaeng D., Jaiyen S., Olander D.R. The kinetics of hydrogen desorption from and adsorption on zirconium hydride // *Journal of Nuclear Materials*. – 2010. – Vol. 397, №. 1-3. – P. 61- 68.
25. Tulk E., Kerr M., Daymond M. R. Study on the effects of matrix yield strength on hydride phase stability in zircaloy-2 and Zr 2.5%Nb // *Journal of Nuclear Materials*. – 2012. – Vol. 425, №. 1-3. – P. 93-104.
26. Zuzek E., Abriata J.P., San-Martin A., Manchester F.D. The H-Zr (Hydrogen-Zirconium) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams* – 1990, – Vol. 11, №. 4. – P. 385-395.
27. Zuzek E. On equilibrium in the Zr-H system // *Surface and Coatings Technology* – 1986. – Vol. 28, №. 4. – P. 323–338.
28. Башкин И.О., Нефедова М.Ф., Тиссен В.Г. Сверхпроводимость в системе Zr-D под давлением // *Физика твердого тела*. – 2000. – Т. 42. – № .1. – С. 12-15.
29. Daum R.M., Chu Y.S., Motta A.T. Identification and quantification of hydride phases in zircaloy-4 cladding using synchrotron X-ray diffraction // *Journal of Nuclear Materials* – 2009. – Vol. 392, №. 3. – P. 453–463.
30. Russell R.B. Coefficients of thermal expansion for zirconium // *Journal of Metals*– 1954. – P. 1054–1052.
31. Hong E., Dunand D.C., Choe H. Hydrogen-induced transformation superplasticity in zirconium // *International Journal of Hydrogen Energy* – 2010. – Vol. 35, №. 11. – P. 5708–5713.
32. Kearns J.J. Terminal solubility and partitioning of hydrogen in the alpha phase of zirconium. zircaloy-2 and zircaloy-4 // *Journal of Nuclear Materials* – 1967. – Vol. 22, №. 3. – P. 292–303.

33. Рощина Т.М. Адсорбционные явления и поверхность // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №. 2. – С. 89–98.
34. Zuttel A., Borgschulte A., Schlapbach L. Hydrogen as a future energy carrier – 2008.
35. Zuttel A. Materials for hydrogen storage // Materials Today – 2003. – Vol. 6, №. 9. – P. 24–33.
36. Dornheim M. Thermodynamics of metal hydrides: Tailoring reaction enthalpies of hydrogen storage materials //chapter in Handbook of hydrogen storage – 2010. – P. 891–918.
37. Borgschulte A., Westerwaal R.J., Rector J.H., Schreuders H., Dam B., Griessen R. Catalytic activity of noble metals promoting hydrogen uptake // Journal of Catalysis – 2006. – Vol. 239, №. 2. – P. 263-271.
38. Nordlander P., Norskov J.K., Besenbacher F. Trends in hydrogen heats of solution and vacancy trapping energies in transition metals // Journal of Physics F: Metal Physics – 1986. – Vol. 16, №. 9. – P. 1161-1171.
39. Yamamoto M., Naito S., Mabuchi M., Hashino T. Adsorption potential of hydrogen atom on zirconium // The Journal Physical Chemistry – 1992. – Vol. 96. – P. 3409-3412.
40. Zhang P., Wang S.X., Zhao J., He C.H., Zhang P. First-principles study of H₂ adsorption and dissociation on Zr(0001) // Journal of Nuclear Materials – 2011. – Vol. 418, №. 1-3. – P. 159-164.
41. Дергачев Ю.М. Модель абсорбции водорода металлами // Неорганические материалы. – 2009. – Т. 45, №. 8. – С. 930-933.
42. Г.А. Меерсон и А.Н. Зеликман. Металлургия редких металлов. М.: «Металлургиздат», 1955.
43. Г.Л. Миллер. Цирконий / Перевод с английского под редакцией С.Г. Глазунова и А.А. Киселева. М.: изд-во иностр. лит., 1955.

