

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

Школа – <u>Инженерная школа ядерных технологий</u> Направление подготовки <u>03.04.02 «Физика конденсированного состояния»</u> Отделение школы (НОЦ) – <u>Экспериментальной физики</u>

# МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

#### Тема работы Определение закономерностей влияния параметров лазерной сварки на взаимодействие водорода с циркониевым сплавом Э110

УДК <u>669.296:621.791.72:669.788</u>

Студент

преподаватель ОЭФ

ШТRИ

11			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ71	Федотов Леонид Евгеньевич		

#### Руководитель магистерской диссертации

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Профессор ОЭФ	Лидер Андрей	д.т.н., доцент		
ИЯТШ	Маркович			
Консультант				
Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
	IC D	званис		
Старшии	Кулияров Виктор	К.Т.Н.		

# КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Николаевич

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова	Кандидат		
	Екатерина	философских		
	Валентиновна	наук		
ПС				

#### По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
старший преподаватель	Исаева Елизавета			
ООД ШБИП	Сергеевна			

# допустить к защите:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Руководитель ОЭ $\Phi$	Лидер Андрей	д.т.н., доцент		
ИЯТШ	Маркович			

Код резуль тата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Общекультурные (универсальные) компет	енции
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК- 7), критерий 5 АИОР
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС (ОК- 6, ПК-11), критерий 5 АИОР
Р3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально- экономических условий.	Требования ФГОС (ОК- 2, ОК-4), критерий 5 АИОР
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС (ОК- 3), критерий 5 АИОР
Р5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно- исследовательской деятельности.	Требования ФГОС (ОК- 5), критерий 5 АИОР
	Профессиональные компетенции	
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК- 1, ПК-1), критерий 5 АИОР
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики низких температур, конденсированного состояния и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных и тепловых свойств твердых, жидких и газообразныхвеществ.	Требования ФГОС (ПК- 2), критерий 5 АИОР
P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.	Требования ФГОС (ПК- 4), критерий 5 АИОР
Р9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий	Требования ФГОС (ПК- 3), критерий 5 АИОР

	подход для разработки новых оригинальных идей и	
	методов исследования в области физики	
	конденсированного состояния, низких температур	
	и сжижения природного газа.	
	Способен планировать проведение аналитических	
	имитационных исследований по профессиональной	
	деятельности с применением современных	
	достижений науки и техники, передового	Требования ФГОС (ОК-
P10	отечественного и зарубежного опыта в области	4, ПК-6, ПК-7, ПК-8,
	научных исследований, умеет критически	ПК-9), критерий 5
	оценивать полученные теоретические и	АИОР
	экспериментальные данные и делает выводы, знает	
	правовые основы в области интеллектуальной	
	собственности.	
	Умеет интегрировать знания в различных и	
	смежных областях научных исследований и решает	Trafaparur & FOC (OV
D11	задачи, требующие абстрактного и креативного	греоования ФГОС (ОК- 5 ПИ 10) изиторий 5
r I I	мышления и оригинальности в разработке	3, ПК-10), критерии 3
	концептуальных аспектов проектов научных	AnOr
	исследований.	



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

Школа – <u>Инженерная школа ядерных технологий</u> Направление подготовки <u>03.04.02 «Физика конденсированного состояния»</u> Отделение школы (НОЦ) – <u>Экспериментальной физики</u>

> УТВЕРЖДАЮ: Руководитель ООП \_\_\_\_\_\_Лидер А.М.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

#### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
0БМ71	Федотов Леонид Евгеньевич
Taxa	

Тема работы:

Определение закономерностей влияния параметров лазерной сварки на взаимодействие водорода с циркониевым сплавом Э110

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Циркониевый сплав марки Э110, лазерная сварка
(наименование объекта исследования или проектирования;	при разной энергии пучка, длительности действия
произвооительность или нагрузка; режим раооты (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид	импульса и частоты следования импульса, условия
сырья или материал изделия; требования к продукту,	насыщения водородом из газовой среды,
изоелию или процессу; осооые треоования к осооенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в	автоматизированный комплекс Gas Reaction
плане безопасности эксплуатации, влияния на	Controller LPB фирмы Advanced Material
окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).	Corporation, анализатор водорода RHEN602 фирмы
·	LECO.

Перечень подлежащих исследованию,	– Обзор литературных источников;
проектированию и разработке	– Обработка полученных при различных
вопросов	параметрах лазерной сварки образцов
(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	<ul> <li>парамогран лазерной сварки сораздов циркония марки Э110;</li> <li>Наводороживание полученных при различных параметрах лазерной сварки образцов циркониевого сплава Э110;</li> <li>Расчет скорости сорбции водорода в циркониевом сплаве Э110 после насыщения из газовой среды;</li> <li>Определение содержания водорода в сварных швах сплава до и после насыщения из газовой среды;</li> <li>Анализ полученных результатов;</li> <li>Социальная ответственность;</li> <li>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> </ul>

# Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)

Раздел	Консультант		
Социальная	Исаевна Елизавета Сергеевна, старший преподаватель		
ответственность	ООД ШБИП		
Финансовый менеджмент,	Меньшикова Екатерина Валентиновна, доцент ОСГН		
ресурсоэффективность и	шбип		
ресурсосбережение			
Иностранный язык	Шайкина Ольга Игоревна, преподаватель ОИЯ ШБИП		
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном			
языках:			
ресурсоэффективность и ресурсосбережение Иностранный язык Названия разделов, которн языках:	шьин Шайкина Ольга Игоревна, преподаватель ОИЯ ШБИП ые должны быть написаны на русском и инострани		

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дата выдачи задания на выполнение выпускной	
квалификационной работы по линейному графику	

# Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

		1 /		
Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Профессор ОЭФ	Лидер Андрей	д.т.н., доцент		
ИЯТШ	Маркович			
Старший	Кудияров Виктор	К.Т.Н.		
преподаватель ОЭ $\Phi$	Николаевич			
ИЯТШ				

# Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ71	Федотов Леонид Евгеньевич		

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

Студенту:

Группа 0БМ71 ФИО Федотов Леонид Евгеньевич

Школа	Инженерная школа ядерных	Отделение (НОЦ)	Отделение
	технологий		экспериментальной физики
Уровень образования	Магистрант	Направление/специальность	03.04.02 «Физика
	_		конденсированного
			состояния»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и			
ресурсосбережение»:			
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Амортизационные отчисления — 7 671 руб., стоимость сырья, материала — 7 492 руб., заработная плата — 129965 руб. и отчисления на социальные нужды —35 221 руб.		
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации – 20%, нормы премии по счету заработной платы – 0,3; коэффициент доплат и надбавок – 0,3; районный коэффициент – 1,3; коэффициент дополнительной зарплаты – 10%		
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды – 27,1%		
Перечень вопросов, подлежащих исследованию,	проектированию и разработке:		
<ol> <li>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</li> </ol>	Потенциальные потребители результатов исследования Разработка анализа конкурентоспособности Выполнение SWOT- анализа проекта		

		инилизи проекти.
2.	Планирование и формирование бюджета научных	Составление календарного плана проекта.
	исследований	Определение бюджета НИ
3.	Определение ресурсной (ресурсосберегающей),	Проведение оценки ресурсной и финансовой
	финансовой, бюджетной, социальной и экономической	эффективности исследования.
	эффективности исследования	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений

2. Mampuya SWOT

3. Альтернативы проведения НИ

4. График проведения и бюджет НИ

5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

# Задание выдал консультант:

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

# Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ71	Федотов Леонид Евгеньевич		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0БМ71	Федотов Леонид Евгеньевич

Школа	Инженерная школа	Отделение (НОЦ)	Экспериментальной
	ядерных технологий		физики
Уровень	Магистр	Направление/специальность	Физика
образования			конденсированного
			состояния

# Тема ВКР:

Определение закономерностей влияния параметров лазерной сварки на взаимодействие водорода с циркониевым сплавом Э110				
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:				
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Прибор: Gas Reaction Controller. Рабочая зона: лаборатория; Материал: образцы из сплава циркония Э110			
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектиг	рованию и разработке:			
<ul> <li>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul> <li>специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul> </li> </ul>	<ul> <li>Трудовой кодекс Российской Федерации от 20.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)         <ul> <li>ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ).</li> <li>Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования             <ul></ul></li></ul></li></ul>			

2 П	
2. производственная осзопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов	– вредные производственные
2.1. Апализ выявленных вредных и опасных факторов	факторы, связанные с
2.2. Обоснование мероприятии по снижению	аномальными
возденетвия	микроклиматическими
	параметрами воздушной среды на
	- вредные производственные
	факторы, связанные с
	произволственной среде:
	факторы, связанные с
	электромагнитными полями
	перменного характера:
	<ul> <li>вредные производственные</li> </ul>
	факторы, связанные со световой
	средой;
	<ul> <li>опасные производственные</li> </ul>
	факторы, связанные с
	электрическим током,
	вызываемым разницей;
	электрических потенциалов,
	– пожараопасность.
	В процессе выполнения работы
3. Экологическая безопасность:	отходами является стружка металла,
	которые могут вызвать загрязнение
	почвы и воды. Данные отходы не
	загрязняют атмосферу.
	Возмоные ЧС:
	<ul> <li>выбросы ядовитых веществ,</li> </ul>
	– пожары,
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– взрывы
	– диверсии
	– природные катаклизмы
	Наиболее вероянтным ЧС является
	наступление сильных морозов, пожары.

# Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

# Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподователь	Исаева Елизаветта Сергеевна			

# Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ71	Федотов Леонид Евгеньевич		



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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 03.04.02 «Физика конденсированного состояния»

Уровень образования – магистратура

Отделение школы (НОЦ) – Экспериментальной физики

Период выполнения

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

# КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата	Название раздела (модуля) /	Максимальный		
контроля	вид работы (исследования)	балл раздела (модуля)		
01.03.2018	Аналитический обзор литературы	15		
01.09.2018	Обработка полученных при различных параметрах лазерной сварки образцов циркония марки Э110	15		
30.12.2018	Наводороживание образцов со сварными швами циркониевого сплава Э110	20		
30.04.2019	Анализ результатов	15		
25.05.2019	Социальная ответственность	15		
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	15		
	ресурсосбережение			
25.05.2019	Заключение	5		

# СОСТАВИЛ:

# Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей	д.т.н., доцент		
	Маркович			
Консультант (при наличии)				
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЭФ	Кудияров Виктор	К.Т.Н.		

Николаевич

# СОГЛАСОВАНО:

ИЯТШ

# Руководитель ООП

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

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертационная работа 122 страницы, 24 рисунка, 33 таблицы, 65 литературных источников, 1 приложение

Ключевые слова: импульсная лазерная сварка, циркониевый сплав, сорбция водорода, метод газофазного наводороживания, сварные швы.

Объектом исследования являются образцы из сплава циркония марки Э110 сваренные в различных режимах импульсной лазерной сваркой. Исследование влияния водорода на сварные швы циркониевого сплава проводилась методом газофазного наводороживания. Оценка количества водорода проводилась методом плавления в среде инертного газа.

Целью работы является определение влияния параметров лазерной сварки на содержание водорода и скорость сорбции водорода в сварном шве.

В результате исследования было определено, что изменение энергетических параметров режима лазерной сварки (скорость сварки, энергия импульса, длительность импульса и частота) приводят к снижению начальной концентрации водорода и скорости сорбции в циркониевом сплаве Э110 со сварным швом примерно на 19% и 57%, соответственно. Также было установлено, что динамика насыщения основного металла характеризуется значительной неравномерностью во времени, в то время как насыщение всех происходит монотонно при увеличении сварных ШВОВ энергии И длительности импульса в диапазоне (8,68 ÷ 14,95 Дж) и (10 ÷ 16 мс), соответственно.

В первой главе представлен теоретический обзор выявленной проблемы влияния различного рода сварки на свойства металлов.

Во второй главе описаны экспериментальные установки: газофазное насыщения водородом с использованием автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller, измерение концентрации водорода методом плавления в среде инертного газа с использованием газоанализатора RHEN602 фирмы LECO.

В третьей главе описаны результаты влияния водорода на полученные методом импульсной лазерной сварки сварных швов циркониевого сплава Э110.

# содержание

BBE	ДЕНИЕ15
ГЛА	ВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР17
1.1.	Объект исследования (цирконий Э110)17
1.2.	Особенности окисления циркония 19
1.3.	Взаимодействие циркониевых сплавов с водородом
1.4.	Особенности лазерной сварки
1.5.	Сварка циркониевых сплавов
1.6.	Современные тенденции в сварке циркониевых сплавов
1.7.	Выводы по разделу
ГЛА	ВА 2. ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ
2.1.	Изучение процессов сорбции водорода на автоматизированном
комп	лексе Gas Reaction Controller
2.2.	Измерение концентрации водорода при помощи анализатора
RHE	N602
ГЛА	ВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ
3.1.	Определение содержания водорода в сварных швах циркониевого
спла	ва Э110, полученных методом лазерной сварки 52
3.2.	Исследование влияния водорода на сварные швы циркониевого
спла	ва Э110
ГЛА	ВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ,
PEC	УРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ
4.1.	Потенциальные потребители исследования
4.2.	Анализ конкурентных технических решений с позиции
pecyp	осоэффективности и ресурсосбережения
4.3 S	WOT-анализ
4.4.	Оценка готовности проекта к коммерциализации 60
4.5.	Инициация проекта
4.5	.1. Заинтересованные стороны проекта 60

4.6.	Пл	ан проекта
4.7.	Бю	джет научного исследования62
4.7	.1.	Сырье, материалы, покупные изделия (за вычетом отходов) 64
4.7	.2.	Специальное оборудование для научных (экспериментальных)
pa	бот	64
4.7	.3.	Основная заработная плата
4.7	.4.	Дополнительная заработная плата научно-производственного
пеј	рсон	ала
4.7	.5.	Отчисления на социальные нужды
4.7	.6.	Накладные расходы
4.7	.7.	Расчет затрат на электричество
4.8.	Pee	естр рисков проекта 69
4.9.	Оц	енка сравнительной эффективности исследования
Выв	оды	по главе 472
ГЛА	BA	5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ74
5.1.	Пр	авовые и организационные вопросы обеспечения безопасности 74
5.2.	Bp	едные факторы проектируемой производственной среды
5.2	.1.	Вредные производственные факторы, связанные с аномальными
МИ	кроі	климатическими параметрами воздушной среды на
ме	стон	ахождении работающего78
5.2	.2.	Вредные производственные факторы, связанные с
эле	ектр	омагнитными полями перменного характера 79
5.2	.3.	Вредные производственные факторы, связанные с акустическими
кој	пеба	ниями в производственной среде
5.2	2.4.	Вредные производственные факторы, связанные со световой
cpe	едой	181
5.2.	Вы	явление опасных факторов проектируемой производственной
сред	Ы	
5.2	2.1.	Повышенное значение напряжения в электрической цепи,
зам	лыка	ание которой может произойти через тело человека

5.2	2.2. Пожаровзрывоопасность	. 86
5.3.	Организационные мероприятия обеспечения безопасности	. 87
5.4.	Экологическая безопасность	. 88
5.5.	Защита в чрезвычайных ситуациях	. 88
Выв	од по главе 5	. 90
ЗАК	СЛЮЧЕНИЕ	91
СПІ	ИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92
При	ложение А	98

#### введение

Как известно, цирконий – это материал, который применяется в ядерной энергетике и является основным конструкционным материалом оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов). Это обусловлено тем, что сплавы циркония обладают низким сечением захвата тепловых нейтронов, высокой коррозионной стойкостью, сопротивлением к радиационным повреждениям и хорошими прочностными характеристиками.

Накопление водорода внутри циркониевых сплавов ведет К возникновению множества проблем. В первую очередь значительно повышается хрупкость материала, что является критичным в области ядерной энергетики. Хрупкость повышается за счет проникновения водорода и образования гидридов, что в свою очередь может привести к разрушению изделий согласно механизму замедленного гидридного растрескивания [1-6]. Возникновение трещин влечет проблемы в эксплуатации твэлов. Можно даже пренебречь ситуациями аварийного характера и подумать о том, что, например, твэл который был рассчитан на 5-ти летний срок эксплуатации приходит в негодность после первого года. Это говорит о конструкционной неэффективности, а также об экономической для предприятия.

При изготовлении твэлов трубки, которые содержат в себе урановые таблетки, сваривают, чтобы обеспечить герметичность и безопасность конструкции. С недавних пор Новосибирский завод химконцентратов перешли на лазерную сварку, с этой целью Томский политехнический университет предоставил им установку ЛТА 4-2. Как известно, сварные швы являются зоной, насыщенной дефектами и менее надежной, чем остальная часть трубки из сплава циркония в твэлах.

В работе [7] было проведено определение влияния режимов сварки на ширину сварного шва, зону термического воздействия, а также проведено исследование поверхностных дефектов полученных образцов. Также автором были сформированы основные базовые параметры эксплуатации лазерной

установки. Однако, в настоящее время всё ещё не было исследований влияния режимов лазерной сварки на проникновение водорода в сварные швы сплава Э110, которые были бы полезны с точки зрения безопасности производства и продолжительности эксплуатации твэлов.

Таким образом, <u>целью</u> данной работы является: Определение влияния параметров лазерной сварки на содержание водорода и скорость сорбции водорода в сварном шве.

# <u>Задачи:</u>

• Измерение содержания водорода в сварных швах после лазерной сварки и анализ влияния параметров лазерной сварки на накопление водорода в сварных соединениях циркониевого сплава Э110;

• Осуществление насыщения образцов со сварными швами водородом при 350 °C, 2 атм., до концентрации 0,07 масс.%;

• Расчёт скорости сорбции водорода в циркониевом сплаве Э110 сваренном лазерной сваркой в различных режимах и определение влияния параметров сварки скорость сорбции водорода.

В связи со всем выше изложенным <u>на защиту выносятся следующие</u> <u>положения</u>:

1. Установлено, что изменение энергетических параметров режима лазерной сварки (скорость сварки, энергия импульса, длительность импульса и частота) приводят к снижению начальной концентрации водорода и скорости сорбции в циркониевом сплаве Э110 со сварным швом примерно на 19% и 57%, соответственно;

2. Установлено, что динамика насыщения основного металла характеризуется значительной неравномерностью во времени, в то время как насыщение всех сварных швов происходит монотонно при увеличении энергии и длительности импульса в диапазоне (8,68 ÷ 14,95 Дж) и (10 ÷ 16 мс), соответственно.

# ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В данной главе проведен обзор литературных источников на заданную тему, проведен анализ имеющихся физических характеристик сплава циркония Э110, а также обзор литературы на тематику сварки циркония.

# 1.1.

# Объект

# исследования (цирконий Э110)

Бинарный сплав Э110 состоит из циркония и ниобия, содержание последнего при комнатной температуре не превышает 5%. Более верно будет сказать, что сплав, который применяется в ядерной энергетике, состоит из твердого раствора  $\alpha$  - ниобия в цирконии, который имеет гексагональную плотноупакованную (ГПУ) решетку и твердого раствора  $\beta$  - циркония, имеющего объемно центрированную кубическую (ОЦК) решетку в ниобии[8]. Сплав по текстуре и анизотропии является почти что чистым цирконием, основа которого  $\alpha$  - фаза. Он обладает анизотропией физикомеханических свойств и способен менять свою текстуру по мере обработки давлением, что делает его крайне полезным в применении. Причины, определяющие легирование циркония 1% ниобия (сплав Э110) [9, 10]:

• ниобий обладает небольшим сечением захвата нейтронов, поэтому сечение захвата сплава в целом повышается незначительно;

• роль вредных примесей в цирконии существенно изменяется под влиянием 1% ниобия, стабилизируется коррозионная стойкость, при наличии таких примесей, имеющихся в чистом цирконии, как железо (до 0,3%), никель (до 0,18%), титан, кремний (до 0,4%), углерод, алюминий, устраняется их вредное влияние (однако, с увеличением содержания ниобия, падает коррозионная стойкость);

• ниобий положительно влияет, снижая долю водорода, которую поглощает циркониевый сплав.