44. Gulbransen E.A., Andrew K.F. Solubility and decomposition pressures of hydrogen in alpha-zirconium // Transactions AIME. Journal of Metals. January – 1955. – Vol. 7, №. 1. – P. 136-144.
45. REB Research - Hydrogen Solubility In Various Metals [<http://www.rebresearch.com/H2sol2.htm>].
46. Naito S. Kinetics of hydrogen absorption by α - zirconium // Journal of Chemical Physics – 1983. – Vol. 79, №. 6. – P. 3113-3120.
47. Belle J., Cleland B.B., Mallett M.W. Kinetics of the reaction of hydrogen with zirconium // Journal of the Electrochemical Society – 1954. – Vol. 101, №. 5. – P. 211-214.
48. Meyer G., Kobrinsky M., Abriata J.P., Bolcich J.C. Hydriding kinetics of zircaloy-4 in hydrogen gas // Journal of Nuclear Materials – 1996. – Vol. 229. – P. 48-56.
49. Park J., Kim W., Won M. Hydrogen sorption in zirconium and relevant surface phenomena // Materials Transactions – 2007. – Vol. 48, №. 5. – P. 1012-1016.
50. Griessen R. The lecture “Science and technology of hydrogen in metals”. IX Chapter: Sustainability and hydrogen. Vrije Universiteit. Amsterdam, 2008.
51. Яртысь В.А., Бурнашева В.В., Семенов К.Н. Структурная химия гидридов интерметаллических соединений // Академия наук СССР. Успехи химии. – 1983. – Т. II. – Вып. 4. – С. 529-561.
52. Puls M.P. The effect of hydrogen and hydrides on the integrity of zirconium alloy components // Engineeringmaterials – 2012.
53. Дегтярев Ю.М. Абсорбция водорода переходными металлами // Неорганические материалы – 2006. – Т. 42. №. 2. – С. 147-150.
54. Griessen R. The lecture “Science and technology of hydrogen in metals”. III Chapter: Thermodynamics of hydrogen in metals. Vrije Universiteit. Amsterdam, 2008.

55. Schlapbach L., Zuttel A. Hydrogen-storage materials for mobile applications // *Nature* – 2001. – Vol. 414, №. 6861. – P. 353 -358.
56. Sawatzky A., Wilkins B. J. S. Hydrogen solubility in zirconium alloys determined by thermal diffusion // *Journal of Nuclear Materials*. – 1967. – T. 22. – №. 3. – C. 304-310.
57. Khatamian D., Ling V. C. Hydrogen solubility limits in α - and β -zirconium // *Journal of alloys and compounds*. – 1997. – T. 253. – C. 162-166.
58. McMinn A., Darby E. C., Schofield J. S. The terminal solid solubility of hydrogen in zirconium alloys // *Zirconium in the Nuclear Industry: Twelfth International Symposium*. – ASTM International, 2000.
59. Dutton R. Hydrogen embrittlement effects in hydride-forming metals // *Canadian Institute of Mining and Metallurgy*. – 1978. – T. 17. – №. 1. – C. 16-25.
60. Szpunar J. A. et al. Roles of texture in controlling oxidation, hydrogen ingress and hydride formation in Zr alloys // *Journal of Nuclear Materials*. – 2012. – T. 427. – №. 1. – C. 343-349.
61. Lewis M. B. Deuterium-defect trapping in ion-irradiated zirconium // *Journal of Nuclear Materials*. – 1984. – T. 125. – №. 2. – C. 152-159.
62. Vizcaino P., Banchik A. D., Abriata J. P. Solubility of hydrogen in Zircaloy4: irradiation induced increase and thermal recovery // *Journal of Nuclear Materials*. – 2002. – T. 304. – №. 2. – C. 96-106.
63. Vizcaíno P., Banchik A. D., Abriata J. P. Hydrogen in Zircaloy-4: effects of the neutron irradiation on the hydride formation // *Journal of materials science*. – 2007. – T. 42. – №. 16. – C. 6633-6637.
64. Olsson P. A. T., Kese K., Holston A. M. A. On the role of hydrogen filled vacancies on the embrittlement of zirconium: An ab initio investigation // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – T. 467. – C. 311-319.
65. Korn C., Goren S. D. NMR study of hydrogen diffusion in zirconium hydride // *Physical Review B*. – 1986. – T. 33. – №. 1. – C. 68.
66. Somenkov V. A., Shil'stein S. S. Phase transitions of hydrogen in metals // *Progress in Materials Science*. – 1980. – T. 24. – C. 267-335.

67. Келли А. и др. Кристаллография и дефекты в кристаллах. – 1974.
68. Hindam H., Whittle D. P. Microstructure, adhesion and growth kinetics of protective scales on metals and alloys //Oxidation of metals. – 1982. – Т. 18. – №. 5. – С. 245-284.
69. Селезнева Л.В., Бушмин Б.В., и др. Взаимодействие водорода с циркониевым сплавом с вакуумными ионно-плазменными покрытиями // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – Вып. 2. – С. 108-111.
70. Журавлева П. Л. и др. Исследование структуры однослойных покрытий TiN и многослойных покрытий TiN/ZrN //Российские нанотехнологии. – 2010. – Т. 5. – С. 112-116.
71. Антимонова А.А., Габис И.Е., Дубровский В.А., Денисов Е.А., Компаниец Т.Н., Курдюмов А.А., Полонский, К.Я., Хазов И.А. Кинетика взаимодействия водорода с плазмонапыленным нитридом титана // Аннотации докладов международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-01»: Саров, 2001. – С. 43-45.
72. Курдюмов А. А. Взаимодействие водорода с циркониевым сплавом с вакуумными ионно-плазменными покрытиями //Время. – Т. 20. – С. 0.
73. Kim I. et al. TiN-based coatings on fuel cladding tubes for advanced nuclear reactors //Journal of Nuclear Materials. – 2012. – Т. 429. – №. 1. – С. 143-148.
74. Rudenja S. et al. Duplex TiN coatings deposited by arc plating for increased corrosion resistance of stainless steel substrates //Surface and Coatings Technology. – 1999. – Т. 114. – №. 2. – С. 129-136.
75. Chen L. et al. Effect of yttrium addition on microstructure and orientation of hydride precipitation in Zr-1Nb alloy //International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Т. 39. – №. 36. – С. 21116-21126.
76. Batra I. S. et al. Hydride embrittlement and oxidation resistance of some Zr– Nb–Y alloys //Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Т. 434. – №. 1. – С. 389-394.