В процессе изготовления циркониевых пластин ИЗ сплавов производители развивают в нем предпочтительную ориентацию, которая определяет механические свойства, а также текстуру получаемого изделия, в частности происходит увеличение предела текучести И поперечном направлении. Качество изделий из циркониевых сплавов BO многом определяется структурными показателями, такими как: дисперсность фаз, размер и форма зерна и состояние поверхности, которое влияет на коррозионную стойкость [9]. Чтобы уменьшить коррозионные процессы необходима однородность и равномерность окисной пленки, поэтому мелкозернистость и дисперсность избыточных фаз является обязательным атрибутом качественного продукта из сплава Э110.



Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния системы цирконий-ниобий [9] На рисунке 1.1 приведена диаграмма состояния системы цирконийниобий, построенная при медленных скоростях нагрева и охлаждения. Также ниже приведена таблица отображающая содержание легирующих элементов в сплаве Э110 и его теплофизические свойства.

Элемент	0	Ν	Cu	Ti	Fe	Ni	Ca	Cr	F
Содержание, 10 <sup>-2</sup> %	7	0,6	0,3	0,4	2,1	11	3	0,2	0,09
Таблица 1.2. Теплофизические свойства сплава Э110 [11]									
$T_{\text{емпература}} \circ C = 2C$		3	50		380		120	J	

Таблица 1.1. Содержание легирующих элементов в сплаве Э110[11]

#### <u>і емпер</u>атура, °С $\sigma_{\rm B}, M\Pi a$ $\sigma_{0,2}$ , MIIa $\sigma_{_T}$ , MPa

# 1.2. Особенности окисления циркония

Циркониевые сплавы являются основным конструкционным материалом, который используется в атомных энергетических реакторах с водяным охлаждением. Физические свойства циркониевых сплавов и их изменения в ходе эксплуатации в значительной степени влияют на срок службы и допустимые рабочие условия основных компонентов реактора. Соприкасаясь с хладагентом, цирконий окисляется и поглощают водород.

Как следствие, механические свойства основных компонентов меняются. При переходе к повышенному выгоранию процессы окисления и поглощения водорода могут привести к ограничениям в работоспособности твэлов. Одним из критериев безопасной работы топливного стержня в реакторах является ограничение на толщину оксидной пленки ZrO<sub>2</sub>. Несмотря на то, что коррозия является процессом разрушения, образование плотных оксидных пленок на поверхности циркония способно привести к положительным эффектам благодаря образованию защитного барьера на пути дальнейшего разрушения материала. Окисная пленка предохраняет элементы конструкции из циркония от интенсивного окисления и улучшает условия хранения препятствуя поглощению газов. Также она обладает хорошей плотностью и адгезией к поверхности металла.

Цирконий – единственный материал, помимо титана, растворяющий кислород в больших количествах. Это свойство повышает перспективность

сплавов Zr-O с точки зрения использования на практике легирования кислорода и таким образом позволяет управлять структурой и свойствами сплавов циркония. На структурно-фазовое состояние сплавов циркония также большое влияние имеет содержание кислорода. Например, наличие кислорода (в количестве 0,2%) в твердом растворе способствует увеличению параметров кристаллической решетки, повышению температуры аллотропического процесса и увеличению плотности[12]. Наличие кислорода в сплаве также способно влиять на электрические и тепловые свойства. При легировании кислорода в циркониевые сплавы механические свойства меняются следующим образом: прочность текучести И предел увеличиваются, повышается твердость, уменьшаются пластичность и вязкость[13].

Окисление циркониевых сплавов изучается в течение длительного периода времени и учеными уже достигнуто неплохое понимание физики процессов для высокотемпературных условий в окислительных средах: водорода, пара и жидкости, к примеру, работы [14-16].

Процесс окисления можно подразделить на три этапа:

1. На начальном этапе, при нормальных условиях оксидная пленка образуется довольно быстро и состоит из небольшого числа моноатомных слоев. Эти слои неупорядоченные и состоят из нестехиометрических оксидов циркония.

2. Следующей стадией окисления является этап предварительного перехода, который имеет место при температурах от 200 °C и выше. На этой происходит кубическим стадии рост оксидной пленки ПО ИЛИ параболическим законам до толщины оксида 2-3 мкм. Внутренняя область пленки нестехиометрическая, внешняя - близко к стехиометрическому составу. Такая пленка является защитным барьером для окисления и проникновения водорода. Однако с ростом оксидной пленки происходит увеличение механических напряжений на границе металл / оксид и происходит образование трещин при определенных толщинах.

3. При дальнейшем росте оксидной пленки более 2-3 мкм кинетика изменений роста для квазилинейной зависимости окисления. Эта стадия роста оксидной пленки характеризуется большим количеством дефектов в оксидной пленке, такой как трещины и поры [17, 18].

Несмотря на то, что границы реализации этих трех режимов окисления для различных сплавов в разных условиях достаточно хорошо сформулированы, проблемы, связанные с определением физических механизмов, регулирующих скорости коррозии в циркониевых сплавах, остаются открытыми. До сих пор ведутся дискуссии о роли различных физических процессов, которые регулируют перенос различных элементов (кислорода, водорода, электронов и дырок проводников, добавок сплавов и примесей) через оксидную пленку [19].

Однако независимо от точки зрения на процесс проникновения водорода в цирконий через оксидную пленку, наиболее важным остается факт того, что после проникновения металл становиться более уязвимым. Проникновение водорода вызывает изменение многих физико-химических свойств, таких как: пластичность, твердость, появление хрупкости. В силу увеличения хрупкости поверхность может растрескаться и начаться механизм замедленного гидридного растрескивания.

# 1.3. Взаимодействие циркониевых сплавов с водородом

Водород взаимодействует практически со всеми металлами и вносит изменения в том числе и в механические свойства. В случае с циркониевыми сплавами, применяемыми в ядерной энергетике это взаимодействие особенно важно так как изменения свойств сплава влияют на эксплуатацию твэлов. А потому возникает необходимость изучать и отслеживать изменения механических свойств конструкционных материалов.

Водород, адсорбированный металлом, как правило может находится в четырех состояниях: растворяется в металле; сегрегирует на

несовершенствах кристаллической решётки; адсорбируется на поверхности или скапливается в молекулярной форме в микрополостях; образовывает гидриды с основным металлом. [20, 21]. Ловушками для водорода могут быть микродефекты, дислокации, микротрещины и т.д. Энергия связи водорода может быть от 0,2 эВ (для водорода в форме газа внутри микродефектов) до нескольких эВ (для химически связанного водорода) в зависимости от типа ловушки. В свою очередь в зависимости от величины энергии связи ловушки делятся на обратимые и необратимые. Обратимым ловушкам присуща низкая энергия связи, а также состояние динамического равновесия между собой и равновесными положениями атомов в идеальной кристаллической решетке. В свою очередь необратимым ловушкам свойственна высокая энергия связи. Если в условиях комнатной температуры произвести дегазацию металла, то водород покинет обратимые ловушки, а для получения схожего эффекта в необратимых необходимо значительно повысить температуру (вплоть до уровня энергии связи). При захвате необратимыми ловушками количество диффузионно-подвижного водорода в металле снижается [21, 22].

Степень наводораживания в условиях длительной эксплуатации в реакторе зависит, прежде всего от температуры и интенсивности коррозии 200-300 ppm водорода[23]. При изделия, вплоть до температурах эксплуатации твэлов 300-350 °C растворимость водорода в сплавах циркония с содержанием 1-2,5% ниобия варьируется в пределах 300-400 ppm[24], что говорит о том, что в условиях рабочих температур избыточный водород находится в структуре материала в виде гидридов, а в случае охлаждения до 20-60 °C – весь водород содержится в гидридах. В пересыщенных твердых растворах выделение гидридной фазы осуществляется вдоль границ зерен. Ориентация зерен в свою очередь зависит от внутренних напряжений и текстуры сплава. И в случае гидридных пластин возникают трещины.

Разрушение наводороженных сплавов циркония обычно разбивают на несколько стадий: образование и развитие трещин в гидридах в результате взаимодействия гидрид-полоса скольжения или гидрид-двойник; выход

трещины из гидрида в матрицу и распространение трещины в матрице [25, 26]. Характер распределения гидридов существенно влияет на разрушение циркониевых сплавов, а также пластинчатые выделения гидридов оказывают наибольшее вредное воздействие[27]. Изменение формы выделяющихся гидридов от пластин к частицам сферической формы ведет к существенному снижению охрупчивания материала.

При эксплуатации сплавов циркония при высоких температурах (300-350 °C) и высоких напряжениях (80-100 Мпа) в условиях постоянно приложенной нагрузки происходит возникновение и развитие гидридных трещин по механизму замедленного гидридного растрескивания. Рост трещин такого типа может привести к к разрушению конструкции даже при напряжении ниже предела текучести. Механизм замедленного гидридного растрескивания по данным [28, 29] включает следующие этапы:

1. растворение гидридов в областях матрицы с низким напряжением;

2. диффузия водорода в направление градиента напряжения (в вершину трещины, где напряжения максимальны);

3. выделение продиффендировавшего водорода в виде гидридов в вершине трещины;

4. рост гидридов в вершине трещины до критического размера, достаточного для их разрушения;

5. разрушение гидридов в вершине трещины, причем последовательное повторение процесса приводит к ступенчатому росту трещины.

В случае замедленного растрескивания на скорость роста трещины оказывает влияние дисперсность гидридных выделений: скорость распространения трещины повышается в зависимости от того насколько дисперсные выделения при равном содержании водорода в сплаве[30].

Согласно второму механизму, вторичное гидридное растрескивание происходит за счет хрупкого разрушения гидридов и последующего слияния нескольких трещин.

Каждое изделие из циркония после процесса изготовления содержит некоторое количество водорода. На уровень наводорожености изделия существенное влияние оказывают: технология его производства, качество этого производства, а также технические возможности применяемого оборудования. Основными источниками поступления водорода в изделие в процессе изготовления являются: исходные шихтовые материалы; среда, в которой выполняются технологические операции на всех стадиях получения и обработки металла; травление в кислотах. Сварка является одним из способствует технологических процессов, который насыщению металлического сплава водородом. Поскольку цирконий относится к металлам с высокой химической активностью, его сварку необходимо проводить в нейтральной среде, применяя аргон или гелий. В процессе сварки водород образуется из влаги, которая попадает в аргон из воздуха вследствие несовершенства газовой защиты жидкой "ванны", также водород содержится в сварочной проволоке. Формирование шва в процессе сварки происходит при высоких температурах, что значительно повышает вероятность наводороживания сварного соединения.

Присутствие водорода вызывает образование холодных трещин в наплавленном и основном металле [3, 23].

# 1.4. Особенности лазерной сварки

Чтобы приступить к рассмотрению сварки циркония и его сплавов, сначала необходимо рассмотреть лазерную сварку и микросварку в целом. Строгого определения лазерной сварки не установлено и каждый автор толкует его по-разному. Например, в [31] лазерную сварку относят к термическому классу процессов, в которых сначала на небольшой области расплавляют материал, а затем расплав кристаллизируется и достигается неразъемное соединение. Затвердевание расплава сопровождается установлением прочных химических связей между атомами материалов, согласно их природе и типу кристаллической решетки.

Принципиальную схему работы лазерной сварки можно представить, как: исходный пучок энергии в фокусирующей системе преобразуется в пучок меньших размеров после чего достигает свариваемый материал, где частично отражается и частично поглощается, что в свою очередь ведет к нагреву и расплавлению материалов. Как видно из принципиальной схемы, источником темповой энергии при лазерной сварке выступает излучение, которое поглощается материалами в зоне воздействия лазерного пучка.

Применение лазерной сварки может обеспечить более высокое качество получаемых твэлов, вследствие того, что она обладает рядом преимуществ в сравнении с остальными методами сварки. С использованием лазерной сварки можно сформировать узкую и более глубокую область проплавления, вследствие высокой плотности мощности луча, в сравнении с дуговыми и плазменными методами. Еще к преимуществам сварки лазером относят её универсальность и широкий спектр материалов, к которым ее можно применить. Это могут быть самые различные сплавы металлов или полимеры [22]. Среди преимуществ, которые названы выше, стоит перечислить те, что в первую очередь выгодно выделяют лазерную сварку в производстве твэлов [33]:

- небольшая зона термического воздействия (ЗТВ);
- высокопрочные сварные швы;
- легко автоматизируется;
- как правило, не требуется присадочного материала или флюса

В данном случае речь идет не просто о лазерной сварке, а именно о лазерной микросварке. Также, как и определение лазерной сварки, строгого определения микросварки в литературных источниках нет. Однако в

некоторых источниках можно встретить удовлетворительную формулировку. Например, в [14] говорится, что лазерная микросварка – это метод соединения деталей, который способен обеспечить размер сварочного шва менее 1 мм, а также глубину проникновения сварного шва менее 1 мм. Этот метода широко применяется в некоторых отраслях, таких как: медицинская и автомобильная промышленность, электроника и т.д.

Как было определено выше в ходе применения лазерной сварки материалы сначала расплавляются, а затем соединяются в следствии нагрева сфокусированным лазерным лучом. Пучок фокусируют в первую очередь для того, чтобы задать мощность лазера и скорость сварки при которой будет расплавлен материал. Выбор данных параметров зависит в первую очередь от целей и задач, поставленных перед оператором и производством. Также перед оператором стоит задача высокоточного контроля допусков зазора и совместного позиционирования соединяемых компонентов.

Вследствие того, что при лазерной микросварке присадочные материалы не применяются, зазоры необходимо заполнять материалом, области который будет ИЗ смежной С основным, ЧТО потребует дополнительной энергии. Размер зазора в большинстве случаев не превышает 10% от толщины самого тонкого компонента сварки. Проблемы зазора проявляются из-за сильной вогнутости сварных швов или неспособности преодолеть разрыв, создаваемый между соединяемыми частями, кроме того, гораздо труднее начать лазерную сварку в зоне большого зазора.

# 1.5. Сварка циркониевых сплавов

В данном разделе рассмотрена история сварки циркониевых сплавов. Требования к конструкционным материалам, применяемым в сфере ядерной энергетики крайне высоки: высокая коррозионная стойкость, низкое сечение захвата нейтронов, стойкость к радиационному излучению, определенные механические свойства при высоких температурах. Среди материалов,

удовлетворяющих эти требования и применяемых в ядерной энергетике наибольшее распространение получили магний, бериллий, нержавеющие стали, алюминий и цирконий. Тем не менее, бериллий использую не так часто, вследствие его дороговизны. Алюминий и его сплавы применяются в низкотемпературных ядерных реакторах, вследствие изменения их свойств в негативную сторону при высоких температурах. Сплавы магния при контакте с водой под давлением теряют коррозионную стойкость.

Таким образом, наиболее широкое применение в ядерной энергетике получил цирконий и его сплавы, а также нержавеющие стали [8], так как обладают исключительными свойствами:

• минимальный паразитный захват нейтронов;

• механическая надежность, постоянство формы и размеров;

• высокая теплопроводность, обеспечивающая длительную теплопередачу без чрезмерно высоких термических напряжений в оболочке;

• коррозионная и эрозионная стойкость оболочки в теплоносителе и в контакте с ядерным горючим твэла.

Изучение учеными циркония длится уже два столетия, а работы по применению его сплавов в отрасли ядерной энергетики выходят почти восемь десятков лет [34, 35], интерес к данному материалу не угасает. Данную тенденцию можно связать с движением отрасли ядерной энергетики по пути увеличения параметров ядерных реакторов, таких как: плотность нейтронов, нейтронов, потока спектр снимаемая мощность теплонапряжённости и температуры. Для поддержки стабильности и безопасности ядерных реакторов не последняя роль отведена конструкции твэлов, важной частью которой являются сварные соединения. В свою очередь необходимо изучить сварной шов и зону теплового воздействия на предмет остаточных напряжений, загрязнений, проникновения водорода [9].

Уже в 60-х годах двадцатого века [36, 37], была отмечена хорошая свариваемость циркония с использованием дуговой и контактной сварки.

Хотя количественных данных предоставлено не было, как качественные критерии выступили пластичность и коррозионная стойкость. Вообще ко времени написания данной работы данных о сварке циркония было крайне мало.

В следующем десятилетии инженеры и ученые, кроме контактной и дуговой [36] сварки, приступили к изучению микроплазменной сварки циркония [37]. По причине применения в реакторах того времени одновременно сплавов циркония и нержавеющей стали [38], актуальной являлась технология по созданию биметаллических соединений. Тем не менее прочностные свойства таких материалов при повышенной температуре заметно ухудшались из-за возникновения на границе раздела материалов весьма хрупких интерметаллических слоев.

Первый заметный скачок в увеличении публикуемых работ на тему сварки циркония и его сплавов произошел в 1980-х годах. Основным методом стала электронно-лучевая сварка, а также широко применялась точечная и диффузионная сварка. Ученые и инженеры продолжали оптимизировать технологии для получения неразъёмных соединений нержавеющей стали и циркониевых сплавов [39].

Изучение, опыт в производстве и эксплуатации тепловыделяющих элементов из сплавов циркония, который накапливался в течении трех десятков лет, дал понять ученым, что необходимо уделять особое внимание проблемам стабильности свойств эксплуатации. Эти свойства необходимо было отслеживать и исследовать, ведь даже незначительное изменение размера зерна, его структуры, состояния поверхности или геометрии деталей, в том числе при их производстве (сварка) [9, 40] вело к сдвигу безопасности эксплуатации.

В 1990-х годах стали применять новые виды сварки такие как: сварка неплавящимся электродом в гелии и аргоне [41,42,43], контактную стыковую [44], а также лазерную [45].

В настоящее время, несмотря на долгую историю развития в применении сплавов циркония в качестве конструкционного материала в твэлах, публикаций, посвященных тематике оптимизации сварки, стало значительно больше. Это можно объяснить тем, что в данный момент предприятия стараются увеличить число ядерного топлива, а также тем, что дефекты в твэлах все еще присутствуют и далеки от желаемого значения [46]. Таким образом, исследование поведения элементов тепловыделяющих сборок при наличии дефектов в сварных швах остается очень актуальным [47], а также улучшение технологии их производства, частью которой является сварка.

В данный момент множество исследований направлены на модернизацию технологий, применяемых в производстве дистанцирующих Вследствие конструкция дистанцирующих решеток. ЭТОГО решеток улучшается, и являющаяся на данный момент стандартом контактная точечная сварка теряет актуальность. К одной из наиболее привлекательных альтернатив можно отнести лазерную сварку. Тем не менее публикаций [48] на данную тему крайне мало, и они сконцентрированы на зарубежных марках сплавов циркония.

А работ посвященных лазерной сварке на сплаве циркония Э110, а также других российских сплавов циркония нет. Также нельзя найти работы связанные с механизмами проникновения водорода швы лазерной сварке в цирконии, что делает исследование в данной области весьма актуальным.

# 1.6. Современные тенденции в сварке циркониевых сплавов

В недавней работе [49] проводилось исследование посвященное подбору оптимальных параметров электронно-лучевой сварки ниобиевого сплава (Nb-1%Zr). Для проведения исследования использовались листы с внешними параметрами 50×15×3 мм. Параметры сварки представлены в таблице 3.

Номер образца	Сила тока пучка	Напряжение	Скорость сварки
1	20 мА	85 кВ	10 мм/с
2	24 мА	85 кВ	10 мм/с
3	30 мА	85 кВ	10 мм/с
4	35 мА	85 кВ	10 мм/с

Таблица 1.3. Параметры сварки[1]

После выполнения сварки зоны с нетронутым металлом, зона теплового воздействия (3TB), а также сами сварные швы были изучены с точки зрения металлографии (геометрия и глубина проникновения сварки) и измерялись различные механические свойства. Среди прочего было проведено исследование на структурный состав методом рентгеноструктурного анализа (PCA).

Из РСА авторы данной статьи сделали вывод о том, что легирующих элементов не более 1%. Также по результатам растяжения на прочность и испытаний на твердость стало ясно, что данный сплав ниобия обладает относительно низкой твердостью и прочностью на растяжение.

Из анализа изображений, полученных с микроскопа, авторы отмечают отсутствие четкой границы между основным металлом и расплавленным. Соотношение температурного градиента к скорости сварки, которое определяет грубость и размер области сварки, увеличивается, что говорит об уменьшении роста зерна в центральной линии сварного шва.

Профили твердости поперечного сечения сварного шва показывают, что твердость зоны сварки и ЗТВ значительно ниже, чем твердость основного металла. Прочность на разрыв сварного шва измеряли для образца с током 30 мА, равным 281 МПа, который составляет 53% основной массы.

Говоря о затвердевании шва, авторам удалось выявить что температура рекристаллизации этого сплава при электронно-лучевой сварке была рассчитана как 713 °C, а также что затвердевание в сварных швах происходит в виде пор, а соединения меж порами создаются за счет микросегрегаций.

Одним из главных результатов работы является выявление наиболее оптимального режима сварки с точки зрения с точки зрения микроструктуры, глубины проникновения, механических свойств и геометрии. Таким режимом сварки является режим №3, характеризующийся силой тока 30 мА.

Другое исследование [50] посвященное уже коммерческом сплаву циркония (R60702), применяемого в атомной энергетике посвящено изучению морфологии, микроструктуры, механических свойств, а наиболее важно коррозионной стойкости сварного шва и основного металла. В данной работе применяли волоконно-лазерную сварку на циркониевой пластине.

В данном испытании использовали прокатанный коммерчески чистый цирконий (R60702), размер образца составлял 100×30×1,12 мм. Перед сваркой с помощью пескоструйной обработки с образца удалялись оксидные слои и возможные жировые загрязнения. В процессе сварки лазерные лучи были наклонены и создавали угол 10° с вертикальным направлением. Кроме того, использовался экран, так что образец находился в защитной среде с чистым аргоном и лазером. После выполнения процесса сварки были сделаны макроснимки сварочных швов и проведены измерения ширины сварки на верхней и нижней поверхностях сварных швов. В испытании на микротвердость по Виккерсу рабочая нагрузка и время ожидания были установлены на 4,9 Н и 10 с. Испытание на растяжение для сварного соединения и основного металла проводилось на универсальной электронной машине для испытания на растяжение со скоростью растяжения 1 мм / мин.

Важным для данного исследования параметром являлось значение параметра R<sub>w</sub>, который является отношением корневой ширины и лицевой ширины шва (см. рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Определение отношения ширины сварки R<sub>w</sub> [50]

Данный параметр может быть принят в качестве критерия приемлемости качества сварки для оценки стабильности обработки при полной проходной сварке [51].

Из серии экспериментов и анализа литературы, авторами данной статьи был найдет оптимальный диапазон значений R<sub>w</sub>. Значение R<sub>w</sub> должно быть выше 0,8 для предотвращения порового дефекта и ниже 0,95 во избежание вогнутого кратера при сварке чистого циркония толщиной 1,12 мм волоконным лазером. При увеличении мощности лазера максимальное  $R_{w}$ значение сдвигалось направлении более положительного В расфокусировочного расстояния или более высокой скорости сварки. Ширина лицевой сварки, ширина корневого шва и R<sub>w</sub> отдельных сварных швов волоконного лазера (скорость сварки 4 м / мин, расстояние дефокусировки 2 мм и мощность лазера 2,5 кВт) составили 1,55 мм, 1,37 мм и 0,88 мм соответственно.

Анализ результатов, полученных из микроскопии и морфологических исследований позволил авторам сделать выводы касательно состояния сварного шва и зоны теплового воздействия. При использовании в исследовании волоконно-лазерного сварного соединения было установлено, что зона плавления состоит из грубых столбчатых зерен исходного β-Zr, тогда как основной металл состоял из тонкого равноосного α-Zr зерна. Кроме того, в исходных β-Zr-гранулах в сварном шве было большое количество тонкого пластинчатого α-мартенсита. Помимо прочено, интересным наблюдением можно считать, что твердофазное преобразование происходило

в ЗТВ вблизи сварочных швов. Таким образом, микроструктура ЗТВ составляла часть характеристики зоны основного металла и самого шва.

Из-за тонкого α' фазового пластинчатого мартенсита, распределенного по остаточным начальным фазам β-фазы в сварном шве, микротвердость сварного шва оказалась самой высокой, ниже – ЗТВ и последним стал основной металл.

Проведя испытание прочности на растяжение был сделан вывод о том, что прочность сварного шва составила 314,75 МПа, что чуть больше, в сравнении с основным металлом (311,61 МПа).

Один из наиболее важных выводов в данной работе посвящен успешному повышению коррозионной стойкости полученных швов и ЗТВ. Благодаря мартенситному превращению в сварном шве и близкой к сварному шву ЗТВ, коррозионная стойкость сварного соединения, испытанная 20% раствором уксусной кислоты, была качественно лучше, чем у основного металла.

Quhon Han et. al., в 2012 году проделал работу [52] на тему лазерной импульсной сварки на тонких листах сплава Zircaloy-4. Эксперименты по лазерной сварке проводились с использованием образцов Zircaloy-4 размером 80×15×0,6 мм.

Так же авторами было проведено численное моделирование с использованием коммерческого кода SYSWELD. Для моделирования процесса импульсной лазерной сварки разработана трехмерная модель конечных элементов. Моделирование было проведено с целью оптимизации процесса лазерной сварки путем прогнозирования эволюции лазерных полей и механических свойств.

Авторы разбили свойства материала (касательно лазерной сварки) на две группы: одна группа состоит из тепловых свойств, таких как теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость, которые необходимы для анализа распределения температуры. Другая группа состоит из механических свойств, таких как модуль упругости, предел текучести и

тепловая деформация, которые необходимы для анализа пластической деформации.

Сварочные работы выполнялись с использованием лазера Nd:YAG с пиковой мощностью 1 кВт, частотой импульсов 5 Гц и 10 мс для длительности импульса. Испытания на растяжение проводились при температурах от комнатной температуры до 800 ° С со скоростью деформации 0,1 мм / с. Предел текучести зоны теплового воздействия для Zircaloy-4 выше, чем у сварного шва. Перелом сварного образца произошел в зоне теплового воздействия, так как ЗТВ является довольно хрупкой частью.



Рисунок 1.3 – Геометрия сварочной плиты и изображение сетки вдоль линии сварки.

Для импульсной лазерной моделирования процесса сварки разработана модель конечных элементов. Пластинчатая трехмерная структура состоит из 8-элементных кирпичных элементов и 6-узловых призматических элементов с 58 600 узлами и 49220 элементов, как показано на рисунке 1.3. На линии сварки находятся 38 одномерных элементов, каждый из которых представляет собой точечный сварной шов. Область вдоль линии сварки дискретизирована очень плотной сеткой, поскольку малый размер сварного шва и ЗТВ имеют высокий температурный градиент. Размер дискретизированной области определяется как размер, который может включать сварной шов и ЗТВ. Функция времени разрабатывается с помощью подпрограммы FORTRAN.

Как показано на рис. 1.4, результаты моделирования согласуются с экспериментальными наблюдениями, представляющими точное предсказание температуры, соответствующее изменению фазы.



Рисунок 1.4 – Профили зоны сварного шва и ЗТВ с учетом теплового воздействия на поверхность: (а) смоделированные и (б) из эксперимента

В данном исследовании авторами разработана модель конечных элементов импульсной лазерной сварки для пластины Zircaloy-4, которая фазовые переходы и динамические свойства материала с включает переходной температурой. Модель способная предсказывать изотермы переходных температур, параметры сварочных бассейнов и соответствующие тепловые деформации. Результаты моделирования показывают, ЧТО сваркой, сильно зависят от геометрии зоны искажения, вызванные расплавления и зоны термического воздействия. Сжатие индуцированных искажений тонких листов уменьшается по мере увеличения мощности лазера, что вызвано морфологическими эволюциями сварного шва. По мере увеличения мощности лазера направление градиента ЗТВ, соответствующее тепловому градиенту, становится равномерно вдоль направления толщины, что вызывает уменьшенное тепловое искажение. На основе разработанной модели импульсной лазерной сварки для Zircaloy-4 может быть разработана систематическая система проектирования сварочного процесса.

Еще одна работа [53] посвященная сварке циркония была сделана в 2012 году. Авторы данной статьи исследовали вид сварки, который не подразумевает процесса расплавления материала, сварку трением с перемешиванием (FSW). В этом исследовании FSW применяли к Zircaloy-4 с использованием сплавного инструмента на основе кобальта, разработанного

авторами [54]. Изучалась возможность применения FSW к Zircaloy-4 и распределения микроструктуры и твердости в сварном шве. Кроме того, была также оценена микроструктурная эволюция во время применения FSW.

После процесса сварки профиль твердости образца по Виккерсу был измерен поперечным сечением перпендикулярно направлению сварки. Микроструктура сварного шва была исследована методом оптической микроскопии и дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). Образец подвергали электролитическому вытравливанию в растворе, состоящем из 10 мл хлорной кислоты и 90 мл уксусной кислоты при комнатной температуре с напряжением 35 В. Система EBSD, оснащенная сканирующим электронным микроскопом была использована для получения данных об ориентации с размером шага 0,4 нм.

Внешний вид сварного шва показан на рисунке 1.4а. Получена гладкая, блестящая поверхность без дефектов. Обзор поперечного сечения сварного шва представлен на рисунке 1.4b.



Рисунок 1.5 – Обзор (а) внешнего вида и (b) поперечного сечения сварного шва, а также (c) профиль твердости, измеренный поперек шва. «RS» и «AS» означают отступающую сторону и продвигающуюся сторону сварного шва
#### соответственно.

График значений твердости по Виккерсу в зоне шва приведено на рис. 1.5с. Твердость основного материала составляет от 170 до 180 Hv. Твердость увеличивается от области основного материала к зоне шва, а твердость зоны шва достигает около 188 Hv.

В ходе выполнения работы было отмечено, что формируется равноосная структура зерна. Твердость в зоне шва увеличена, что можно связать с очисткой зерна. Этот процесс был обусловлен непрерывной рекристаллизацией с возможным вкладом от прерывистой рекристаллизации.

Еще одна работа [55] посвящена электронно-лучевой сварке, только уже циркониевого сплава Zr-702. Применение электронно-лучевой сварки в высоком вакууме призвано защитить сплав от проникновения в металл N, H и O. В данной работе авторы также, как и в [50] работе делают акцент на изучении коррозионной стойкости сварного шва и зоны теплового воздействия.

Прокатанные листы сплава Zr-702 были разрезаны на меньшие листы с геометрией  $50 \times 20 \times 4,3$  мм и подвергнуты отжигу. Затем поверхности листом были обработаны абразивными бумагами SiC и на 10 минут погружены в ванны с ацетоном под действие ультразвука. Сварка была проведена на сварочном аппарате TECHMETA с ускоряющим напряжением 60 кВ и степенью вакуума в диапазоне от  $2,0 \times 10^3$  до  $3,0 \times 10^3$  Па. Скорость сварки составляла 300 мм / мин, и ток пучка был от 15 мА до 18 мА.

Для получения характеристик поверхности и морфологии образцов после сварки проводились исследования рентгеноструктурным анализом (PCA), сканирующей электронной микроскопии (CЭM), просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ) оборудованной энергодисперсионным спектрометром (EDS) и оптической микроскопией (OM) с поляризационной пленкой.

Оптимальными параметрами сварки оказались ток пучка 16,5 мА и скорость сварки 300 мм / мин. Поверхность полученных швов была чистой и

серебристо-белого цвета, что указывает на эффективность применения электронно-лучевой сварки в целях защиты сплава от загрязнений.

Результаты РСА и ПЭМ указывают на то, что сварные соединения полученный данным видом сварки состоят из α-Zr и β-Zr. Если точнее, то блоки β-Zr небольшого размера распределяются по краям ламеллярного α-Zr. Также полученные авторами данные указывают на крайне низкое содержание в сварном шве свойственного данному сплаву соединения Zr<sub>3</sub>Fe, которое негативно влияет на коррозионную стойкость сплава циркония.

Для того, чтобы изучить коррозионную стойкость авторы проанализировали поляризационные кривые основного металла, зоны термического воздействия и сварных швов. Из анализа следует, что все поляризационные кривые имели аналогичные характеристики. После этого образцы были опущены в солевой раствор. Для выявления различий коррозионной стойкости между основным металлом, ЗТВ и швами использовались СЭМ и EDS. Из чего были сделаны следующие выводы: Zr<sub>3</sub>Fe, содержащийся В основном металле, сильно влияет на его коррозионную стойкость. Зона термического воздействия и сварной шов соединения обладают лучшей коррозионной стойкостью, чем основной металл, поскольку сварка электронным лучом с высоким вакуумом способствует очистке сварных швов.

В работе [56] изучается влияние сварки лазерным лучом CO<sub>2</sub> на сплав Zircalloy-4. Положительными сторонами данного вида сварки являются: небольшая зона теплового воздействия, которая довольно быстро охлаждается; большое значение коэффициента глубины сварки, что является необходимым критерием в процессе изготовления топливных стержней из Zircalloy-4. Чтобы исследовать данный вид сварки и его влияние на циркониевый сплав, авторы решили провести анализ на морфологию и виды фаз, которые возникают в сварном шве и ЗТВ. Так же было проведен анализ на микротвёрдость методом Виккерса.

Полный анализ химического состава был проведен методом рентгенофлуорисцентного анализа (РФА) данные которого представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Результаты РФА[56]

Примесные элементы	Сг, ат.%	Sn, ат.%	Fe, ат.%
Zircalloy-4	0,12	1,43	0,20

Процесс сварки осуществлялся на установке SPECTRA-PHYSICS LASER CO<sub>2</sub> 1,5 KW. В данной установке присутствует источник бесперебойного потока CO<sub>2</sub> (10,6 мкм) 1500 Вт. После окончания процесса сварки было отмечено, что микроструктура состоит из следующих зон: центральной зоны, которая соответствует зоне сварного шва, и зоны термического воздействия (3TB), структура которой показывает мелкозернистость, а также структуру типа Widemansttäten [57, 58].

Говоря о структуре сварных швов полученных лазерной CO<sub>2</sub> сваркой, то для в двух образцах шов представлял собой чисто ферритный α-Zr. Это было подтверждено PCA и EDS анализами.

Микротвердость измеренная по методу Виккерса показала, что сам сварной шов и ЗТВ являются однородными и между ними не наблюдается существенной разницы. Этот результат считается верным с учетом значения шага 0,5 мм [59, 60].

Работа [61] опубликована в 2016 году и посвящена механическим свойствам при комнатной температуре листа циркониевого сплава Zircalloy-4 полученного электронно-лучевой сплавкой.

Лист Zircalloy-4 толщиной 1,6 мм был успешно сварен с помощью электронно-лучевой сварки. Лист сначала сваривали с параметром 10,5 Дж / мм, затем 36,7 Дж / мм с окончательным тепловым входом (heat input) 15,7 Дж / мм.

Расчет границ сварного шва и ЗТВ с использованием аналитического уравнения сварки Rosenthal (1.1) для трехмерного теплового потока для

полубесконечной заготовки хорошо коррелирует с экспериментальными измерениями.

$$\frac{2\pi(T-T_0)kR}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R-x)}{2\alpha}\right]$$
(1.1)

Где *T* – температура; *T*<sub>0</sub> – температура заготовки перед сваркой; *k* –теплопроводность заготовки.

Примененные в данной работе для листа Zr-4 (1,6 мм) параметры электронно-лучевой сварки, позволили изготовить материал, механические свойства которого, близки к свойствам чистого листа из Zr-4.

Материал изготовленный при помощи сварки имеет схожую твердость в сравнении с основным металлом (различие 0,8%). Значение твердости возрастает при переходе от основного металла до начала сварного шва (т.е. 3TB) и, наконец, выравнивается в зоне основного металла. 3TB имеет более высокую твердость, чем основной металл (примерно на 3%) и зона сварки (примерно на 2%). Общее различие между в твердости между Zr-4 и сваренным материалом можно считать незначительным.

Результаты СЭМ показывают четкую морфологию микроструктуры и размер зерна в зоне сварки, ЗТВ и в основном металле. Самые больше зерна в сварном шве (39,5 нм), в основном металле они становятся меньше и более нм). Образец материала регулярными (6 ИЗ сварного показывает большие пластинки α-Zr типа Widmanstätten. преимущественно Зона теплового воздействия состоит из игольчатой микроструктуры Zr. Основной металл демонстрирует равноосную мелкозернистую структуру α-Zr.

В работе [62] было изучено поведение поглощения водорода для образцов для сварки путем изучения количества гидридов циркония после испытаний на коррозию. Затем обсуждалось влияние легирующих модификаций на поглощение водорода циркониевыми сплавами.

Таблица 1.5. Состав циркониевых сплавов (в масс.%)

	Элементы сплава				
помер полосы	Sn	Fe	Cr	Nb	

№1 (1,97Sn-0,37Fe-0,23Cr- Zr)	1,97	0,37	0,23	/
№2 (1,92Sn-0,32Fe-Zr)	1,92	0,32	/	/
№3 (1,88Sn-0,35Fe- 0,52Nb-Zr)	1,88	0,35	/	0,52
№4 (Zircaloy-4)	1,50	0,20	0,10	

Для получения стыковых соединений две полосы с одинаковым составом (например, №1) сваривались попеременно тремя полосками №4 (Zircaloy-4) посредством вакуумной электронно-лучевой сварки, как показано схематически на рисунке 1.6. Для упрощения записи образцы, где полосы №1 сваривались попеременно с полосами №4, обозначались как 1-4. Остальное можно обозначить аналогично, т.е. 2-4, 3-4 и 4-4.



Рисунок 1.6 – Принципиальная схема сварочного образца

Для анализа состава композиции в разных положениях на расстоянии 50 нм от поверхности сварки, они были проанализированы электронным микрозондом. Относительное содержание Sn, Fe и Cr в каждой позиции было получено путем сравнения их пиковых интенсивностей с значениями в Zircaloy-4 соответственно.

Сварные образцы были разрезаны на расстоянии 10 мм перпендикулярно сварочным швам путем искровой резки (см. рис. 1.6). Образцы были разделены на две группы, каждая из которых содержала по три образца. Одна группа подвергалась процессу отжига при температуре 500 °C в течение 1,5 ч, а другая не подвергалась отжигу. Испытания на коррозию

образцов для сварки проводили в автоклаве при 400 °C в паре 10,3 МПа  $H_2O$  в течение 165 дней. До проведения испытаний на коррозию образцы очищали и травили в растворе 10% HF + 45%  $HNO_3$  + 45%  $H_2O$  (по объему), а затем промывали в холодной водопроводной воде и кипятили деионизированную воду.

Некоторые участки образцов подвергнутых коррозии были получены путем измельчения, полировки и травления в растворе 10% HF + 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 80% HNO<sub>3</sub> (по объему), чтобы выявить гидриды. Для изучения морфологии и распределения гидридов была использована оптическая микроскопия.

Большое содержание Cr в зоне сварного шва в образцах привело к более высокому поглощению водорода. При добавлении небольшого количества Nb в циркониевые сплавы, которые не содержали Cr стало заметно улучшение коррозионной стойкости, однако в вопросе поглощения водорода добавление Nb повлияло лишь незначительно.

#### 1.7. Выводы по разделу

Как видно из литературного обзора исследования методов сварки материалов используемых в области ядерной энергетики достаточно много. Часто применяется электронно-лучевая сварка, волоконно-лазерная сварка, лазерная импульсная, сварку трением с перемешиванием, сварки лазерным лучом CO<sub>2</sub>. После применения процесса сварки ученые исследуют состояние поверхности, механические свойства, морфологию, влияние примесей, коррозионную стойкость и даже проблемы проникновения водорода в сварные швы. Однако, как можно заметить, что статей о влиянии проникновения водорода на сварные швы, полученные лазерной сваркой циркониевого сплава Э110 нет, что еще раз подчеркивает уникальность и актуальность данного исследования.

#### ГЛАВА 2. ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ

В качестве образцов в данном исследовании использовались образцы циркониевого сплава Э110, полученные методом лазерной сварки, толщиной 0,5 мм. Всего 10 образцов, сваренных в различных режимах работы лазерной установки ЛТ 4-2.

Базовые параметры лазера, используемые в эксперименте, приведены в таблице 2.1. Таким образом для режима сварки образцов № 1-4 регулировался ток в лампах накачки *I* (связанный с энергией *E* линейной зависимостью) от 90 до 120 А. В образцах № 5-7 при постоянном токе в 100 А изменялась длительность импульса (10, 12, 16 секунд). А в режиме сварки образцов № 8-10 регулировалась частоту следования импульсов 5, 7, 9 Гц, при постоянном токе в 100 А и длительности импульса в 14 секунд.

Таблица 2.1.	Базовые	параметри	л лазера

q/v, кДж/мм	I, A	t, мс	Е, Дж	V, мм/с.	D, мм	f, Гц	Р <sub>реак</sub> , кВт	P <sub>ave</sub> , Bt	РОрасч	
	90	14	8,68	0,88			0,62	26,03	0,69	
	100		10,88	1,12	0,95	2	0,78	32,64	0,61	
	110		12,86	1,35		0,95 5	3	0,92	38,57	0,53
	120		14,95	1,49			1,07	44,84	0,48	
07		10	8,12	1,12	0,95	3	0,81	24,36	0,61	
0,7	100 <u>12</u> 16	12	9,50				0,79	28,50	0,61	
		12,26				0,77	36,78	0,61		
			10,88	1,12	0,95	5	0,78	54,40	0,76	
	100	14	10,88			7	0,78	76,16	0,83	
			10,88			9	0,78	97,92	0,87	

С помощью автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller проводилось наводороживания образцов методом газофазного гидрирования при температуре 350 °C и давлении 2 атм. до концентрации 700 ppm. Концентрация водорода в материале измерялась при помощи газоанализатора RHEN 602 фирмы LECO.

# 2.1. Изучение процессов сорбции водорода на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller

Gas Reaction Controller (GRC) – является автоматизированным комплексом, который разработан с целью определения количества газа, который сорбируется различными твердыми телами в разных диапазонах давлений и температур. Схема принципа работы GRC представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема принципа работы комплекса GRC

Водород в заданном количестве напускается в резервуар, где определяется его молярный объем ( $N_0$ ) по давлению и температуре. Далее происходит открытие клапана, соединяющего резервуар и реакционную камеру, куда передается водород. Реакция завершается, когда водород внедряется в твердое тело, после чего происходит вычисление общего молярного количества водорода ( $N_g$ ) в резервуаре и камере с образцом.

Молярный объем водорода, который был поглощен твердым телом (*N*<sub>S</sub>) вычисляется по формуле 2.1.

$$N_s = N_0 - N_g \tag{2.1}$$

Перед началом реакции в программу необходимо внести первичное значение содержания водорода ( $N_{S0}$ ) в твердом теле, если, например, в следствии применения электрохимического метода был сформирован гидрид. В таком случает формула один изменяется с учетом наличия первичного содержания водорода в твердом теле и расчет происходит по формуле 2.2.

$$N_s = N_{s0} + N_0 - N_g \tag{2.2}$$

Точность системы ограничена точностью измерений температуры и

давления, вследствие того, что молярный объем газа находится по закону для идеального газа. Главным фактором, а также необходимым условием является точное измерение давления, поскольку температура поддерживается одинаковой [63]. Значение точности измерения количества поглощенного водорода на Gas Reaction Controller при использовании комплекса для экспериментального изучения сорбции водорода в нормальных условиях составляет 0,3 см<sup>3</sup>

Для измерения количества водорода по его давлению, температуре и занимаемому объему в реакционной камере до, в процессе и после реакции с исследуемым образцом используется уравнение 2.3 (для одного моля газа)

$$\frac{pV}{RT} = 1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \frac{D(T)}{V^3}$$
(2.3)

Где B(T), C(T) и D(T) –коэффициенты, которые зависят от температуры. Расчет этих коэффициентов производится по уравнению Beattie and Bridgeman [64] с включением пяти констант. Расчета коэффициентов проводится по уравнениям, представленным ниже в формуле 2.4.

$$B(T) = B_0 - \frac{A_0}{RT} - \frac{c}{T^3},$$

$$C(T) = -B_0 b - \frac{A_0 a}{RT} - \frac{B_0 c}{T^3},$$

$$D(T) = \frac{B_0 b c}{T^3}.$$
(2.4)

Значения констант для водорода:  $A_0 = 0,1975$ , a = -0,00506;  $B_0 = 0,02096$ ; b = -0,04359; c = 504.

Используя уравнения 2.3 и 2.4 получаем формулу 2.5 для вычисления количества молекул газа в случае известного объема и известного давления.

$$n = \left(\frac{pV}{RT}\right) / \left\{1 + B(T)\frac{n}{V} + C(T)\frac{n^2}{V^2} + D(T)\frac{n^3}{V^3}\right\}$$
(2.5)

Значение *n* определяется операционным методом. Количество поглощенного водорода можно определить и в абсолютном значении (см<sup>3</sup>), и

в относительном (массовые проценты). Абсолютное значение количества поглощенного водорода рассчитывается как молярный объем водорода, который поглотило твердое тело (рассчитанный по формуле 2.1 или 2.2) и умноженный на 22413,6. Относительное количество, поглощенного водорода в массовых процентах (*wt*) рассчитывается в соответствии с формулой 2.6.

$$wt = \frac{N_s \cdot M_G}{m \cdot 100} \tag{2.6}$$

где *m* – масса образца и *M*<sub>G</sub> – молярная масса газа (2·1,0079 для водорода). Соотношение (х) атомов газа к атомам образца в случае, когда молярная масса образца известна рассчитывается по формуле 2.7.

$$\chi = \frac{2N_s}{n/M} = \frac{2M}{M_c} \frac{wt}{100} = \frac{M \cdot wt}{100,79}$$
(2.7)

Составными частями Gas Reaction Controller (рис. 2.2) являются: компьютер (1), который оснащен программным обеспечением на основе LabVIEW; криостат или же высокотемпературная печь (2); камеры, переназначенные для образцов: низкого (4) и высокого (5) давлений, а также контролера (6). Составными частями контролера являются электронная система управления комплексом (7), а также вакуумная часть. В свою очередь составными элементами вакуумной части являются: резервуар (8), резервуары для низкого (9) и высокого (10) давления, система клапанов (пневмонических и ручных), натекатели, дроссели, вакуумметры и фильтры. Для обеспечения безопасности системы и пользователей в данном комплексе установлены системы для экстренной откачки водорода (11), которые в случае превышения максимально допустимого давления откачают водород. Важной частью комплекса является вакуумный пост (12), который отвечает за создание и поддержку вакуума в системе. Он состоит из форвакуумного мембранного и турбомолекулярного насосов. Подача водорода в вакуумную систему осуществляется из баллона (13) или генератора (14). Также в данном комплексе присутствует система охлаждения (15), установленная между

печью и контролером и которая предназначена для предотвращения повреждений проводов из-за нагрева.



Рисунок 2.2. – Схема комплекса Gas Reaction Controller: 1 – ПК; 2 – печь/криостат; 3 – образец; 4 – камера низкого давления; 5 – камера высокого давления; 6 – контроллер; 7 – электронная система управления комплексом; 8 – резервуар; 9 – резервуар низкого давления; 10 – резервуар высокого давления; 11 – система экстренного удаления водорода; 12 – вакуумный пост; 13 – баллон с водородом; 14 – генератор водорода; 15 – система охлаждения.

Наличие криостата и высокотемпературной печи в данном комплексе дает возможность вести исследования даже в диапазоне температур от -30 °C до 1000 °C. Для достижения высоких температур в комплексе реализован линейный нагрев образца в камере, причем возможно задать скорость нагрева в условиях постоянной откачки, которая является необходимым условием процесса нагрева, для так как В камеру поступают десорбированные газы. Данные возможности (линейный нагрев и поддержка высокого вакуума) позволяют проводить вакуумный отжиг образцов. Ограничение размеров образцов устанавливается размерами камер: ø6×20 мм для камеры высокого давления и ø30×80 мм для камеры низкого давления. А ограничение максимальных значений давления водорода в камерах для: низкого давления составляет 202,64 кПа, для высокого – 5066 кПа.

При решении множества задач взаимодействия водорода с металлами, которые стоят перед исследователями, в автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller предусмотрено несколько автоматических режимов

работы:

1. SOAK. В этом режиме задаются давление, и температура при которых в камеру с образцов происходит напуск водорода. В заданной атмосфере происходит выдержка образца в течении необходимом для эксперимента времени. Также задается периодичность, с которой на компьютере фиксируются значения температур, давления и количества водорода. Режим SOAK наиболее применим для процесса подготовки образцов с предварительно заданными концентрациями водорода, а также для изучения кинетики сорбции водорода.

2. RELEASE. Наиболее часто непосредственно после использования режима SOAK применяется режим RELEASE в ходе, выполнения которого в камере с образцом (который уже наводорожен) происходит постепенное снижение давления. Компьютер в процессе реализации режима собирает данные для установления зависимости количества десорбированного водорода от времени, что необходимо для изучения кинетики десорбции водорода. Для того, чтобы исследовать максимально большое количество данных о сорбции и десорбции водорода в материалах-накопителях, режимы SOAK и RELEASE применяют многократно и без удаления образца из вакуумной камеры.

3. РСІ. Данный режим позволяет построить зависимость водорода от давления в камере в условиях постоянной температуры. Примечательно что зависимость строится для наибольшего количества, сорбированного или десорбированного водорода. В ходе применения режима РСІ становится возможным получение важной информации характера реакций сорбции и десорбции водорода, такой как скорость сорбции и десорбции водорода, построение их гистерезиса.

4. Monitor. Данный режим применяется при вакуумном отжиге, а также при нагревании образца непосредственно до напуска водорода в камеру. Компьютер же регулярно фиксирует значения температуры и давления.

Для проведения эксперимента с целью изучения процессов сорбции и десорбции водорода необходимо соблюдать определенную последовательность действий: сначала взвешивание образца; значения плотности и массы фиксируются в программном обеспечении комплекса; образец необходимо далее поместить В камеру, которая потом присоединяется к вакуумной системе; в камере достигается заданный вакуум; в камере происходит линейный нагрев (или охлаждение) сопровождаемый непрерывной откачкой. И только после данной последовательности происходит выполнение одного из режимов, которые были описаны выше.

## 2.2. Измерение концентрации водорода при помощи анализатора RHEN602

При изучении влияния водорода на свойства металлов и их сплавов очень важно рассмотреть вопросы, касающиеся реального содержания водорода в процессе выплавки в разных металлургических установках. Иными словами, важно оценить угрозу получения изделиями такой концентрации водорода, при которой в металлах и их сплавах возникают дефекты водородного происхождения

Методы применимые с целью определения водорода в металлах и их сплавах имеют различные способы воздействия на изучаемый образец, а также различные способы анализа выделившегося газа.

экстракции водорода в настоящее время наиболее часто Для применяют методы, связанные с нагревом и плавлением образца в условиях вакуума или инертной среды. Чтобы подвергнуть анализу газы, которые ИЗ металла применяют выделяются чаще всего детекторы ПО теплопроводности. Данные детекторы относятся к косвенным методам и в противовес абсолютным имеют преимущество в виде большей скорости анализа. Недостатком является необходимость предварительной калибровки детектора при помощи чистых газов или эталонных образцов.

Таким образом анализатор водорода RHEN602 (рисунок 2.3) работает на основе методов, представленных выше.



Рисунок 2.3 – Анализатор водорода RHEN602 Измерение водорода происходит путем регистрации в термокондуметрической (ТК) ячейке изменений теплопроводности газаносителя. На рисунке 2.4 изображена блок-схема анализатора RHEN602.



Рисунок 2.4 – Блок-схема анализатора RHEN602

Началом анализа считается помещение пустого тигля из графита на нижний электрод, после чего происходит закрытие электродов и следом тигель очищается от газов атмосферы. На следующем этапе тигель разогревается до высокой температуры под действием тока, чтобы высвободить газы, которые находятся в графите. Данная процедура носит название дегазирование. Затем из загрузочного устройства образец попадает в тигель, после чего на тигель снова подается высокий ток, который способствует высвобождению газов из тигля и образца. Для предотвращения чрезмерное дегазирование тигля в процессе аналаза, на него подается ток с силой меньшей, чем у тока дегазирования.

Чтобы очистить газ-носитель от кислорода, его пропускают через нагретую медь, после чего он подвергается специальной фильтрации с целью очистки от CO<sub>2</sub> и влаги. Для того, чтобы распределить компоненты газа в зависимости от размера молекул используется колонна молекулярных фильтров. После чего для измерения содержания водорода, газ образца пропускается через измерительную часть ТК ячейки. ТК ячейки подает сигнал, который попадает на аналогово-цифровой преобразователь после чего компьютер с помощью программы обрабатывает данные и вычисляет содержание водорода.

# ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Темой магистерской работы является: Определение закономерностей влияния параметров лазерной сварки на взаимодействие водорода с циркониевым сплавом Э110.

#### 4.1. Потенциальные потребители исследования

Сплав циркония Э110 широко применяется в ядерной энергетике в качестве конструкционного материала. Потенциальными потребителями исследования являются компании российского ядерного цикла.

# 4.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В данном исследовании сварные швы в образцах из сплава Э110 насыщались водородом методом газофазного насыщения ( $Б_{\phi}$ ). Также существуют элетролитический метод ( $\overline{B}_{k1}$ ) и метод плазменно имерсионной имплантации ( $\overline{B}_{k2}$ ). Оценочная карта техничских решений приведена в талице 4.1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \mathbf{b}_i \tag{4.1}$$

где К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; В<sub>i</sub> – вес показателя (в долях единицы);

Б<sub>*i*</sub> – балл *i*-го показателя

В данном иследовании:

Б<sub>k1</sub> – бал соответсвтующему элетролитическиму методу насыщения водородом,

Б<sub>к2</sub> – бал соответсвующему плазменно имерсионной имплантации водорода.

К<sub>k1</sub> – конкурентоспособность элетролитическиму методу насыщения водородом;

К<sub>k2</sub> – конкурентоспособность плазменно имерсионной имплантации. Таблица 4.1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

	Bec		Баллы		Кон	курентно	ость
Критерии оценки	критерия	Бф	$\mathbf{F}_{\mathbf{k}1}$	Бк2	К <sub>ф</sub>	$K_{\kappa 1}$	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
<ol> <li>Соответсвие условиям близким к эксплутационым</li> </ol>	0,4	5	1	4	2	0,4	1,6
<ol> <li>Длительность насыщения водородом</li> </ol>	0,3	4	2	4	1,2	0,6	1,2
3. Точность полученных данных	0,2	4	2	3	0,8	0,4	0,6
<ol> <li>Простота эксплуатации оборудования</li> </ol>	0,1	3	2	3	0,3	0,2	0,3
Итого	1	16	7	14	4,3	1,6	3,7

По итогам анализа, представленным в карте сравнения оценок конкурентных разработок технических решений, можно сделать вывод, что

насыщение водородом методом газофазного насыщения имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами насыщения, такими как элетролитическимий метод насыщения и метод плазменно-иммерсионной имплантации, одним из наиболее важных является возможность провести эксперимент в условиях близких к эксплуатационным условиям ядерного реактора.

### 4.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ (Strengths –сильные стороны, weanesses слабые стороны, opportunities – возможности и threats –угрозы) применяется для определения слабых и сильных сторон проекта. Результаты SWOT-анализа представлена на таблице 4.2.

## Таблица 4.2. Результаты SWOT-анализа

	Сильные стороны научно- исследовательского проекта: С1. Актуальность темы исследовательской работы С2. Возможность проводить наводораживание в условиях близким к эксплуатационным С3.Возможность улучшения безопасности конструкционных частей реактора	Слабые стороны научно- исследовательского проекта: Сл1. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования Сл2. Невозможность в данное время тестирования технологии в реальных рабочих условиях Сл3. Длительный срок тестирования опытного образца
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Снижение расхода на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях	Результаты исследования           связи параметров сварки и           проникновения водорода могут           послужить         рекомендацией           предприятиям,         которые           изготавливают         изделия           ядерной энергетики	<ol> <li>Использование инновационной инфраструктуры ТПУ для тестирования технологии в реальных рабочих условиях</li> <li>Приобретение необходимого оборудования для проведения испытаний опытного образца</li> </ol>
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства в ядерной энергетике У2.Дополнительные государственные требования к сертификации нового метода сварки	1         Для         убедительности           полученных         результатов           исследований         необходимо           контролитровать         точность           проводимых расчетов.         2           2         Проводить         исследования           других         характеристик         сварного           шва	1 Для уменьшения погрещности измерения стоит произвести больше исследований с большим количеством образцов сварного шва

Опираясь на SWOT аназиз можно сделать вывод, что на данный

момент преимущества используемых методов преобладают над его недостатками по сравнению с другими методами.

## 4.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Данный проект не подходит для коммерциализации

## 4.5. Инициация проекта

## 4.5.1. Заинтересованные стороны проекта

Таблица 4.3. Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
ПАО «Новосибирский завод химконцентратов»	Рекомендации по уменьшению влияния водорода на

## Таблица 4.4. Цели и результаты проекта

Пели проекта.	Изучение влияния параметров лазерной сварки на сорбцию водорода в		
цели проекта.	сварные швы циркониевого сплава Э110		
Ожидаемые результаты	Результаты по влиянию параметров лазерной сварки на сорбцию водорода		
проекта:	в сварных швах сплава Э110		
Критерии приемки	Значения параметров лазерной сварки являющиеся удовлетворительными		
результата проекта:	с точки зрения проникновения водорода		
	Требование:		
Требования к результату	Точность проведенных расчетов		
проекта:	Достоверность научных результатов		
	Согласованность научных данных с рядом других научных исследований		

## Таблица 4.5. Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Кудияров Виктор Николаевич Кандидат технических наук, старший преподаватель отделения экспериментальной физики НИ ТПУ	Руководитель	Координация деятельности проекта	30
2	Федотов Л.Е., НИ ТПУ, отделение экспериментальной физики, магистрант	Исполнитель	Выполнение НИР	585

## Таблица 4.6. Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта	247 442
Источник финансирования	НИИ ТПУ
Сроки проекта:	01.02.2019-30.05.2019
Дата утверждения плана управления проектом	04.02.2019
Дата завершения проекта	30.05.2019

# 4.6. План проекта

## Таблица 4.7. Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Получения задания	1	01.02.2019	01.02.2019	Кудияров В.Н.
2	Составления плана выполнения работ по проекту	2	02.02.2019	04.02.2019	Кудияров В.Н
3	Обзор литератур по тематике работы	28	05.02.2019	11.03.2019	Федотов Л.Е.
4	Определения содержание водорода в бесшовном материале	14	12.03.2019	27.03.2019	Федотов Л.Е.
5	Осуществление насыщения образцов водородом в условиях близких к эксплуатационным	4 14	28.03.2019	12.04.2019	Кудияров В.Н Федотов Л.Е.
6	Расчет скорости сорбции водорода в швах циркониевого сплава Э110	4 14	13.04.2019	29.04.2019	Кудияров В.Н Федотов Л.Е.
7	Анализ результатов исследвания	4 10	30.04.2019	13.05.2019	Кудияров В.Н Федотов Л.Е.
8	Составление пояснительной запсики	15	14.05.2019	30.05.2019	Федотов Л.Е

## В таблице 4.8 приведен календарный план-график проведения НИОКР

#### по теме магистерской диссертации

Таблица 4.8. Календарный	план-график проведения І	НИОКР
--------------------------	--------------------------	-------

Код	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , Продолжительность выполнения работ												
работы			кал,	фе	вр.		ма	рт		ап	релі	Б	ма	ий	
(из			дн.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ИСР)															
1	Составления задачи	Руководитель	4	$\mathbf{N}$											
	для исследования														
2	Изучение	Магистарант	41												
	литературы														
4	Определения	Магитсрант	15												
	содержание														
	водорода в														
	бесшовном														
	материале														
5	Осуществление	Руководитель,	15								~				
	насыщения	магистрант													
	образцов														
	водородом в														
	условиях близких к														
	эксплуатационным														
6	Расчет скорости	Магистрант	15												
	сорбции водорода в														
	швах циркониевого														
	сплава Э110												$\mathbf{N}$		
7	Общий анализ	Руководитель,	13												
	результатов	магистрант													
	исследований														
8	Состовления	Руководитель,	16												
	пояснительной	магистрант													
	записки														
10	Итого дней		119												

- научный руководитель; 🔳 - магистрант

## 4.7. Бюджет научного исследования

Был составлен полный бюджет научных исследований. Расходы научных исследований состоит из материальных затрат, расходов на специальные оборудования, основной и дополнительной заработной платы, социальные отчисления, и накладные расходы. Была составлена таблица 4.9 с группировкой затрат по статьям.

Статьи									
Сырье,	Специальное	Основная	Дополнительная	Отчисления	Научные и	Оплата работ,	Прочие	Накладн	Итого
материалы (за	оборудование для	заработная	заработная	на	производственн	выполняемых	прямые	ые	плановая
вычетом	научных	плата, руб.	плата, руб.	социальные	ые	сторонними	расходы,	расходы	себестоимость,
возвратных	(экспериментальных)			нужды,	командировки,	организациями и	руб.	, руб.	руб.
отходов),	работ, руб.			руб.	руб.	предприятиями,			
покупные						руб.			
изделия и									
полуфабрикаты									
7 492	27 671	118 150	11 815	35 221	-	-	8 771	47 990	245 295

# Таблица 4.9. Группировка расходов по статьям

4.7.1. Сырье, материалы, покупные изделия (за вычетом отходов)

В статью расходов входит затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. В таблице 4.10 приведены таблица расходов по данной статье.

Таблица 4.10. Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	•		Марка, размер	Кол-	Цена за единицу,	Сумма,
				во	руб.	руб.
Спирт			100 мл, (90%)	3	45	135
Абразивная	бумага	для	Крупнозернистая, среднезерниста	я, 20	250	5 000
шлифовки			мелкозернситая,			
Алмазная	паста	для	A3, A2, AC2	1	2 000	2 000
полировки						
Всего за матер	иалы					7 135
Транспортно-з	заготовител	іьны	е расходы (3-5%)			357
Итого по стати	Бе См					7 492

4.7.2. Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

При выполнении исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ.

Необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования. Затраты на амортизационные отчисления рассчитываются по формуле

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{n} * 100 \%\right)}{N} \cdot T$$
(4.2)

Где С<sub>об</sub> – стоимость оборудования, n – эксплуатационный срок оборудования, N – количество календарных дней в году, T – количество дней использования оборудования.

В исследовании использовались: установка электролитического наводораживания, автоматизированный комплексе Gas Reaction Controller LPB. В таблице 4.11 приведены результаты вычисления амортизационных отчислений для оборудований.

Так же был использован персональный компьютер, стоимость которого 20000 рублей.

Таблица 4.11. Амортизационные отчисления оборудования

№	Наименование	Первоначальная цена С <sub>об</sub> , руб.	Срок эксплуатации оборудования, год	Количество рабочих дней использование оборудования, дни	Амортизационные отчисления, руб.
1	Gas Reaction Controller LPB	2 000 000	20	28	7 671
	Итог		7 671	l рублей	•

Итоговая сумма 27671 рубля.

### 4.7.3. Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{3\Pi} = 3_{0CH} + 3_{до\Pi}$$
 (4.3)  
3<sub>осн</sub> – основная заработная плата;

Здоп – дополнительная заработная плата

Основная заработная плата (З<sub>осн</sub>) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$3_{och} = 3_{дh} \cdot T_{pab}$$
 (4.4)  
где  $3_{och}$  – основная заработная плата одного работника;

T<sub>p</sub> – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

З<sub>дн</sub> – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$3_{\rm dH} = \frac{3_{\rm M} \cdot \rm M}{F_{\rm d}} \tag{4.5}$$

где  $3_{\rm M}$  – месячный должностной оклад работника, руб.; М – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня М =11,2 месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней М=10,4 месяца, 6-дневная неделя;  $F_{\rm d}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научнотехнического персонала, раб. дн. (табл.4.12). Баланс составлялся для 6 дневной рабочей недели.

Таблица 4.12. Баланс рабочего времени

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

Месячный должностной оклад работника:

$$3_{\rm M} = 3_6 \cdot \left(1 + \kappa_{\rm np} + \kappa_{\rm g}\right) \cdot \kappa_{\rm p} \tag{4.6}$$

Где: З<sub>6</sub> – базовый оклад, руб.;

*k*<sub>пр</sub> – премиальный коэффициент, равный 0,3;

*k*<sub>д</sub> – коэффициент доплат и надбавок составляет 0,3;

 $k_{\rm p}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью старшего преподавателя и ученной степенью кандидата технических наук заработная плата по окладу которого составляет 26300 рублей.

З<sub>м</sub> = 33 664 · (1 + 0,3 + 0,3) · 1,3 = 70 021 рублей

Оклад инженера составляет 12 664 руб./месяц. Месячный должностной оклад инженера равен

 $3_{_{\rm M}} = 12\ 664 \cdot (1+0,3+0,3) \cdot 1,3 = 26\ 341$ рублей

Среднедневная заработная плата руководителя равна:

3<sub>дн</sub> = 
$$\frac{70\ 021\cdot 10,4}{251}$$
 = 2 901 рублей

Среднедневная зарплата инженера составляет:

З<sub>дн</sub> = 
$$\frac{26\ 341\cdot 10,4}{251}$$
 = 1 091 рублей

Основная заработная плата руководителя равна:

 $\mathbf{3}_{\mathrm{och}} = 2\ 901 \cdot \mathbf{5} = 14\ 505$ рублей

Основная заработная плата инженера равна:

В табл. 4.13 приведена форма расчёта основной заработной платы.

Таблица 4.13. Таблица расчета основной заработной платы

Исполнители	3 <sub>б</sub> , руб.	$k_{ m np}$	$k_{ extsf{d}}$	$k_{ m p}$	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб.	Т <sub>р,</sub> раб. дн.	З <sub>осн,</sub> руб.
Руководитель	33 664	0,3	0,3	1,3	70 021	2 901	5	14 505
Инженер	12 664	0,3	0,3	1,3	26 339	1 091	95	103 645

4.7.4. Дополнительная заработная плата научнопроизводственного персонала

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$\mathbf{3}_{\mathsf{доп}} = \mathbf{\kappa}_{\mathsf{доп}} \cdot \mathbf{3}_{\mathsf{осн}} \tag{4.6}$$

Где:

Здоп – дополнительная заработная плата, руб.;

*k*<sub>доп</sub> – коэффициент дополнительной зарплаты, который 10 %;

З<sub>осн</sub> – основная заработная плата, руб.

Дополнительная заработная плата руководителя равна:

Дополнительная заработная плата инженера равна:

$$\mathbf{3}_{\mathrm{доп}} = 10\ 3645\cdot 0$$
,1 = 10 365 рублей

В табл. 4.14 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.14. Таблица основной и дополнительной заработной платы.

Заработная плата	Руководитель	Инженер	
Основная зарплата	14 505	103 645	
Дополнительная зарплата	1 450	10 365	
Зарплата исполнителя	15 955 114 010		
Итого по статье С <sub>зп</sub>	129	965	

## 4.7.5. Отчисления на социальные нужды

Данная статья расходов рассчитывается по формуле:

$$C_{\rm BHe6} = \kappa_{\rm BHe6} \cdot \left(3_{\rm och} + 3_{\rm don}\right) \tag{4.7}$$

где k<sub>внеб</sub> – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), который равняется k<sub>внеб</sub> = 0,271.

Таблица 4.15. Таблица отчислений на социальные нужды

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Зарплата	15 955	114 010
Отчисление на социальные нужды	4 324	30 897

## 4.7.6. Накладные расходы

Накладные расходы составляют 30-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{внеб}} = \kappa_{\text{нак}} \cdot (3_{\text{осн}} + 3_{\text{доп}})$$
 (4.8)  
где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов, который равен 30 % (0.3).

Таблица 4.16. Таблица накладных расходов

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Зарплата	15 955	114 010
Накладные расходы	4 787	43 203

## 4.7.7. Расчет затрат на электричество

При расчете затрат на электроэнергии были приняты следующие допущения: с учетом календарного план-графика проекта, было принято, что на работу было затрачено 91 дней. Средняя мощность компьютера составляет около 300 Вт/час. Длительность работы с компьютером средней мощности – 5 часов/день. Для выполнения дипломной работы время использования компьютера составляет 455 часов.

300 Вт/час \* 455 час = 136,5 (кВт)

Мощность установки составляет 9,2 (кВт/час). Для проведения эксперимента время использования установки составило 144 часа. Стоимость электроэнергии в Томске равна 5,8 руб. за 1 кВт/час. Следовательно, потребление электроэнергии компьютером в течение работы составляет

Таким образом, затрат на электроэнергии был:

(1324,8+187,5) \* 5,8 = 8 771 (руб.)

#### 4.8. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. В таблице 4.17 сведены возможные риски проекта

Nº	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятн ость наступле ния (1-5)	Влияние риска (1- 5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Невыполнение исследований в срок	Наказание за невыполнения контрактных обязательств	2	1	Низкий	Привлечение дополнительн ых рабочих сил	Систематические остановки экспериментальны х исследований
2	Отсутствие необходимого оборудования и образцов	Невозможность проведения необходимых исследований для проекта	3	4	Высокий	Более тщательное планирование проекта	Недостаток финансирования
3	Недостоверность	Низкая	2	4	Средний	Тщательное	Неправильное

Таблица 4.17. Реестр рисков проектов

## 4.9. Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I^p_{\Phi} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} \tag{4.9}$$

где  $I_{\phi}^{p}$  - интегральный финансовый показатель разработки;

Ф<sub>рі</sub> – стоимость і-го варианта исполнения;

Ф<sub>тах</sub> – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Так как разработка имеет одно исполнение то:

$$I_{\Phi}^{p} = \frac{245295}{258205} = 0,95$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{258205}{258205} = 1$$
$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{250459}{258205} = 0,97$$

 $I^{a1}_{\Phi}$ -соответствует газофазному насыщению водород;

 $I_{\Phi}^{a2}$  – соответствует плазменно – имерсионной имплантации водорода.

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{m}^{a} = \sum_{i=1}^{n} a_{i} \cdot b_{i}^{m}$$
(4.10)

$$I_{m}^{p} = \sum_{i=1}^{n} a_{i} \cdot b_{i}^{p} \tag{4.11}$$

где  $I_m^a$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога;

 $I_m^{\rm p}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности разработки;

*а*<sub>*i*</sub> – весовой коэффициент *i*-го параметра;

 $b_i^a$  — бальная оценка *i*-го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

*n* – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 4.18. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО	Весовой	Текущий	Аналог 1	Аналог 2
Критерии	коэффициен	проект		
Критерии	т параметра			
1. Способствует росту производительности	0,25	4	3	3
труда пользователя				
2. Удобство в эксплуатации	0,3	4	3	5
3. Энергосбережение	0,15	3	4	2
4. Надежность	0,2	5	4	3
5. Материалоемкость	0,1	5	4	4
ИТОГО	1	21	18	17
$I_m^p = 0.25 \cdot 4 + 0.3 \cdot 4$	$+ 0.15 \cdot 3$	$+0.2 \cdot 5 + 0$	$0.1 \cdot 5 = 4.3$	15
- 11 - 12 - 1 - 12 - 1				
$I_{4}^{a} = 0.25 \cdot 3 + 0.3 \cdot 3$	$+0.15 \cdot 4$	$+0.2 \cdot 4 + 0$	$1.1 \cdot 4 = 3.4$	45
	1 0120 1	1 012 1 1 0		
$I_2^a = 0.25 \cdot 3 + 0.3 \cdot 5$	$+ 0.15 \cdot 2$	$+ 0.2 \cdot 3 + 0$	$0.1 \cdot 4 = 3.5$	55
	71			
	/ 1			

Интегральный показатель эффективности разработки I<sup>p</sup><sub>финр</sub> и аналога I<sup>a</sup><sub>финр</sub> определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I^{p}_{\Phi \mu \mu p} = \frac{I^{p}_{m}}{I^{p}_{\Phi}}; \ I^{a}_{\Phi \mu \mu p} = \frac{I^{a}_{m}}{I^{a}_{\Phi}}$$
(4.12)

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\Theta_{\rm cp} = \frac{I_{\phi \rm uhp}^p}{I_{\phi \rm uhp}^a} \tag{4.13}$$

где Э<sub>ср</sub> – сравнительная эффективность проекта;  $I^{p}_{m_{2}}$  – интегральный показатель разработки;  $I^{a}_{m_{2}}$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

$$I_{\Phi \mu \mu p}^{p} = \frac{4,15}{0.95} = 4.36$$
$$I_{\Phi \mu \mu p}^{a1} = \frac{3,45}{1} = 3.45$$
$$I_{\Phi \mu \mu p}^{a2} = \frac{3.55}{0.97} = 3.66$$
$$\Im_{cp1} = \frac{4,36}{3,45} = 1.26$$
$$\Im_{cp1} = \frac{4.36}{3.81} = 1,19$$

Таблица 4.19. Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый	1	0.97	0,95
	показатель разработки			
2	Интегральный показатель	3.45	3.55	4.15
	ресурсоэффективности			
	разработки			
3	Интегральный показатель	3.45	3.66	4.36
	эффективности			
4	Сравнительная эффективность	1.26	1.19	1
	вариантов исполнения			

#### Выводы по главе 4

В данной главе был проведен расчет затрат на выполнение научноисследовательской работы. В процессе формирования бюджета были использованы группировки по материальным затратам (7 492 руб.), по амортизационному отчислению оборудования (27 671 руб.), затратам по основной заработной плате исполнителей (118 150 руб.), затратам ПО дополнительной заработной плате (11 815 руб.), отчислениям на социальные (47 990руб), расходы нужды (35 221 руб.), накладные расходы на электроэнергию 8 771 рублей. Таким образом, всего бюджет составил 245 295 Основываясь определении ресурсосберегающей, руб. на финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами. Полученные в ходе результаты, могут быть использованы исследования для дальнейших исследований систем металл-водород, а также имеет практическую ценность и в полной мере способствует решению многих фундаментальных задач.

#### 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 ситуации.

Для выполнения магистерской диссертации по теме определение закономерностей влияния параметров лазерной сварки на взаимодействие водорода с циркониевым сплавом Э110 были проведены исследовательские работы на установке электролитического наводораживания, установке Gas Reaction Controller, при которых проводились работы с оборудованием, работающих при высоких напряжениях и давлениях. В соответствие с этим данная глава предполагает рассмотрение правил безопасной работы при выполнении основных этапов по внедрению и анализу водорода в циркониевом сплаве.

## 5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Исследовательские работы проводилсиь на установке Gas Reaction Controller. Основная работа заключалась в наблюдение в режиме реального времени за процессом десорбции водорода из образцов сплава Э110, которая отображалась на дисплее ЭВМ. Исходя из этого необходимо рассматривать эргономические требования для рабочего место опреатора, рабочее место которого связано с наблюдением дисплея ЭВМ. Для обосноваия эргономических требований используются слдеующий нормативно правовые документы:

ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)

ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения)

ГОСТ Р ИСО 6385-2016 Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем

ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения

Согласно ПНД Ф 12.13.1-03 к работе к аналитическим лабараториям допускается лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование для решения вопроса о возможности работы в лаборатории. Каждый соотрудник лабаратории должен саблюдать правила безопасности лабаратории.

Рабочие места должны быть спроектированы таким образом, чтобы способствовать достижению целей производственной системы, в том числе достижению оптимальной общей рабочей нагрузки на сотрудников (ГОСТ Р ИСО 6385-2016). Рабочая среда должна быть разработана и поддерживаться таким образом, чтобы минимизировать неблагоприятные физические, химические, биологические и социальные условия, влияющие на здоровье и безопасность людей, а также на их способность и готовность выполнять стоящие перед ними задачи

Согласно ГОСТ Р 50923-96 рабочее место с дисплеем должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы.

Основными элементами рабочего места оператора являются: рабочий стол, рабочий стул (кресло), дисплей, клавиатура; вспомогательными – пюпитр, подставка для ног. Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также

расстоянию спинки от переднего края сиденья. Требования каждому из этих элментов рабочего место расмотрено в ГОСТ Р 50923-96 подробно. Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову.

Дисплей на рабочем месте должен быть установлен ниже уровня глаз оператора. Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать 60°, как показано на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Расположение дисплея на столе

## 5.2. Вредные факторы проектируемой производственной среды

Для идентификации потенциальных факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в виде таблицы 5.1.

Таблица 5.1. Возможные опасные	и вредные	факторы
--------------------------------	-----------	---------

	Этапы работ					
Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	Нормативные документы		
<ol> <li>Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими</li> </ol>	+	+	+	ГОСТ 12.1.005-88. СН-245-71		
76						

параметрами воздушной среды на местонахождении работающего 2. Вредные произволственные факторы				
связанные с электромагнитными полями переменного характера	+	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
<ol> <li>Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде</li> </ol>	-	-	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ГОСТ 12.4.0262015
4. Вредные производственные факторы, связанные со световой средой	+	+	+	ГОСТ 12.4.026-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний.
<ol> <li>Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека</li> </ol>	-	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ГОСТ 12.1.030-81
6. Пожаровзрывоопасность.	-	-	+	НПБ 105-03

В процессе научно исследовательских работ возможна воздейтсиве следующих вредных производственных факторов:

 вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего

вредные производственные факторы, связанные с
 электромагнитными полями перменного характера

вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде

 вредные производственные факторы, связанные со световой средой

5.2.1. Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего

Основными факторами, характеризующими микроклимат производственной среды, являются: температура, подвижность и влажность воздуха. Отклонения данных параметров от нормы оказывает вредное влияние на человека, при этом обычно возникают ухудшение самочувствия работника, снижение эффективности работы и различные заболевания. Неблагоприятные условия могут вызывать перенапряжение механизма терморегуляции, что ведет к перегреву или переохлаждению организма.

Высокая температура приводит к быстрой утомляемости работника, может привести к перегреву организма, тепловому удару. А низкая температура может вызвать местное или общее охлаждение организма, и привести к простудному заболеванию либо обморожению. Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

При нормировании метеорологических условий в производственных помещениях учитывают время года, физическую тяжесть выполняемых работ, а также количество избыточного тепла в помещении. Оптимальные и
допустимые метеорологические условия температуры и влажности вохдуха устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.005-88.

Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяются следующие мероприятия: устройство систем вентиляции, кондиционирование воздуха и отопление. вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки.

Согласно CH-245-71 объем производственных помещений должен быть таким, чтобы на одного работающего приходилось не менее 15 м<sup>3</sup> свободного пространства и не менее 6 м<sup>2</sup> площади.

# 5.2.2. Вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями перменного характера

В процессе научно-исследовательских работ, наиболее интенсивным и поля был длительным источником электромагнитного персональный компьютер. Воздейтсивие электромагнитных полей на организм человека в течении длительного времени оказывает негативное влияния на сердочнососудистую и нервную систему. Имеет место негативное влиния на зрения, способности когнитивные человека. Безопасные излучений уровни регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров	ВДУ ЭМП	
Напряженность электрического	в диапазоне частот 5 Гц – 2кГц	25 В/м
поля	в диапазоне частот 2кГц – 400кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2кГц – 400кГц	25 нТл
Напряженность электростатического	15 кВ/м	
Электростатический потенциал экран	500 B	

Для того, чтобы снизить вредное влияние электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования:

1. Необходимо обязательно делать перерывы после 2 часов непрерывной работы на компьютере. Во время перерыва необходимо делать простейшие физические упражнения для тела и органов зрения.

2. Необходимо чередовать тип работы на ПК.

3. Естественное освещение должно падать слева. Расстояние между двумя мониторами не менее 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60 – 70 см, но не ближе 50 см.

# 5.2.3. Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде

Воздействие шума в первую очередь влияет на органы слуха, нервную и сердечно сосудистую систему. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, энергии при увеличивается расход одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается производительность труда и качество выполняемой работы

В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет 75 дБ. Зоны с уровнем звука или эквивалентным уровнем звука выше 80 дБ обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026-2015

Методы и средства коллективной защиты включают в себя:

изменение направленности излучения шума;

рациональную планировку предприятий и производственных помещений;

- акустическую обработку помещений;

– применение звукоизоляции.

В качестве материала можно использовать минеральную вату, гипсокартон, стекловату, базальтовую вату, древесное волокно, вспененный полиэтилен и др.

Применение средств индивидуальной защиты от шума наиболее эффективно в области высоких частот. Средства индивидуальной защиты включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

## 5.2.4. Вредные производственные факторы, связанные со световой средой

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность. Основной задачей данной части является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещенности. Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) освещения и комбинированного (общего и местного) освещения.

Длина помещения A=6000 мм, ширина B=4200 мм.

Выбираем лампу дневного света ЛХБ, световой поток которой равен ФЛД = 3100 Лм при мощности 40 Вт.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОД-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1230 мм, ширина – 266 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda$ =1,1.

Высота помещения: Н = 3600 мм.

Расстояние светильников от перекрытия:  $h_c = 400$  мм.

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - hc = 3600 - 400 = 3200$$
 мм

Высота рабочей поверхности над полом:  $h_{pn} = 1000$  мм.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{
m p \pi} = 3200 - 1000 = 2200$$
 мм

Для двухламповых светильников ОД при одиночной установке или принепрерывных рядах из одиночных светильников в соответствии с требованиями наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3,5 м. Рассчитанная величина h = 2200 мм не соответствует требованиям.



Рисунок 5.2 – Схема размещения светильников в помещении Оптимальное расстояние между светильниками L должно составлять:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 * 2,2 = 2,24$$

Расстояние от крайних светильников до стены является оптимальным, так как рекомендуемая величина равна

$$\frac{L}{3} = \frac{2,42}{3} = 0,8$$
 м

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta}$$

Где нормируемая минимальная освещенность (по СНиП 23-05-95): Ен =300 Лк (разряд зрительной работы V: малой точности);

Площадь освещаемого освещения:  $S = 25,2 \text{ м}^2$ ;

Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере дыма, пыли: К<sub>3</sub>=1,8 (помещение с малым выделением пыли);

$$N = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}} \cdot \eta}$$

Расчет искусственного освещения показал, что нужно 12 ламп для освещения, т.е. 6 светильников ОД-2-40.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_n = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 1.8 \cdot 2.5 \cdot 1.1}{0.42 \cdot 12} = 3005.4 \text{ мл}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{_{\varPi} \Pi} - \Phi_n}{\Phi_{_{\varPi} \Pi}} \leq 20\%$$
$$\frac{\Phi_{_{\varPi} \Pi} - \Phi_n}{\Phi_{_{\varPi} \Pi}} \cdot 100\% = \frac{3100 - 3005.4}{3100} = 3.05\%$$

Таким образом: −10 % ≤ 3,05 %≤20 %, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Для планирования расположения светильников нужно рассчитать расстояние между светильниками и расстояние от светильника до края помещения. Расстояние между светильниками по длине помещения La определяется по формуле:

$$2L_a + 3 \cdot 2.66 + \frac{2L_a}{3} = 6000 \text{ MM}$$

Получено L<sub>a</sub>=1950,75мм, и L<sub>a</sub>/3=650,25мм. Видно, что значение L<sub>a</sub> меньше оптимального расстояния между светильниками L. Аналогично расстояние между светильниками по ширине помещения L<sub>b</sub>=1044мм, и

L<sub>b</sub>/3=348мм. Результат планирования расположение светильниокв показан на рисунке 5.2.

# 5.2. Выявление опасных факторов проектируемой производственной среды

Существует два опасных фактора, который имеют места при проведение исследовательских работ. Это:

 опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов;

– пожаровзрывоопасность.

# 5.2.1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Воздействие электрического напряжения на человека связано с протеканием через него тока. Действие электрического тока на человека носит сложный и разнообразный характер. При замыкании электрической цепи через организм человека ток оказывает термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие.

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

 случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям;

 появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала;

 шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода на землю;

 появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки;

– освобождение другого человека, находящегося под напряжением;

– воздействие атмосферного электричества, грозовых разрядов.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 предельно допустимые уровни напряжения прикосновения и токов, воздействию которых человек может подвергаться в процессе работы с электрооборудованием, составляют для установок в нормативном режиме: для постоянного тока – не более 0,8 В и 1мА соответственно, для переменного тока (частота 50 Гц) - не более 2,0 В и 0,3 мА соответственно. Установки работающие напряжения выше 42 В должны иметь заземления. Необходимо иметь возможность быстро отключить оборудования в лсучая попадания человека под напряжения (ГОСТ 12.1.030-81).

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещение без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещение с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасное помещение). Лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности поражения электрическим током, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность. Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

 содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;

– своевременно проводить техническое обслуживание;

соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;

– проводить инструктаж для работников

В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Индивидуальные защитные средства от напряжения 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, К слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками. дополнительным изолирующим защитным средствам относятся средства, которые дополняют основные средства защиты, а также могут служить для защиты прикосновения напряжения И шагового напряжения. OT Дополнительными защитными средствами в установках до 1000 В служат диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки.

#### 5.2.2. Пожаровзрывоопасность

Согласно НПБ 105-03 по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

– использование только исправного оборудования;

 проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;

 отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;

 содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые

огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.



План эвакуации из лаборатории

Рисунок 5.3 – Пути эвакуации

Здание должно соответствовать требования пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу (рисунок 5.3).

#### 5.3. Организационные мероприятия обеспечения безопасности

Подготовка спецодежды, рабочего стола, инструментов, приспособлений является первым необходимыми вещами, которые нужно сделать для обеспечения безопасности.

Проверка оборудования на исправность, отсутствия внешних повреждений является необходимыми мероприятиями. Требуется проверить

исправность контрольных измерительных, сигнальных приборов, компьютеров, тумблеров, переключателей. Приступать к работе в случае неисправности любого используемого оборудования, истечении срока годности баллона и срока проверки его манометра категорический запрещается. Запрещается также приступать к работе, если человек не прошел проверку на знания правила безопасности труда.

Помещение перед работой должно быть чистым, свободном от пыли, паров, кислот и щелочей, агрессивных газов и других вредных примесей, вызывающий коррозию. Недопустимо наличие открытого огня около прибора.

После окончания работы с установкой необходимо:

- убедиться, что все клапаны контроллера закрыты;
- выйти из программы, отключить питание компьютера;
- отключить установку и насос от электросети

#### 5.4. Экологическая безопасность

Экологичекая безопасность в данном случае представляет собой способность отходов исследования не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений. В данном исследовании отходами является металлическая стружка полученная в процессе шлифовки образцов циркониевого сплава Э110, использованные наждачные бумаги.

Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо позаботиться о раздельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика, резины и т. д. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

#### 5.5. 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. Есть два вида чрезвычайных ситуации:

– техногенная;

– природная.

К техногенным ЧС относиться можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ, пожары, взрывы. К природным ЧС можно отнести природные катаклизмы. К наиболее вероятным техногенной ЧС является пожары. Для предотвращения пожаров, взрывов необходимо соблюдать правила техники безопасности и организовывать мероприятия, упомянутые в разделе 5.2.2.

При возникновении пожаров необходимо:

– сообщит о возникновения возгорания пожарным службам;

 отключить по мере возможности все электроческие оборудования от розетки;

закрыть по мере возможности все окна в помешении;

– покинуть помешения по схеме эвакуации.

Наиболее вероятным природным катаклизмом являются сильные морозы. Для защиты от сильных морозов производственные здания должны быть оборудованы запасными электрогенераторами и теплогенераторами. Помещения при сильном морозе должны быть обеспечены приборами обогревания. Для транспортировки персонала к рабочему месту и обратно домой, предприятия должны иметь рабочий транспорт. Производственные помещения должны быть обеспечены суточной нормой питьевой воды.

#### Вывод по главе 5

Были рассмотрены условия работы с установкой в лаборатории, а также выделены опасные и вредные производственные факторы. Обозначены методы и средства защиты, уделено внимание техническим и организационным мероприятиям, которые необходимо проводить перед началом работы с установкой.

Описаны средства по контролированию и сведению к минимуму вредных произдодственных факторов (производственный шум, влияние электромагнитных волн, отклонение от нормы микроклимата, недостаточная овещенность) путем использования звукоизолирующих материалов, планирования помещений, применения кондиционеров и вытяжек, расчета освещения, а также выполнения инструкций по работе за ЭВМ.

Чтобы предупредить опасные производстенные и техногенные чрезвычайные ситуации требуется соблюдение правил электрической и пожарной безопасности. Было выявлено, что наиболее вероятным природным катаклизмом являются сильные морозы.

В процессе выполнения исследовательской работы практически не оказывается влияния на окружающую среду, так как отходами является металлическая стружка получаемая в процессе шлифования образца.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию закономерностей влияния проникновения водорода в сварные швы сплава циркония Э110, полученные при различных режимах сварки на лазерном сварочном аппарате ЛТА 4-2. Проведен литературный обзор данных о свойствах объекта исследования – сплава циркония Э110, а также сварке циркония в целом и описаны основные методы исследования. По результатам проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Время насыщения водородом насыщения образцов при 350 °C, 2 атм., до концентрации 0,07 масс.% меняется от 3 часов 35 секунд до 10 часов 50 секунд

2. Установлено, что изменение энергетических параметров режима лазерной сварки (скорость сварки, энергия импульса, длительность импульса и частота) приводят к снижению начальной концентрации водорода и скорости сорбции в циркониевом сплаве Э110 со сварным швом примерно на 19% и 57%, соответственно;

3. Установлено, что динамика насыщения основного металла характеризуется значительной неравномерностью во времени, в то время как насыщение всех сварных швов происходит монотонно при увеличении энергии и длительности импульса в диапазоне (8,68 ÷ 14,95 Дж) и (10 ÷ 16 мс), соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмаков А.А. Водородное охрупчивание и гидридное разрушение циркониевых изделий водоохлаждаемых ЯЭУ/Докторская диссертация. – 2006.

2. Ensor B. et al. The role of hydrogen in zirconium alloy corrosion //Journal of Nuclear Materials. – 2017. – Vol. 496. – PP. 301-312.

3. Yau T.-L. Corrosion of Zirconium and its Alloys // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2010, PP.2094–2134

4. Tupin M. et al. Hydrogen diffusion process in the oxides formed on zirconium alloys during corrosion in pressurized water reactor conditions //Corrosion Science. – 2017. – Vol. 116. – PP. 1-13.

5. Yeom H. et al. Evaluation of steam corrosion and water quenching behavior of zirconium-silicide coated LWR fuel claddings //Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 499. – PP. 256-267.

Suman S. et al. Effects of hydrogen on thermal creep behaviour of Zircaloy fuel cladding //Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 498. – PP. 20-32.

7. Ёлкин М.А. Технология сварки плавлением элементов TBC. – 2017.

8. Займовский А.С., Калашников В.В., Головин И.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. – Атомиздат, 1966.

9. Займовский А. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – 1981.

10. Блащук В.Е. Цирконий: сплавы, сварка, применение (Обзор) //Автоматическая сварка. – 2005.

11. Петельгузов И.А., Савченко В.И., Мухин М.В. Влияние отжигов на механические свойства твэльных труб из сплава Zr1Nb на основе кальциетермического циркония //Вопросы атомной науки и техники. – 2006.

12. Черняева Т. П., Стукалов А. И., Грицина В. М. Кислород в цирконии //Обзор. Харьков: ННЦ ХФТИ. – 1999.

13. Бескоровайный Н.М. Калин Б.А, Платонов П.А, Чернов И.И. Конструкционные материалы ядерных реакторов. – 1995.

14. Douglass D.L. The metallurgy of zirconium, Internet //Atomic Energy Agency, Vienna. – 1971.

15. Cox B., Journal of Nuclear Materials, 2005, v.336.

16. Yilmazbayhan A., et al., Journal of Nuclear Materials, 2004, v.324.

17. Yilmazbayhan A., Breval E., Motta A.T., Comstock R.J., Journal of Nuclear Materials,2006, v.349.

18. Zhilyaev A.P., Szpunar J., Journal of Nuclear Materials, 1999, v.264.

19. IAEA-TECDOC-996, Viena, 1998.

20. Гольцов В.А. Водород в металлах. – ВАНТ. Сер. Атомноводородная энергетика. – 1977. – вып. 1. – с. 65 – 101

21. Гельд П.В., Рябов Р.А., Кодес Е.С. Водород и несовершенства структуры металла //Металлургия. – 1979. – С. 221.

22. Максимов Е.Г., Панкратов О.А. Водород в металлах//Успехи физических наук. – 1975. – Т.116. – С. 385 – 412

23. Пайсл Г. Деформации решетки металла, связанные с водородом/Пайсл Г//Водород в металлах/Г. Алефельд, И. Фелькль, персангл. М.: Мир. – 1981. – Т. 1. – С. 69-93.

24. Erickson W. Hydride solubility in zirconium alloys // Electro-chemical Technology. – 1966. – V. 31. – N9. – P/ 1381-1391.

25. Simpson L.A., Cann C.D. Fracture toughness of zirconium hydride and its influence on the crack resistance of zirconium alloys //Journal of nuclear materials.  $-1979. - T. 87. - N_{\odot}. 2-3. - C. 303-316.$ 

26. Beevers C.J. Fracture of zirconium containing zirconium hydride precipitates //Electrochemical Technology (US) Absorbed by J. Electrochem. Soc. – 1966. – T. 4.

27. Lin S.C., Hamasaki M., Chuang Y.D. The effect of dispersion and spheroidization treatment of  $\delta$  zirconium hydrides on the mechanical properties of Zircaloy //Nuclear Science and Engineering. – 1979. – T. 71. – No. 3. – C. 251-266.

Штремель М.А., Никулин С.А., Канев В.П., Кузнецова А.Г.
 Хладнолоскостть сталей легированных марганцем, с дуплексной структурой //
 Изв. АН СССР. Металлы. – 1986. – №4. – С. 144-151.

29. Coleman C.E. et al. Minimizing hydride cracking in zirconium alloys //Canadian Metallurgical Quarterly. – 1985. – T. 24. – №. 3. – C. 245-250

30. Amouzovi K., Clegg L. Effect of heat treatment on delayed hydride "cracking" in Zr-2.5%Nb alloys // Met. Trans. – 1987. – V. 18A. – P. 1687-1694.

31. Малащенко А.А., Мезенов А.В. Лазерная сварка металлов – М.: Машиностроение, 1984. – 46 с.

Катаяма С. Справочник по лазерной сварке //Москва: Техносфера. –
 2015.

 Havrilla D., Anthony P. Process fundamentals of industrial laser welding and cutting //Mechanical Engineer, Product Support Group. – 1999. – C. 78.

34. Миллер Г.Л. Цирконий / Пер. с англ. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. – 392 с.

35. Меерсона Г. А. Металлургия циркония //М.: Изд-во ИЛ. – 1959.

36. Ferrill D.A. fatigue crack propagation in Zircaloy-2 weld metal //Weld.
J.(NY). - 1971. - T. 50. - №. 5. - C. 206s.

37. Патон Б.Г., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др. Микроплазменная сварка. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.

38. Ривкин Е. Ю., Родченков Б. С., Филатов В. М. Прочность сплавов циркония. – Атомиздат, 1974.

39. Рябов В. Р. и др. Сварка разнородных металлов и сплавов. – 1984.

40. Абрамович М.Д., Вотинов С.Н., Иолтуховский А.Г. Радиационное материаловедение на АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.

41. Гончаров А.Б., Нероденко М.М., Ткаченко Л.М. и др. Влияние режимов термообработки на структуру и коррозионное разрушение сварных соединений сплава циркония с 2,5% ниобия в агрессивных средах // Сварочное производство. – 1990. – №5. – С.16-17.

42. Koh J. H., Lee J. W., Jung S. H. The effect of weld line on the mechanical strengths and its elimination process in the Zr-4 resistance upset welds //Nuclear Engineering and Technology.  $-1991. - T. 23. - N_{\odot}. 1. - C. 1-11.$ 

43. Komuro K. Welding of zirconium alloys // Welding International. – 1994. – Vol.8. – Iss.2. – P.141-148.

44. Coleman C. E. et al. Mitigation of harmful effects of welds in zirconium alloy components //Zirconium in the Nuclear Industry: Tenth International Symposium. – ASTM International, 1994.

45. Блащук В.Е., Поляков С.Г. Коррозионное растрескивание сварных соединений циркониевого сплава Э125 // Автоматическая сварка. – 1997. – №4.– С.30-33.

46. Yang R. et al. Fuel R & D to improve fuel reliability //Journal of Nuclear Science and Technology.  $-2006. - T. 43. - N_{\odot}. 9. - C. 951-959.$ 

47. Mishra P. et al. In-reactor degradation of fuel and cladding in fuel pins operated with weld defects //Journal of Nuclear Materials.  $-2013. - T. 439. - N_{\odot}. 1-3. - C. 217-223.$ 

48. Кочергин В. и др. Лазерные и оптические технологии в производстве компонентов энергетических ядерных реакторов //Фотоника. – 2012. – Т. 34. – №. 4. – С. 22-29.

49. Hajitabar A., Naffakh-Moosavy H. Effect of electron beam welding current variations on the microstructure and mechanical properties of Nb-1Zr advanced alloy //Vacuum. – 2018. – T. 150. – C. 196-202.

50. Yang J.N. et al. Fiber laser welding characteristics of commercially pure zirconium (R60702) and structure-mechanics-corrosion performances of the joint //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2018. – T. 73. – C. 58-73.

51. Ahn J. et al. Parametric optimisation and microstructural analysis on high power Yb-fibre laser welding of Ti-6Al-4V //Optics and Lasers in Engineering. -2016. - T. 86. - C. 156-171.

52. Han Q. et al. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4 //Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – T. 212. – №. 5. – C. 1116-1122.

53. Yutaka S. Sato, Yoshito Nagahama, Sergey Mironov, Hiroyuki Kokawa, Seung Hwan C. Park and Satoshi Hirano. Microstructural studies of friction stir welded Zircaloy-4 // Scripta Materialia. – 2012. – Vol.67. – Iss.3. – P. 241-244.

54. Mishra R. S. et al. (ed.). Friction stir welding and processing VI. – John Wiley & Sons, 2011.

55. Zhang B. et al. Microstructure and corrosion behavior of Zr-702 joined by electron beam welding //Vacuum. – 2015. – T. 121. – C. 159-165.

56. Boutarek N. et al. Microstructure change in the interface of co2 laser welded zirconium alloys //Physics Procedia.  $-2009. - T. 2. - N_{\odot}. 3. - C. 1159-1165.$ 

57. Castro R., Seraphin L. Contribution To Metallographic And Structural Study Of Titanium Alloy Ta6v //Memoires Scientifiques De La Revue De Metallurgie. – 1966. – T. 63. – №. 12. – C. 1025.

58. Seraphin L., Memories and Scientific Studies, Magazine of Metallurgy LXII, No 4 (1965) 291.

59. Robert Y. Simulation numérique du soudage du TA6V par laser YAG impulsionnel: caractérisation expérimentale et modélisation des aspects thermomécaniques associés à ce procédé : дис. – École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007.

60. Ribis J., Onimus F., Bechade J.L., Doriot S., Cappelaere C., Lemaiguan C., bearded man A., Restoration of the defects of radiation in the alloys of zirconium, experimental approach and modeling // Material 2006, Dijon, France 2006.

61. Parga C.J. et al. Room temperature mechanical properties of electron beam welded zircaloy-4 sheet //Journal of Materials Processing Technology. – 2017.
– T. 241. – C. 73-85.

62. Yao M.Y. et al. The effect of alloying modifications on hydrogen uptake of zirconium-alloy welding specimens during corrosion tests //Journal of nuclear materials.  $-2006. - T. 350. - N_{\odot} \cdot 2. - C. 195-201.$ 

63. Broom D.P., Moretto P. Accuracy in hydrogen sorption measurements //Journal of Alloys and Compounds. – 2007. – T. 446. – C. 687-691..

64. Beattie J.A., Bridgeman O.C. Eine neue Zustandsgleichung für Flüssigkeiten //Zeitschrift für Physik. – 1930. – T. 62. – №. 1-2. – C. 95-101.

65. Kudiiarov V.N. et al. Investigation of hydrogenation parameters influence on hydrogen sorption rate by Zr-1% Nb alloy with nickel layer //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – №. 9-3. – С. 20-23

## Приложение А

#### Глава 1 <u>Литературный обзор</u>

#### Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ71	Федотов Леонид Евгеньевич		

### Консультант школы отделения (НОЦ) – Экспериментальной физики:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Профессор ОЭФ	Лидер Андрей	д.т.н., доцент		
ИЯТШ	Маркович			

### Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
		звание		
Преподаватель ОИЯ	Шайкина Ольга			
ШБИП	Игоревна			

#### **CHAPTER 1. LITERATURE REVIEW**

This chapter reviews literature sources on a given topic, analyzes the physical properties of the zirconium alloy E110, and reviews literature on zirconium welding.

#### **1.2.** The object of the study (zirconium E110)

The binary alloy E110 consists of zirconium and niobium, the content of the latter at room temperature does not exceed 5%. More true to say that the alloy that is used in nuclear power, is composed of a solid solution - niobium in zirconium, which has a hexagonal close-packed (HCP) lattice and a solid solution of - zirconium in niobium having a body-centered cubic (BCC) lattice [8]. The alloy in texture and anisotropy is almost pure zirconium, the basis of which is the phase. It has anisotropy of physical and mechanical properties and capable of changing its texture at the pressure treatment, making it extremely useful in application. The reasons for the doping of zirconium 1% niobium (alloy E110) [9, 10]:

• niobium has a small neutron capture cross section, so the alloy capture cross section as a whole increases insignificantly;

• In pure zirconium, there are harmful impurities such as iron (up to 0.3%), nickel (up to 0.18%), titanium, silicon (up to 0.4%), carbon, aluminum, which have a negative effect, but their effect decreases under the influence of 1% niobium (however, with increasing niobium content, corrosion resistance decreases);

• niobium has a positive effect, reducing the proportion of hydrogen absorbed by the zirconium alloy.

In the process of manufacturing plates of zirconium alloys, manufacturers develop a preferred orientation in it, which determines the mechanical properties, as well as the texture of the resulting product, in particular, the yield stress and the transverse direction increase. The quality of products made of zirconium alloys is largely determined by structural indicators, such as the dispersity of the phases, the size and shape of the grain and the surface condition, which affects the corrosion

resistance [9]. To reduce corrosion processes, the uniformity of the oxide film is necessary, so the fine-grain and dispersity of the excess phases is an obligatory attribute of a quality product from the E110 alloy.



Figure 1.1 – Diagram of the state of the zirconium-niobium system[9] Figure 1.1 shows a diagram of the state of the zirconium-niobium system constructed at slow heating and cooling rates. Also below is a table showing the content of alloying elements in the alloy E110 and its thermal properties.

Table 1.1. The content of a	alloying elements	in the alloy	E110	[11]
-----------------------------	-------------------	--------------	------	------

Element	0	Ν	Cu	Ti	Fe	Ni	Ca	Cr	F
Content, 10 <sup>-2</sup> %	7	0.6	0.3	0.4	2.1	11	3	0.2	0.09
Table 1.2 Thermonhysical properties of the alloy E110 [11]									

 Table 1.2. Thermophysical properties of the alloy E110 [11]

Temperature, °C	20	350	380	420
$\sigma_{\rm B}^{}$ , MPa	372	196	182	174
$\sigma_{0,2}$ , MPa	294	159	143	142
σ <sub>T</sub> , MPa	204			

### **1.2.** Features of zirconium oxidation

Zirconium alloys are the main structural material used in nuclear power reactors with water-cooling. The physical properties of zirconium alloys and their changes during operation greatly influence the service life and the permissible operating conditions of the main components of the reactor. In contact with the refrigerant, zirconium oxidized and absorbed hydrogen.

As a consequence, the mechanical properties of the main components change. In the transition to increased burnup, the processes of oxidation and absorption of hydrogen can lead to limitations in the performance of fuel elements. One of the criteria for the safe operation of the fuel rod in the reactors is the restriction on the thickness of the oxide film  $ZrO_2$ . Despite the fact that corrosion is a process of destruction, the formation of dense oxide films on the surface of zirconium can lead to positive effects due to the formation of a protective barrier in the way of further destruction of the material. The oxide film protects zirconium structural elements from intensive oxidation and improves storage conditions preventing the absorption of gases. It also has good density and adhesion to the surface of the metal.

Zirconium is the only material, besides titanium, which dissolves oxygen in large quantities. This property broadens the prospects for the use of Zr-O alloys from the point of view of the practical use of doping with oxygen and, thus, makes it possible to form the structure and properties of zirconium alloys. The structure-phase state of zirconium alloys is also heavily influenced by the oxygen content. For example, the presence of oxygen (in an amount of 0.2%) in a solid solution contributes to the increase in the parameters of the crystal lattice, to an increase in the temperature of the allotropic process, and to an increase in the density [12]. The presence of oxygen in the alloy can also affect the electrical and thermal properties. When oxygen is alloyed in zirconium alloys, the mechanical properties change as follows: strength and yield strength increase, hardness increases, plasticity and viscosity decrease [13].

Oxidation of zirconium alloys has been studied for a long period of time and scientists have already achieved a good understanding of the physics of processes for

high-temperature conditions in oxidizing environments: hydrogen, vapor and liquid, for example, [14-16].

The oxidation process can be divided into three stages:

1. At the initial stage, under normal conditions, the oxide film is formed rather quickly and consists of a small number of monoatomic layers. These layers are disordered and consist of non-stoichiometric zirconium oxides.

2. The next stage of oxidation is the preliminary transition stage, which takes place at temperatures from 200 °C and above. At this stage, the oxide film grows according to cubic or parabolic laws up to an oxide thickness of 2-3  $\mu$ m. The inner region of the film is non-stoichiometric, the outer region is close to the stoichiometric composition. Such a film is a protective barrier for the oxidation and penetration of hydrogen. However, as the oxide film grows, the mechanical stresses on the metal / oxide interface increase and cracks occur at certain thicknesses.

3. With further growth of the oxide film, more than 2-3  $\mu$ m growth kinetics for the quasilinear dependence of oxidation. This stage of oxide film growth is characterized by a large number of defects in the oxide film, such as cracks and pores [17, 18].

Despite the fact that the boundaries of the implementation of these three oxidation regimes for various alloys under different conditions are well formulated, the problems associated with determining the physical mechanisms regulating corrosion rates in zirconium alloys remain open. Until now, discussions have been held about the role of various physical processes that regulate the transfer of various elements (oxygen, hydrogen, electrons and holes of conductors, additives of alloys and impurities) through the oxide film [19].

However, regardless from the point of view to the process of hydrogen penetration into zirconium through the oxide film, the most important is the fact that after penetration the metal becomes more vulnerable. The penetration of hydrogen causes a change in many physico-chemical properties, such as: ductility, hardness, the appearance of brittleness. Due to increased brittleness, the surface may crack and a delayed hydride cracking mechanism begins.

#### **1.3.** Interaction of zirconium alloys with hydrogen

Hydrogen interacts with virtually all metals and introduces changes, including mechanical properties. In the case of zirconium alloys used in nuclear power engineering, this interaction is especially important since changes in the properties of the alloy affect the operation of fuel rods. Therefore, it becomes necessary to study and track changes in the mechanical properties of structural materials.

Hydrogen adsorbed by the metal, as a rule, can be found in four states: it dissolves in the metal; segregates on the imperfections of the crystal lattice; adsorbs on the surface or accumulates in molecular form in microcavities; forms hydrides with the parent metal. [20, 21]. Traps for hydrogen can be microdefects, dislocations, microcracks, etc. The hydrogen bond energy can be from 0.2 eV (for hydrogen in the form of gas inside microdefects) to several eV (for chemically bound hydrogen), depending on the type of trap. In turn, depending on the magnitude of the binding energy, the traps are divided into reversible and irreversible. Reversible traps have a low binding energy, as well as a state of dynamic equilibrium between themselves and the equilibrium positions of atoms in an ideal crystal lattice. In turn, irreversible traps are characterized by high binding energy. If the metal is degassed under room temperature conditions, hydrogen will leave reversible traps, and in order to obtain a similar effect in irreversible it is necessary to significantly increase the temperature (up to the level of the binding energy). When capturing irreversible traps, the amount of diffusion-mobile hydrogen in the metal decreases [21, 22].

The degree of hydrogenation in conditions of prolonged operation in the reactor depends, first of all, on the temperature and intensity of corrosion of the product, up to 200-300 ppm of hydrogen [23]. At 300-350 °C fueling temperatures, the solubility of hydrogen in zirconium alloys containing 1-2.5% niobium varies between 300 and 400 ppm [24], indicating that under operating conditions, excess hydrogen is present in the material structure in the form of hydrides, and in the case of cooling to 20-60 °C - all hydrogen is contained in hydrides. In supersaturated solid

solutions, the hydride phase is separated along the grain boundaries. The orientation of the grains in turn depends on the internal stresses and texture of the alloy. And in the case of hydride plates, cracks appear.

Destruction of hydrogenated zirconium alloys is usually broken down into several stages: the formation and development of cracks in hydrides due to the interaction of a hydride-slip band or hydride-double; the yield of a crack from the hydride to the matrix and the propagation of a crack in the matrix [25, 26]. The nature of the distribution of hydrides significantly affects the destruction of zirconium alloys, as well as platelet hydride emissions have the greatest harmful effect [27]. The change in the shape of the released hydrides from the plates to particles of spherical shape leads to a substantial reduction in the embrittlement of the material.

When zirconium alloys are used at high temperatures (300-350 °C) and high voltages (80-100 MPa) under the conditions of constantly applied loading, the occurrence and development of hydride cracks occurs by the mechanism of delayed hydride cracking. The growth of cracks of this type can lead to the destruction of the structure even at a voltage below the yield point. The mechanism of delayed hydride cracking according to the data of [28, 29] includes the following stages:

6. dissolution of hydrides in the regions of the matrix with low voltage;

7. diffusion of hydrogen in the direction of the stress gradient (to the top of the crack, where the stresses are maximum);

8. the isolation of the diffused hydrogen in the form of hydrides at the tip of the crack;

9. the growth of hydrides at the tip of the crack to a critical size sufficient to destroy them;

10. the destruction of hydrides at the tip of the crack, and a successive repetition of the process leads to a stepwise crack growth.

In the case of slow cracking, the rate of crack growth is affected by the dispersion of hydride precipitates: the crack propagation velocity increases depending on how dispersed emissions are at the same hydrogen content in the alloy [30].

According to the second mechanism, secondary hydride cracking occurs due to brittle fracture of hydrides and subsequent fusion of several cracks.

Each zirconium product after the manufacturing process contains some hydrogen. To the level of hydrogenation the product has a significant impact: the technology of its production, the quality of this production, as well as the technical capabilities of the equipment used. The main sources of hydrogen in the product in the manufacturing process are: initial charge materials; environment in which technological operations are performed at all stages of metal production and processing; pickling in acids. Welding is one of the technological processes that promotes the saturation of the metal alloy with hydrogen. Since zirconium refers to metals with high chemical activity, it must be welded in a neutral medium, using argon or helium. In the process of welding, hydrogen is formed from moisture that enters argon from the air due to imperfection of the gas protection of the liquid "bath", also hydrogen is contained in the welding wire. The formation of the weld during welding takes place at high temperatures, which significantly increases the probability of hydrogenation of the welded joint. The presence of hydrogen causes the formation of cold cracks in the deposited and base metal [3, 23].

### 1.4. Features of laser welding

In order to begin to consider the welding of zirconium and its alloys, it is first necessary to consider laser welding and micro-welding as a whole. Strict definition of laser welding is not established and each author interprets it in different ways. For example, in [31] laser welding refers to the thermal class of processes in which a material is first melted on a small area, and then the melt crystallizes and an all-inone connection is achieved. The solidification of the melt is accompanied by the establishment of strong chemical bonds between the atoms of the materials, according to their nature and the type of crystal lattice.

The principle scheme of laser welding can be represented as: the initial energy beam in the focusing system is converted into a smaller beam then reaches the material to be welded, where it is partially reflected and partially absorbed, which in turn leads to heating and melting of the materials. As can be seen from the schematic diagram, the source of the tempo energy in laser welding is radiation, which is absorbed by the materials in the zone of action of the laser beam.

The use of laser welding can provide a higher quality of the resulting fuel rods, due to the fact that it has a number of advantages in comparison with other welding methods. With the use of laser welding, a narrow and deeper penetration region can be formed due to the high power density of the beam, in comparison with arc and plasma methods. Another advantage of laser welding is its versatility and a wide range of materials to which it can be applied. It can be a variety of metal alloys or polymers [22]. Among the advantages mentioned above, it is worthwhile to list those that, first of all, favorably distinguish laser welding in the production of fuel elements [33]:

- a small heat-affected zone (HAZ);
- high-strength welded seams;
- easily automated;
- as a rule, no filler material or flux is required

In this case, we are not just talking about laser welding, namely laser microwelding. Also, like the definition of laser welding, there is no strict definition of micro-welding in literary sources. However, in some sources one can find a satisfactory formulation. For example, in [14] it is said that laser microwelding is a method of joining parts that is capable of providing a welding seam size of less than 1 mm, as well as a penetration depth of a weld seam of less than 1 mm. This method is widely used in some industries, such as medical and automotive industry, electronics, etc.

As was defined above in the course of using laser welding, materials are first melted, and then combined because of heating by a focused laser beam. The beam is focused primarily to determine the laser power and the welding speed at which the material will be melted. The choice of these parameters depends primarily on the goals and objectives assigned to the operator and production. Also in front of the operator is the task of highly accurate control of the clearance tolerances and joint positioning of the connected components.

Due to the fact that during laser microwelding filler materials are not used, the gaps need to be filled with material that will be from the adjacent area to the main one, which will require additional energy. The size of the gap in most cases does not exceed 10% of the thickness of the thinnest welding component. The gap problems are due to the strong concavity of the welds or the inability to bridge the gap created between the parts to be joined, in addition, it is much more difficult to start laser welding in the large gap zone.

#### 1.5. Welding of zirconium alloys

In this section, the history of welding of zirconium alloys is considered. The requirements for construction materials used in nuclear power are extremely high: high corrosion resistance, low neutron capture cross-section, resistance to radiation, certain mechanical properties at high temperatures. Among the materials that satisfy these requirements and are used in nuclear power, magnesium, beryllium, stainless steels, aluminum and zirconium are most widely used. Nevertheless, I do not use beryllium so often, due to its high cost. Aluminum and its alloys are used in low-temperature nuclear reactors, due to a change in their properties in the negative direction at high temperatures. Magnesium alloys on contact with water under pressure lose corrosion resistance.

Thus, zirconium and its alloys, as well as stainless steels [8], were the most widely used in nuclear power engineering, since they possess exceptional properties:

- minimum parasitic neutron capture;
- mechanical reliability, constancy of shape and size;

• high thermal conductivity, providing long-term heat transfer without excessive thermal stresses in the shell;

• corrosion and erosion resistance of the cladding in the coolant and in contact with the fuel of the fuel element.

The study of zirconium by scientists has lasted for two centuries, and work on the use of its alloys in the nuclear power industry has been going on for almost eight decades [34, 35], the interest in this material has not faded. This trend can be attributed to the movement of the nuclear power industry along the path of increasing the parameters of nuclear reactors, such as the neutron flux density, the neutron spectrum, the power of heat and temperature. To support the stability and safety of nuclear reactors, the design of fuel rods, of which weld connections are an important part, is not the last. In turn, the need to examine the weld zone and heat-affected zone for residual stress, impurities, hydrogen permeation [9].

Already in the sixties of the twentieth century [36, 37], good weldability of zirconium was observed using arc and contact welding. Although quantitative data was not provided, the quality criteria were plasticity and corrosion resistance. In general, at the time of writing this paper, there was very little data on welding of zirconium.

In the next decade, engineers and scientists, in addition to contact and arc welding, began to study microplasma welding of zirconium [37]. Due to the simultaneous use of zirconium and stainless steel alloys in the reactors of that time [38], the technology for creating bimetallic compounds was topical. Nevertheless, the strength properties of such materials at elevated temperatures deteriorated noticeably due to the appearance at the interface of materials of very brittle intermetallic layers.

The first noticeable jump in the increase in published works on the welding of zirconium and its alloys occurred in the 1980s. The main method was electron-beam welding, and spot and diffusion welding were widely used. Scientists and engineers continued to optimize the technologies for obtaining non-removable compounds of stainless steel and zirconium alloys [39].

The study, experience in the production and operation of fuel elements from zirconium alloys, which accumulated for three decades, made it clear to scientists that it is necessary to pay special attention to the problems of stability of operation properties. These properties needed to be monitored and investigated, because even a slight change in the grain size, its structure, surface state, or geometry of parts, including during their production (welding) [9, 40] led to a shift in operational safety.

In the 1990s, new types of welding began to be used, such as: welding with a non-consumable electrode in helium and argon [41, 42, 43], contact butt [44], and also laser welding [45].

At present, despite the long history of development in the use of zirconium alloys as a structural material in fuel elements, the number of publications devoted to the optimization of welding has become much larger. This can be explained by the fact that at the moment enterprises are trying to increase the number of nuclear fuel, as well as the fact that defects in fuel elements are still present and far from the desired value [46]. Thus, the investigation of the behavior of the elements of fuel assemblies in the presence of defects in welds remains very urgent [47], as well as the improvement of the technology of their production, of which welding is a part.

At the moment, many studies are aimed at modernizing the technologies used in the production of distal gratings. As a result, the design of the distance gratings is improved, and the current contact spot welding is no longer relevant. One of the most attractive alternatives is laser welding. Nevertheless, publications [48] on this topic is extremely small, and they are concentrated on foreign brands of zirconium alloys.

Nevertheless, works devoted to laser welding on the zirconium alloy E110, as well as other Russian zirconium alloys are not actually published. In addition, it is impossible to find work related to mechanisms of hydrogen penetration in laser welds in zirconium, which makes research in this area very relevant.

#### 1.6. Modern trends in the welding of zirconium alloys

A recent study [49] carried out a research devoted to the selection of optimal parameters for electron-beam welding of a niobium alloy (Nb-1% Zr). For the study, sheets with external parameters of  $50 \times 15 \times 3$  mm were used. The welding parameters are shown in Table 1.3.

Sample number	Beam current	Voltage	Welding speed
1	20 mA	85 kV	10 mm/s
2	24 mA	85 kV	10 mm/s
3	30 mA	85 kV	10 mm/s
4	35 mA	85 kV	10 mm/s

Table 1.3. Welding parameters 1]

After the welding, the zone with untouched metal, the heat-affected zone (HAZ), as well as the welds themselves, were studied from the point of view of metallography (geometry and depth of penetration of welding) and various mechanical properties were measured. Among other things, a structural analysis was performed using X-ray diffraction analysis.

From the XRD the authors of this article concluded that the alloying elements are not more than 1%. It also became clear from the results of tensile strength and hardness tests that this niobium alloy has a relatively low hardness and tensile strength.

From the analysis of images obtained from a microscope, the authors note the absence of a clear boundary between the parent metal and the molten metal. The ratio of the temperature gradient to the welding speed, which determines the roughness and size of the weld region, increases, indicating a decrease in grain growth in the center line of the weld.

The hardness profiles of the weld cross section show that the hardness of the weld zone and the HAZ is significantly lower than the hardness of the base metal. The tensile strength of the weld was measured for a sample with a current of 30 mA equal to 281 MPa, which is 53% of the main mass.

Speaking about the solidification of the weld, the authors succeeded in revealing that the recrystallization temperature of this alloy in electron-beam welding was calculated as 713  $^{\circ}$  C, and that solidification in the welded joints takes place in the form of pores, and inter-pore joints are created by microsegregations.

One of the main results of the work is the identification of the most optimal welding regime from the point of view of microstructure, penetration depth, mechanical properties and geometry. This mode of welding is mode 3, characterized by a current strength of 30 mA.

Another study [50] devoted to the already commercial zirconium alloy (R60702) used in nuclear power engineering is devoted to the study of morphology, microstructure, mechanical properties, and most importantly the corrosion resistance of the weld and the base metal. In this paper, fiber-laser welding on a zirconium plate was used.

In this test, the rolled commercially pure zirconium (R60702) was used, the sample size was  $100 \times 30 \times 1.12$  mm. Before welding, the oxide layers and possible grease contamination with sandblasting were removed from the sample. During welding, the laser beams were inclined and created an angle of 10 ° with a vertical direction. In addition, a screen was used, so that the sample was in a protective medium with pure argon and a laser. After the welding process was completed, weld seam photographs were taken and the welding widths were measured on the upper and lower surfaces of the welds. In the Vickers microhardness test, the workload and waiting time were set to 4.9 N and 10 s. The tensile test for the welded joint and base metal was carried out on a universal electronic tensile testing machine with a tensile strain of 1 mm / min.

An important parameter for this study was the value of the parameter  $R_w$ , which is the ratio of the root width and the face width of the seam (see Figure 1.2).



Figure 1.2 – Determination of the ratio of welding width R<sub>w</sub> [50] This parameter can be adopted as a criterion for the acceptability of welding quality to assess the stability of machining at full-pass welding [51].

From a series of experiments and analysis of the literature, the authors of this article have found the optimal range of  $R_w$  values. The  $R_w$  value should be above 0.8

to prevent the pore defect and below 0.95 to avoid a concave crater when welding pure zirconium 1.12 mm thick with a fiber laser. As the laser power was increased, the maximum value of  $R_w$  shifted in the direction of a more positive defocusing distance or a higher welding speed. The width of the face-to-face welding, the width of the root seam and  $R_w$  of the individual welded filaments of the fiber laser (welding speed 4 m / min, defocusing distance 2 mm and laser power 2.5 kW) were 1.55 mm, 1.37 mm and 0.88 mm respectively.

Analysis of the results obtained from microscopy and morphological studies allowed the authors to make conclusions regarding the state of the weld and the heat affected zone. When using a fiber-laser welded joint in the study, it was found that the melting zone consists of coarse columnar grains of the original  $\beta$ -Zr, whereas the base metal consisted of thin equiaxed  $\alpha$ -Zr grain. In addition, in the initial  $\beta$ -Zrgranules, there was a large amount of thin a-martensite in the weld. In addition, it can be considered an interesting observation that the solid-phase transformation occurred in the HAZ in the vicinity of the welding seams. Thus, the HAZ microstructure formed part of the characteristic of the base metal zone and the seam itself.

Because of the thin  $\alpha'$  phase lamellar martensite distributed over the residual initial phases of the  $\beta$  phase in the weld seam, the microhardness of the weld was the highest, below the HAZ and the last was the base metal.

After testing the tensile strength, it was concluded that the strength of the welded joint was 314.75 MPa, which is slightly higher than the base metal (311.61 MPa).

One of the most important conclusions in this paper is devoted to the successful increase in the corrosion resistance of the obtained joints and HAZ. Due to the martensitic transformation in the weld and close to the welded joint of the HAZ, the corrosion resistance of the welded joint, tested by a 20% acetic acid solution, was qualitatively better than that of the base metal.

Quhon Han et. al., in 2012, did work [52] on the topic of laser pulse welding on thin sheets of Zircaloy-4 alloy. Laser welding experiments were carried out using Zircaloy-4 samples measuring 80×15×0.6 mm. Also, the authors carried out numerical simulation using commercial code SYSWELD. To simulate the process of pulsed laser welding, a three-dimensional model of finite elements has been developed. Modeling was carried out to optimize the laser welding process by predicting the evolution of laser fields and mechanical properties.

The authors divided the properties of the material (concerning laser welding) into two groups: one group consists of thermal properties, such as thermal conductivity, density and specific heat, which are necessary for analyzing the temperature distribution. The other group consists of mechanical properties, such as modulus of elasticity, yield strength and thermal deformation, which are necessary for the analysis of plastic deformation.

Welding was performed using an Nd: YAG laser with a peak power of 1 kW, a pulse frequency of 5 Hz and 10 ms for a pulse duration. Tensile tests were carried out at temperatures from room temperature to 800 °C with a strain rate of 0.1 mm / s. The yield point of the heat-affected zone for Zircaloy-4 is higher than that of the welded seam. Fracture of the welded sample occurred in the heat-affected zone, since the HAZ is a fairly fragile part.



Figure 1.3 – The geometry of the welding plate and the image of the mesh along the welding line

To simulate the process of pulsed laser welding, a three-dimensional model of finite elements has been developed. The plate structure consists of 8-element brick elements and 6-node prismatic elements with 58,600 nodes and 49220 elements, as

shown in Figure 1.3. There are 38 one-dimensional elements on the welding line, each of which is a spot weld. The area along the welding line is sampled by a very dense mesh, since the small size of the weld and the HAZ have a high temperature gradient. The size of the sampled area is defined as the size that can include the weld seam and the HAZ. The time function is developed using the FORTRAN subroutine.

As shown in Fig. 1.4, the results of the simulation are consistent with experimental observations representing an accurate temperature prediction corresponding to a phase change.



Figure 1.4 – The profiles of the weld zone and the HAZ, taking into account the thermal effect on the surface: (a) modeled and (b) from the experiment In this study, the authors developed a finite-element model for pulsed laser

welding for the Zircaloy-4 plate, which includes phase transitions and the dynamic properties of a material with a transition temperature. A model capable of predicting isotherms of transition temperatures, parameters of welded pools and corresponding thermal deformations. The simulation results show that the distortions caused by welding strongly depend on the geometry of the melting zone and the heat affected zone. The compression of the induced distortions of thin sheets decreases as the laser power increases, which is caused by the morphological evolution of the welded seam. As the laser power is increased, the direction of the HAZ gradient corresponding to the thermal gradient becomes uniformly along the thickness direction, which causes a reduced thermal distortion. Based on the developed model of pulsed laser welding for Zircaloy-4, a systematic system for designing the welding process can be developed.
Another work [53] devoted to the welding of zirconium was made in 2012. The authors of this article investigated the type of welding that does not imply the process of melting the material, friction stir welding (FSW). In this study FSW was applied to Zircaloy-4 using a cobalt based alloy tool developed by the authors [54]. The possibility of applying FSW to Zircaloy-4 and the distribution of microstructure and hardness in the weld seam was studied. In addition, microstructural evolution was also evaluated during the application of FSW.

After the welding process, the Vickers hardness profile was measured crosssection perpendicular to the welding direction. The microstructure of the weld was investigated by optical microscopy and electron backscatter diffraction (EBSD). The sample was subjected to electrolytic etching in a solution consisting of 10 ml of perchloric acid and 90 ml of acetic acid at room temperature with a voltage of 35 V. The EBSD system equipped with a scanning electron microscope was used to obtain orientation data with a step size of 0.4 nm.

The appearance of the weld is shown in Figure 1.4a. A smooth, shiny surface without defects is obtained. An overview of the weld cross-section is shown in Figure 4b.



Figure 1.5 – Overview of (a) the appearance and (b) the cross-section of the weld, and (c) the hardness profile measured across the seam. "RS" and "AS" mean the receding side and the advancing side of the weld, respectively

A graph of the Vickers hardness values in the weld zone is shown in Fig. 1.5c. The hardness of the base material is from 170 to 180 Hv. The hardness increases from the region of the base material to the weld zone, and the hardness of the weld zone reaches about 188 Hv.

In the course of the work, it was noted that an equiaxed grain structure is being formed. The hardness in the weld zone is increased, which can be related to the cleaning of the grain. This process was due to continuous recrystallization with a possible contribution from intermittent recrystallization.

Another work [55] is devoted to electron-beam welding, only Zr-702 zirconium alloy. The use of electron beam welding in high vacuum is designed to protect the alloy from penetration of N, H and O into the metal. In this work, the authors, as in [50], stress the study of the corrosion resistance of a welded joint and the heat-affected zone.

The rolled sheets of the Zr-702 alloy were cut into smaller sheets with a geometry of  $50 \times 20 \times 4.3$  mm and subjected to annealing. Then the surfaces were treated with a sheet of SiC abrasive paper and immersed in ultrasonic baths for 10 minutes. Welding was carried out on a TECHMETA welding machine with an accelerating voltage of 60 kV and a vacuum degree in the range from  $2.0 \times 10^3$  to  $3.0 \times 10^3$  Pa. The welding speed was 300 mm / min, and the beam current was from 15 mA to 18 mA.

To obtain the surface characteristics and morphology of the samples after welding, X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) equipped with an energy dispersive spectrometer (EDS) and optical microscopy (OM) with a polarization film were performed.

The optimum welding parameters were a beam current of 16.5 mA and a welding speed of 300 mm / min. The surface of the obtained joints was pure and silvery-white, which indicates the effectiveness of using electron-beam welding in order to protect the alloy from contamination.

The results of XRD and TEM indicate that the welded joints obtained by this type of welding consist of  $\alpha$ -Zr and  $\beta$ -Zr. More precisely, small-size  $\beta$ -Zr blocks are distributed along the edges of the lamellar  $\alpha$ -Zr. Also, the data obtained by the authors indicate an extremely low content of the Zr<sub>3</sub>Fe compound in the welded joint, which adversely affects the corrosion resistance of the zirconium alloy.

In order to study the corrosion resistance, the authors analyzed the polarization curves of the base metal, the heat-affected zone and the welded joints. It follows from the analysis that all the polarization curves had similar characteristics. After that, the samples were dropped into a saline solution. To detect differences in corrosion resistance between the base metal, HAZ and seams, SEM and EDS were used. From which the following conclusions were drawn:  $Zr_3Fe$ , contained in the main metal, strongly affects its corrosion resistance. The heat-affected zone and the welded joint of the joint have better corrosion resistance than the base metal, since electron beam welding with high vacuum promotes the cleaning of welded joints.

117

In work [56], the influence of  $CO_2$  laser welding on Zircalloy-4 alloy is studied. The positive sides of this type of welding are: a small heat-affected zone, which cools fairly quickly; a great value of the coefficient of depth of welding, which is a necessary criterion in the process of manufacturing fuel rods from Zircalloy-4. To investigate this type of welding and its effect on the zirconium alloy, the authors decided to analyze the morphology and the types of phases that arise in the weld seam and the HAZ. The microhardness analysis was also performed by the Vickers method.

A complete analysis of the chemical composition was carried out by X-ray fluorescence analysis (XRF), the data of which are presented in Table 1.4.

Table 1.4. XRF results [56]

Impurity elements	Cr, at.%	Sn, at.%	Fe, at.%
Zircalloy-4	0.12	1.43	0.20

The welding process was carried out on the SPECTRA-PHYSICS LASER  $CO_2$  1.5 KW. In this installation, there is a source of uninterrupted flow of  $CO_2$  (10.6 microns) 1500 W. After the end of the welding process, it was noted that the microstructure consists of the following zones: the central zone that corresponds to the weld zone and the heat-affected zone (HAZ), whose structure shows fine grain, and also a structure of the Widemansttäten type [57, 58].

Speaking about the structure of welded joints obtained by laser  $CO_2$  welding, then for two samples the seam was purely ferrite  $\alpha$ -Zr. This was confirmed by XRD and EDS analyzes.

The microhardness measured by the Vickers method showed that the weld seam and the HAZ itself are uniform and there is no significant difference between them. This result is considered correct taking into account the step value of 0.5 mm [59, 60].

The paper [61] was published in 2016 and is devoted to the mechanical properties at room temperature of a Zircalloy-4 zirconium alloy sheet obtained by electron-beam fusion.

The Zircalloy-4 sheet with a thickness of 1.6 mm was successfully welded by electron beam welding. The sheet was first welded with a parameter of 10.5 J / mm, then 36.7 J / mm with a final heat input of 15.7 J / mm.

Calculation of the weld seam and HAZ boundaries using the Rosenthal (1.1) analytical equation for a three-dimensional heat flux for a semi-infinite billet is well correlated with experimental measurements.

$$\frac{2\pi(T-T_0)kR}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R-x)}{2\alpha}\right]$$
(1.1)

Где T – temperature;  $T_0$  – preform temperature of the workpiece before welding;

k – heat conductivity of the workpiece.

The parameters of electron-beam welding used in this paper for the Zr-4 sheet (1.6 mm) made it possible to fabricate a material whose mechanical properties are close to those of a pure Zr-4 sheet.

Material made by welding has a similar hardness compared to the base metal (0.8% difference). The value of hardness increases with the transition from the base metal to the beginning of the weld (ie HAZ) and, finally, is leveled in the zone of the base metal. The HAZ has a higher hardness than the base metal (approximately 3%) and the weld zone (approximately 2%). The overall difference between the hardness between Zr-4 and the welded material can be considered insignificant.

SEM results show a clear morphology of the microstructure and grain size in the welding zone, the HAZ and in the main metal. The most grain in the weld seam (39.5 nm), in the main metal they become smaller and more regular (6 nm). The sample from the welded material shows predominantly large  $\alpha$ -Zr plates of the Widmanstätten type. The zone of thermal impact consists of a needle grain structure Zr. The base metal exhibits an equiaxed fine-grained  $\alpha$ -Zr structure.

In paper [62], the behavior of hydrogen absorption for welding samples was studied by studying the amount of zirconium hydrides after corrosion tests. Then, the effect of alloying modifications on the absorption of hydrogen by zirconium alloys was discussed.

Elements of alloy			
Sn	Fe	Cr	Nb
1 97	0.37	0.23	/
1.77	0.37	0.25	/
1.92	0.32	/	/
1.88	0.35	/	0.52
1.00	0.55	/	0.52
1.50	0.20	0.10	
	Elements of a Sn 1.97 1.92 1.88 1.50	Elements of alloySnFe1.970.371.920.321.880.351.500.20	Elements of alloySnFeCr1.970.370.231.920.32/1.880.35/1.500.200.10

Table 1.5. Composition of zirconium alloys (mass.%)

To obtain the butt joints, two bands with the same composition (for example, No. 1) were welded alternately with three strips of No. 4 (Zircaloy-4) by means of vacuum electron beam welding, as shown schematically in Figure 6. To simplify the recording, samples where the No. 1 bands were welded alternately with strips No. 4, were designated as 1-4. The rest can be designated analogously, i.e. 2-4, 3-4 and 4-4.



Figure 1.6 – Schematic diagram of the welding sample

To analyze the composition of the composite in different positions at a distance of 50 nm from the welding surface, they were analyzed by an electronic microprobe. The relative content of Sn, Fe, and Cr in each position was obtained by comparing their peak intensities with the values in Zircaloy-4, respectively.

The welded samples were cut at a distance of 10 mm perpendicular to the weld seams by spark cutting (see Figure 1.6). Samples were divided into two groups, each of which contained three samples. One group was subjected to an annealing process at a temperature of 500  $^{\circ}$  C for 1.5 hours, and the other was not annealed.

Corrosion tests of the welding samples were carried out in an autoclave at 400 ° C. in a steam of 10.3 MPa H2O for 165 days. Before the corrosion tests, the samples were cleaned and etched in a solution of 10% HF + 45% HNO<sub>3</sub> + 45% H<sub>2</sub>O (by volume) and then washed in cold tap water and boiled deionized water.

Some sections of the samples subjected to corrosion were obtained by grinding, polishing and etching in a solution of 10% HF + 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 80% HNO<sub>3</sub> (by volume) to reveal the hydrides. Optical microscopy was used to study the morphology and distribution of hydrides.

The high content of Cr in the weld zone in the samples led to a higher absorption of hydrogen. With the addition of a small amount of Nb to zirconium alloys that did not contain Cr, the corrosion resistance improved markedly, but in the matter of hydrogen absorption, the addition of Nb affected only slightly.

## **1.7.** Conclusions on the section

As can be seen from review of the literature of the research methods of welding materials used in the field of nuclear power is quite a lot. The most widely used methods are electron-beam welding, fiber-laser welding, laser pulsed, friction welding with mixing, welding with laser beam CO<sub>2</sub>. After applying the welding process, scientists examine the surface condition, mechanical properties, morphology, the influence of impurities, corrosion resistance and even the problems of hydrogen penetration into welded seams. However, as you can see, there are no articles on the effect of hydrogen penetration on welds obtained by laser welding of the zirconium E110 alloy, which once again underscores the uniqueness and relevance of this study.