77. Пушилина Н. С. Исследование модификации поверхности циркониевого сплава импульсным электронным пучком. – Томск, 2011.

78. Чернов И.П., Пушилина Н.С., Иванова С.В., Кренинг Х.В., Коваль Н.Н., Ларионов В.В., Лидер А.М., Степанова Е.Н., Степанова О.М., Черданцев Ю.П. Свойства и структурное состояние слоя циркониевого сплава, модифицированного импульсным электронным пучком и насыщенного водородом // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – №. 3 – С. 81.

79. R. Mahapatra, S. Maikap, G.S. Kar, S.K. Ray. Plasma source ion-implantation technique for surface modification of materials //Solid-State Electron. – 2005. – Т. 49. – С. 449-452.

80. Анищик В. М., Углов В. В. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками //Минск: БГУ. – 2003. – С. 155-161.

81. Гринберг Б. А., Иванов М. А. Интерметаллиды Ni₃Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение //Екатеринбург: УрО РАН. – 2002. – Т. 360. – С. 4.

82. Попова Н. А. и др. Формирование наноразмерных интерметаллидных фаз в условиях имплантации ионами алюминия титановых мишеней. – 2012.

83. Peng D. Q. et al. Influence of titanium ions implantation on corrosion behavior of zirconium in 1M H₂SO₄ //Applied surface science. – 2006. – Т. 252. – №. 6. – С. 2196-2203.

84. Zhanga X.Y., Wan Г, Q., Baib X.D., Jina Z.X. Effect of Titanium ion implantation on the oxidation behaviour of zircalloy-4 // Vacuum. – 2006. – V. 80. – P. 1003-1006.

85. Рябчиков А.И., Сивин Д.О., Бумагина А.И., Тупикова О.С., Майер Д.Н. Уменьшение плотности титановых микрочастиц на поверхности образца, погруженного в плазму, при импульсно-периодическом потенциале смещения // Известия высших учебных заведений. – 2013. – №1. – С. 1-4.

86. Мубояджян С. А. и др. Нанесение защитных покрытий на детали ионно-плазменным методом //Авиационная промышленность. – 1997. – №. 3- 4. – С. 65-70.

87. Рябчиков А.И., Сивин Д.О., Бумагина А.И., Степанов И.Б., Струцрябчиков В.К. Осаждение микрочастиц из вакуумно-дуговой плазмы при подаче на мишень импульсно-периодического отрицательного потенциала смещения // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – №3. – С. 18-25.

88. Рябчиков А.И., Сивин Д.О., Бумагина А.И., Тупикова О.С., Майер Д.Н. Уменьшение плотности титановых микрочастиц на поверхности образца, погруженного в плазму, при импульсно-периодическом потенциале смещения // Известия высших учебных заведений. – 2013. – №1. – С. 1-4.

89. Глазунов Г. П. и др. Кинетика проникновения водорода через твэльные оболочки из сплава Zr-1% Nb //Вопросы атомной науки и техники. – 2009.

90. Шулаев В. М. и др. Вакуумно-дуговое осаждение наноструктурных TiSi-N покрытий из многокомпонентной плазмы. – 2008.

91. Рябчиков И. А. Формирование ионных потоков из плазмы короткоимпульсными потенциалами смещения : дис. – Томск : Рябчиков Игорь Александрович, 2006.

92. Бумагина А. И. и др. Подавление макрочастиц вакуумной дуги при импульсно-периодическом потенциале смещения: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: спец. 01.04. 20 : дис. – 2015.

93. Martin P. J., Bendavid A. Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition //Thin solid films. – 2001. – Т. 394. – №. 1. – С. 1-14.

94. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 28.12.2013).

95. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Минздрав России. – Москва. – 1996.

96. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Минздрав России. – Москва. – 1997.
97. ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Издательство стандартов. – Москва. – 1984.
98. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Издательство стандартов. – Москва. – 1984.
99. ПУЭ-7 Правила устройства электроустановок 2009 г.
100. ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Издательство стандартов. – Москва.- 1984. 106.
101. Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014) "О пожарной безопасности".
102. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".
103. ПБ 03-576-03 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».
104. ГОСТ 12.2.085-2002 «Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности».