

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

Школа **Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности**
 Специальность **15.04.01 Машиностроение**
 ООП/ОПОП **15.04.04 Машины и технологии сварочного производства**
 Отделение школы (НОЦ) **Отделение электронной инженерии**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Импульсная лазерная сварка циркониевого сплава Э110

УДК 621.791.72.01.052:669.296

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ01	Елкин Максим Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ ИШНКБ	Киселев А.С.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская М.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЭИ ИШНКБ	Кулагин А.Е.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ ИШНКБ	Гордынец А.С.	к.т.н.		

Планируемые результаты освоения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способностью формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способностью применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способностью использовать иностранный язык в профессиональной сфере
ОПК(У)-4	Способностью осуществлять экспертизу технической документации
ОПК(У)-5	Способностью организовывать работу коллективов исполнителей, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок выполнения работ, организовывать в подразделении работы по совершенствованию, модернизации, унификации выпускаемых изделий, и их элементов, по разработке проектов стандартов и сертификатов, обеспечивать адаптацию современных версий систем управления качеством к конкретным условиям производства на основе международных стандартов
ОПК(У)-6	Способностью к работе в многонациональных коллективах, в том числе при работе над междисциплинарными и инновационными
ОПК(У)-7	Способностью обеспечивать защиту и оценку стоимости объектов интеллектуальной деятельности
ОПК(У)-8	Способностью проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий в области машиностроения
ОПК(У)-9	Способностью обеспечивать управление программами освоения новой продукции и технологий, проводить оценку производственных и непроизводственных затрат на обеспечение требуемого качества продукции, анализировать результаты деятельности производственных подразделений
ОПК(У)-10	Способностью организовывать работу по повышению научно-технических знаний работников
ОПК(У)-11	Способностью подготавливать отзывы и заключения на проекты стандартов, рационализаторские предложения и изобретения в области машиностроения
ОПК(У)-12	Способностью подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований в области машиностроения

ОПК(У)-13	Способностью разрабатывать методические и нормативные документы, предложения и проводить мероприятия по реализации разработанных проектов и программ в области машиностроения
ОПК(У)-14	Способностью выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способностью разрабатывать технические задания на проектирование и изготовление машин, приводов, оборудования, систем и нестандартного оборудования и средств технологического оснащения, выбирать оборудование и технологическую оснастку
ПК(У)-2	Способностью разрабатывать нормы выработки и технологические нормативы на расход материалов, заготовок, топлива и электроэнергии в машиностроении
ПК(У)-3	Способностью оценивать технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, изготовления машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов, принимать участие в создании системы менеджмента качества на предприятии
ПК(У)-8	Способностью организовать и проводить научные исследования, связанные с разработкой проектов и программ, проводить работы по стандартизации технических средств, систем, процессов оборудования и материалов
ПК(У)-9	Способностью разрабатывать физические и математические модели исследуемых машин, приводов, систем, процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере, разрабатывать методики и организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов
ПК(У)-10	Способностью и готовностью использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности

ПРИКАЗ

Школа **Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности**
Направление подготовки **15.04.01 Машиностроение**
Отделение школы (НОЦ) **Отделение электронной инженерии**

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП
_____ Гордынец А.С.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Выпускной квалификационной работы магистра

(ВКР бакалавра/ ВКР специалиста/ ВКР магистра)

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ01	Елкин Максим Александрович

Тема работы:

Импульсная лазерная сварка циркониевого сплава Э110	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№159-55/с от 08.06.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	21.06.2022
------------------------------------------	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектами исследования являются: импульсная лазерная сварка, пластины из циркониевого сплава Э110, аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы 2. Объекты исследования 3. Расчеты, аналитика и методика эксперимента 4. Результаты проведенного исследования 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 6. Социальная ответственность 7. Заключение
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>1-4, 7</p>	<p>Киселев А.С., к.т.н., доцент ОЭИ ИШНКБ</p>
<p>5</p>	<p>Верховская М.В., к.э.н., доцент ОСГН ШБИП</p>
<p>6</p>	<p>Федорчук Ю.М., д.т.н. профессор ТПУ</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</p>	
<p style="text-align: center;">1. Обзор литературы 4. Результаты проведенного исследования</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>10.01.2022</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОЭИ ИШНКБ</p>	<p>Киселев А.С.</p>	<p>к.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>1ВМ01</p>	<p>Елкин Максим Александрович</p>		

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



Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение
Уровень образования магистратура
Отделение школы (НОЦ) электронной инженерии
Период выполнения осенний/весенний семестр 2021/2022 учебного года

Форма представления работы:

Выпускная квалификационная работа магистра
(ВКР бакалавра/ ВКР специалиста/ ВКР магистра)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающегося:

Группа	ФИО
1ВМ01	Елкин Максим Александрович

Тема работы:

Импульсная лазерная сварка циркониевого сплава Э110

Срок сдачи студентом выполненной работы: 21.06.2022

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.01.2022	1. Обзор литературы	10
14.02.2022	2. Объекты исследования	10
30.03.2022	3. Расчеты, аналитика и методика эксперимента	20
27.04.2022	4. Результаты проведенного исследования	20
10.05.2022	5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
24.05.2022	6. Социальная ответственность	10
31.05.2022	Английский язык	10
04.06.2022	Заключение	5
05.06.2022	Презентация	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ ИШНКБ	Киселев А.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ ИШНКБ	Гордынец А.С.	к.т.н.		

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ01	Елкин Максим Александрович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 122 с., 19 рис., 32 табл., 105 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: импульсная лазерная сварка, циркониевые сплавы, тепловыделяющие сборки, микроструктура, спектральный анализ, аргон.

Объектом исследования является импульсная лазерная сварка циркониевого сплава Э110.

Цель работы – разработать рекомендации по выбору энергетических параметров лазерной сварки стыковых соединений циркониевого сплава Э110, применяющегося при изготовлении тепловыделяющих сборок ядерных реакторов.

В ходе работы проводился обзор существующих способов сварки циркониевых сплавов, определение специфики лазерной сварки и предложена методика исследований для понимания зависимости качества сварных соединений от энергозатрат. Были проведены испытания на механические свойства, исследование микроструктуры швов и их поверхности, а также коррозионные испытания, имитирующие эксплуатационные условия при контакте с ядерным топливом.

В результате исследований определены оптимальные энергетические параметры лазерной сварки, выявлены недостатки предложенной технологии и сформулированы дальнейшие направления исследований.

Степень внедрения: задание было выполнено применительно к предприятиям ядерной энергетики.

Область применения: рассмотренная технология после завершения всех исследований может применяться при изготовлении тепловыделяющих сборок и дистанционирующих решеток, используемых в наиболее распространенных водородных ядерных реакторах.

Экономическая эффективность/значимость работы: сравнив значения показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация технологии является более эффективным вариантом по сравнению с конкурентами с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Оглавление

Введение.....	10
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки.....	13
1 Обзор литературы.....	16
1.1 Специфика лазерной сварки.....	16
1.2 Сварка циркониевых сплавов.....	19
1.3 Защита зоны сварки.....	22
2 Объекты исследования.....	24
2.1 Циркониевый сплав Э110.....	24
2.2 Аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2.....	27
3 Расчеты, аналитика и методика эксперимента.....	29
4 Результаты проведенного исследования.....	33
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .	45
5.1 Предпроектный анализ.....	45
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	45
5.1.2 Анализ конкурентных решений и технология QuaD.....	46
5.2 SWOT-анализ.....	49
5.3 Структура работ в рамках научного исследования.....	53
5.4 Разработка графика проведения научного исследования.....	54
5.5 Бюджет научно-технического исследования.....	58
5.5.1 Расчёт материальных затрат.....	58
5.5.2 Расчёт амортизационных отчислений.....	59
5.5.3 Основная заработная плата исполнителей.....	61
5.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	62
5.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	63
5.5.6 Накладные расходы.....	64
5.6 Определение ресурсоэффективности исследования.....	64
5.6.1 Интегральный показатель ресурсоэффективности.....	65
Выводы по разделу.....	68

6	Раздел «Социальная ответственность».....	72
	Введение.....	72
6.1	Анализ выявленных вредных и опасных факторов	73
6.2	Микроклимат в помещении	74
6.3	Освещенность рабочей зоны	75
6.4	Повышенный уровень электромагнитных излучений	80
6.5	Превышение уровней шума.....	82
6.6	Электроопасность	83
6.7	Пожарная опасность	85
6.8	Лазерное излучение	87
6.9	Экологическая безопасность	88
6.10	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	90
	Перечень нормативно – технической документации	92
	Заключение	94
	Список использованных источников	95
	Приложение А	105
1	The literature review.....	106
1.1	Specifics of laser welding	106
1.2	Welding of zirconium alloys	109
1.3	Shielding of welding zone	111
4	Results of the study.....	113

Введение

Достаточно большой срок прошел с последней крупной радиационной аварии на атомной электростанции (АЭС) Fukushima-1, и, хотя достигнуто значительное повышение безопасности активной зоны ядерных реакторов (ЯР), специалисты оценивают повторение подобного инцидента, соизмеримого по ущербу, как довольно высокое. Современные программы развития атомной энергетики учитывают данную проблему и предъявляют соответствующие требования к сооружениям ближайшего будущего. Например, в числе приоритетных задач, решаемых проектом АЭС-2006 – российской атомной станции нового поколения, так же ставятся минимизация рисков и обеспечение требуемого уровня безопасности. Так как первыми физическими барьерами защиты атомных электрических станций являются элементы тепловыделяющих сборок (ТВС), для предотвращения проектных и запроектных аварий, основной упор делается на исследования в направлении повышения эксплуатационных характеристик именно этих конструкций [1]. Они должны обеспечивать устойчивость формы и размеров за весь период работы в реакторе, надежную прочность всех узлов в рабочих условиях, переменных термических напряжениях, статических, динамических и вибрационных внешних нагрузках, действующих в условиях рабочих температур в течение всего срока эксплуатации, который для данных элементов активной зоны ЯР составляет не менее трех лет [2]. Значительное влияние на работоспособность ТВС оказывают сварные соединения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и дистанционирующих решеток (ДР), выполненные контактной и лазерной сваркой [3, 4].

К сварным соединениям ТВС предъявляют требования по прочности, коррозионной стойкости, жаростойкости, способности выдерживать вибрационные и ударные нагрузки определенное количество теплосмен, без разрушения в процессе эксплуатации. Дело в том, что потеря теплоносителя ЯР даже на короткое время (секунды, пока не сработают аварийные системы снабжения) ведет к резкому снижению теплоотдачи топлива и, соответственно, температурному скачку ТВС. Помимо этого, давление в системе падает и, как следствие, напряжения в оболочках ТВЭЛ

значительно возрастают, что может привести к их раздуванию, а в некоторых случаях и к разрыву. При этом разрушенные топливные таблетки могут переместиться в раздувшуюся зону, что, при включении аварийных систем, блокирует подачу охлаждения [5]. Исходя из вышеизложенного, представляется актуальной задача совершенствования изготовления элементов ТВС.

Одной из важнейших операций в технологии изготовления ТВС является сварка. Она существенно изменяет структуру и свойства металла. Концевые части соединяются с ТВЭЛ электронно-лучевой и контактной стыковой сваркой, а части дистанционирующих решеток между собой контактной точечной и лазерной сваркой [6]. Требования к сварщикам, сварочным материалам, оборудованию и технологиям, а также качеству сварных соединений регламентируются стандартами [7-11]. Несмотря на их существование, проблема выхода из строя ТВЭЛ в процессе эксплуатации, в том числе из-за заводских дефектов сварных швов, до сих пор остается весьма актуальной [12, 13]. По этой причине многие исследования направлены на оптимизацию традиционных технологий сварки и разработку новых методов [14]. Например, лазерная сварка может быть более эффективным, чем электронно-лучевая, методом соединения сплава Э110 в процессе изготовления ТВЭЛ для ВВЭР. Для лазерной сварки не требуется вакуумная камера, что повышает эффективность процесса и снижает выгорание легирующих элементов.

Целью данной работы является разработка технологии импульсной лазерной сварки стыковых соединений из циркониевого сплава Э110. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить влияние энергетических параметров режима лазерной сварки на ширину шва, структуру и механические свойства;
- исследовать связь энергетических параметров с загрязнением металла газами из окружающей среды, а также оценить влияние загрязнений на свойства сварных соединений;
- провести корректировку режимов сварки в соответствии с полученными результатами и сформулировать дальнейшее направление исследований по данной теме.

Практическая значимость результатов магистерской ВКР заключается в возможности применения разрабатываемой технологии в атомной промышленности при изготовлении ТВЭЛ и дистанционирующих решеток.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Данная выпускная квалификационная работа содержит в себе следующие обозначения и сокращения:

АЭС – атомная электростанция;

ЯР – ядерный реактор;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ДР – дистанционирующая решетка;

ВКР – выпускная квалификационная работа;

ЗТВ – зона термического влияния;

ГТАW – сварка неплавящимся электродом в среде инертного газа;

ОЦК – объемно-центрированная кубическая решетка;

ПК – персональный компьютер;

ЧПУ – станок с численно-программным управлением;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

ВДТ – видеодисплейный терминал;

СО₂ – углекислый газ;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

СКЗ – средства коллективной защиты;

СИЗ – средства индивидуальной защиты;

ПДК – предельно-допустимые концентрации.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.
2. ГОСТ Р 2.2.2006-05 Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Стандартинформ, 2015. – 45 с.

3. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. / Разработаны: НИИ медицины труда РАМН / Афанасьева Р.Ф., Репин Г.Н., Михайлова Н.С., 1996. – 45 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
5. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы / Минздрав России / Москва 2003. – 27 с.
6. СП 52.13330.2016 Свод правил. Естественное и искусственное освещение Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. / НИИСФ РААСН / Дата введения 2017 – 35с.
7. СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах" / Минздрав России / Москва 21 2016 год. – 26 с.
8. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов. //М.: ИПК Издательство стандартов, 2001 – 42с.
9. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. // Минюст России 01.08.2003 – 25с.
- 10.СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы // Госстрой СССР 01.01.1987 – 29с.
- 11.ГОСТ 12.1.040-83 Лазерная безопасность. Общие положения / Минздрав России / Переиздание от 2001 года – 16 с.
- 12.ГОСТ 12.1.030-81 Электробезопасность защитное заземление. Зануление. / Государственный комитет СССР/ Переиздание от 2001 года – 19 с.
- 13.ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
- 14.СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.

15. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
16. Р 2.2.2006-05. Руководство гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
17. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2013.
18. ГОСТ 12.1.009-76 межгосударственный стандарт система стандартов безопасности труда.
19. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2013. –704с.
20. ОСТ 54 30013-83. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности. // Дата принятия 04.04.1983 // ОСТ СССР (Отраслевой Стандарт СССР) – 25 с.
21. ОСТ 95-503-2006 Соединения сварные и паяные для изделий активных зон ядерных реакторов. Общие технические требования. Правила приёмки и методы контроля качества// Дата принятия 01.01.2007 – 66 с.
22. ОСТ 95 877-2011 Реакторы ядерные. Активные зоны. Соединения сварные и паяные. Правила проектирования и организации производства // Дата принятия 01.10.2011 – 60 с.

1 Обзор литературы

1.1 Специфика лазерной сварки

Процессы лазерной сварки различных металлов и сплавов изучаются уже полвека [15, 16]. Однако разработка технологии сварки для каждого нового сочетания типа и размеров соединений, а также составов материалов остается сложной задачей.

К настоящему времени разработано множество руководств и рекомендуемых методик сварки реактивных металлов (титан, цирконий и их сплавы) [9, 17–23]. В целом они содержат требования к тщательной предварительной очистке свариваемых деталей и сварочных материалов, надлежащей защиты зоны сварки, а также установки оптимальных энергетических параметров. Не существует конкретных таблиц, графиков и других четких указаний по установлению параметров сварки в зависимости от способа сварки, химического состава сплавов, размеров деталей и конфигурации соединения. В связи с этим в первую очередь необходимо обобщить сведения о влиянии основных параметров сварки на процесс и, как следствие, на свойства сварных соединений. Только тогда технология сварки может быть разумно разработана в каждом конкретном случае.

Применительно к лазерной технологии сварочные процессы подразделяются на два основных типа в зависимости от отношения подводимой энергии к объему расплавленного металла [9–11, 16, 24–36]. Первый тип, кондуктивный, характерен для сварки толстостенных конструкций. Сварочная ванна образуется за счет рассеивания энергии лазерного луча вглубь металлов за счет теплопроводности. Температура сварочной ванны находится в интервале между температурами плавления и испарения металлов. Сварные швы обычно имеют полукруглое поперечное сечение с небольшим соотношением сторон. Второй тип, режим кинжального проплавления, используется для сварки относительно небольших заготовок. Этот тип сварочных процессов использует высокие значения тепловложения, а температура на поверхности сварочной ванны может быть выше точки кипения.

Кроме того, процессы лазерной сварки делятся на непрерывный и импульсный режимы. При непрерывном энерговлечении основными технологическими параметрами являются диаметр сфокусированного на поверхности луча d , скорость сварки V и мощность лазера P . Для импульсных режимов определяющими энергетическими параметрами являются энергия импульса E , длительность импульса τ , частота f и пиковая мощность:

$$P_{peak} = E/\tau \quad (1.1)$$

Все вышеперечисленные параметры взаимосвязаны. Их значения определяются толщиной свариваемых деталей, конфигурацией соединения, теплофизическими и оптическими свойствами материалов. Учитывая, что толщина деталей ТВС, как правило, не превышает 1 мм, наиболее рациональной технологией их соединения является импульсная лазерная сварка с кинжальным проплавлением [9–11, 16, 24–36]. Поэтому необходимо кратко рассмотреть влияние вышеуказанных параметров на свойства сварных швов.

Энергия импульса является основным параметром процесса [16, 28–31, 35]. Он определяет количество тепла, выделяемого в зоне сварки. При малых энергиях импульса диаметр сварочной ванны может быть меньше диаметра лазерного луча d из-за неравномерного распределения температуры на поверхности деталей. В свою очередь, увеличение энергии импульса увеличивает как глубину проплавления, так и диаметр сварочной ванны до $(1,25..1,50) \cdot d$, при этом прочность соединений изменяется по кривой с максимумом. Вначале она повышается за счет увеличения размеров зоны сплавления, а затем снижается из-за уменьшения площади поперечного сечения шва, вызванного испарением и разбрызгиванием металла [25, 28, 32].

Реактивное давление паров имеет место, когда энергия импульса избыточна. Это вызывает образование геометрических несовершенств сварных соединений. Вероятность прожогов или подрезов увеличивается, например, при сварке тонкостенных заготовок. Кроме того, снижается защита зоны сварки инертными газами и усиливается окисление поверхностей. Как следствие, увеличивается энергоемкость, увеличивается тепловыделение и ухудшается качество сварных соединений. При

оптимальных параметрах сварки металл быстро нагревается до необходимой температуры. Затем эта температура поддерживается на одном уровне до конца импульса за счет плавного уменьшения количества подводимой энергии. При этом тепло распространяется в металл за счет теплопроводности, а металлургические реакции протекают на поверхности без интенсивного испарения, экстенсивного реактивного давления паров и других неравновесных процессов [32, 33].

Длительность импульса определяет период, в течение которого лазерное излучение воздействует на металл. Диапазон оптимальных значений этого параметра зависит от энергии импульса, толщины свариваемых деталей, конфигурации соединения. Относительно короткая продолжительность необходима для сварки металлов с высоким коэффициентом отражения и теплопроводностью, так как высока вероятность разбрызгивания металла при слишком быстром подводе энергии. Увеличенная длительность импульса нагревает металл до температуры выше точки плавления, что уменьшает количество нерастворенных газов в сварочной ванне и снижает образование пор при кристаллизации. С другой стороны, увеличивается доля потерь энергии за счет теплопроводности и, следовательно, увеличиваются размеры ЗТВ. Максимальная глубина проникновения без брызг металла может быть достигнута за счет оптимального сочетания увеличенной длительности импульса и пониженной удельной мощности [16, 25, 28, 34].

Частоту импульсов следует задавать с учетом особенностей импульсной лазерной сварки. Когда начинается процесс сварки, заготовки расплавляются в одной точке во время первого импульса. Затем место взаимодействия лазерного луча с поверхностью смещается за счет движения заготовок или сварочной головки. Следующий импульс расплавляет очередной объем металла, при этом значительное количество энергии затрачивается на повторный нагрев части ранее сваренного металла. Коэффициент перекрытия соседних точек OL является важным критерием, влияющим на качество сварных швов. Он определяется скоростью сварки V , диаметром луча d и частотой f по следующей зависимости:

$$OL = \frac{d \cdot V}{f} \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

Рекомендуемые значения OL , указанные в разных руководствах по импульсной лазерной сварке, отличаются друг от друга: 30..50 % [25, 31, 32], 50..60 % [16] и 50..70 % [35] – для сварных соединений без особых требований; 50..90 % [25, 31, 32], 70..80 % [34], 75..80 % [16] и ~70 % [35] – для герметичных сварных швов.

Повышение эффективности импульсной лазерной сварки возможно за счет увеличения средней мощности при минимальной энергии импульса и максимальной частоте [28]. Из-за высокой частоты повторения импульсов металл в зоне сварки не успевает остыть и при последующих импульсах нагревается очень быстро. Однако при этом также изменяются коэффициент отражения и теплофизические свойства металла и, как следствие, размеры сварных швов и ЗТВ. Кроме того, продолжительность времени между импульсами должна быть достаточной для рассеивания металлической плазмы. В противном случае она защищает сварочную ванну от лазерного излучения и, как следствие, уменьшается глубина провара [31, 32]. Следует отметить, что многочисленное термоциклирование негативно влияет на структуру металла, способствует образованию несплошностей, высоких остаточных напряжений и деформации при сварке двух- или многофазных материалов [37–39]. Следовательно, наиболее рациональное значение OL необходимо определять с учетом этих изменений металла шва и ЗТВ.

1.2 Сварка циркониевых сплавов

К конструкционным материалам, из которых возможно изготовление ТВЭЛ и ДР, предъявляют довольно высокие требования: по коррозионной стойкости, сечению захвата нейтронов, стойкости к радиационному излучению, а также механическим свойствам при высоких температурах. Материалы испытывают влияние топлива, высокой температуры, химически агрессивной среды, все это, суммируясь, составляет исключительно тяжелые эксплуатационные условия [1, 2]. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют бериллий, магний, алюминий, нержавеющие аустенитные стали и цирконий [40].

Однако использование бериллия ограничивает его высокая стоимость из-за малого распространения руды, а также значительных трудностей производства и механической обработки. Применение алюминия и его сплавов возможно исключительно в низкотемпературных ЯР ввиду значительного снижения механических свойств и коррозионной стойкости при высоких рабочих температурах эксплуатации. Магниевые сплавы обладают низкой коррозионной стойкостью в контакте с водой под давлением. Эксплуатацию деталей ТВС из бериллия ограничивает его крайне низкая пластичность и высокая токсичность.

Наиболее широко для изготовления элементов ЯР применяются циркониевые сплавы и нержавеющие стали [5], как наиболее удовлетворяющие следующим требованиям [41]:

- 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 ТВЭЛ.

В наиболее широко распространенных ЯР на тепловых нейтронах – водородных, а также в судовых ядерных энергетических установках, работающих при температуре до 300..350 °С, используют циркониевые сплавы: Э110, Э125 и Э635 (Россия); Zircaloy-2, Zircaloy-4 и ZIRLO (США); Zr-2.5%Nb (Канада, Германия); М4 и М5 (Франция); MDA и NDA (Япония), HANA (Корея) и др. [40, 42–48].

Специфика циркониевых сплавов заключается в сильном влиянии примесей в металле на его эксплуатационные свойства [49]. В связи с этим максимальная концентрация примесей в сплавах Zr-Nb регламентируется стандартом [50], но, например, содержание широко используемого сплава Э110 (Zr-1%Nb) в большинстве случаев значительно ниже [51]. Прокат из сплава Э110 поставляется в рекристаллизованном отожженном состоянии. Он имеет микроструктуру, включающую матрицу α -Zr с выделениями Nb (размер зерен 3-4 нм) и β -Nb размером 40-60 нм. Наличие β -Zr, а также метастабильных α' -Zr и ω -Zr нежелательно, так как существенно снижа-

ет коррозионную стойкость и ухудшает другие характеристики [51]. Следует отметить, что значения предела прочности при растяжении сплавов Zr-Nb, используемых для изготовления ядерных тепловыделяющих сборок, нестабильны из-за анизотропии металла. Этот параметр также зависит даже от незначительных изменений химического и фазового состава, микроструктуры и текстуры. Допустимым диапазоном прочности на растяжение при комнатной температуре принято считать 400–800 МПа [51, 52].

При сварке плавлением протекают сложные металлургические процессы, в том числе взаимодействие с газами. Высокая концентрация водорода, кислорода, азота и углерода в металле шва ухудшает механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений. Также она способствует образованию горячих и холодных трещин [53–56].

К сожалению, опубликовано мало результатов о загрязнении циркониевых сплавов атмосферными газами при сварке. Кроме того, опубликованные данные отрывочны и иногда противоречивы. Например, образование трещин в соединении пластин Zircaloy-4, выполненных диффузионной сваркой (вакуум, 800 °С), вызывалось водородом при автоклавных испытаниях на коррозию в перегретом паре при 400 °С [57]. Основной причиной было сочетание остаточных напряжений и загрязнения металла шва водородом, кислородом и углеродом. В работе [58] исследованы швы Zircaloy-4, выполненные плазменно-дуговой сваркой и аргоно-дуговой сваркой неплавящимся электродом. Содержание кислорода, азота и водорода в металле шва соответствовало требованиям стандарта [7].

В работе [59] исследовано наводороживание сварных соединений, выполненных вакуумной электронно-лучевой сваркой. Образцы были изготовлены из Zircaloy-4 и экспериментальных сплавов циркония с различным содержанием хрома. Легирование хромом оказало негативное влияние на количество поглощенного водорода во время автоклавного испытания на коррозию из-за того, что частицы второй фазы $Zr(Fe, Cr)_2$ находились в матрице α -Zr и способствовали поглощению водорода. Образование гидридов при принудительном насыщении водородом сварных швов Zircaloy-2, выполненных с помощью CO₂-лазера, и сварных швов Zircaloy-4,

выполненных контактной сваркой, исследовалось в [59] и [60] соответственно. Однако данные о начальном содержании водорода в сварных швах не публиковались.

Помимо поглощения водорода существует проблема снижения коррозионной стойкости сварных швов [61–69], которую невозможно было улучшить даже последующей термической обработкой [61, 63, 67]. Высокая коррозионная стойкость сварных соединений была обнаружена только после электронно-лучевой сварки Zircaloy-4 [70], а также электронно-лучевой [71] и лазерной [72] сварки технически чистого циркония. Коррозионная стойкость сварных швов сплава Э110, выполненных способом GTAW, снижалась во всех исследованных случаях [61–63]. Причинами были изменения микроструктуры, остаточные напряжения и недостаточная защита зоны сварки потоками инертного газа.

В настоящее время невозможно определить, насколько сильно каждый из этих факторов влияет на коррозионную стойкость сварных швов циркониевых сплавов, из-за отсутствия полного набора данных для сравнения. В частности, во всех цитируемых публикациях [63–72] отсутствуют данные о химическом составе металлов швов, а также о свойствах поверхностных слоев швов. В то же время импульсная лазерная сварка циркониевых сплавов в камере с защитными газами также ухудшала коррозионную стойкость сварных швов [66–68].

За исключением GTAW [61–63], данных по коррозионной стойкости сварных швов из сплава Э110 в ходе проведения литературного обзора не обнаружено.

1.3 Защита зоны сварки

Обычно при лазерной сварке расплавленный металл защищается потоками инертного газа. Основными требованиями к системам подачи защитного газа являются [9–11, 16, 24–36]: эффективное снижение экранирующего действия паров металлической плазмы, полное вытеснение воздуха из зоны сварки, максимальное удаление паров и брызг, предотвращение окисления металла и образования дефектов, таких как поры, раковины, подрезы и т. д.

В связи с тем, что сплавы циркония являются химически активными, необходимо использовать газы наивысшей чистоты. В дополнение к защите сварочной

ванны большое внимание следует уделить защите корня шва и ЗТВ от окружающей среды. Однако нет четких указаний по выбору оптимальных составов защитных газов (Ar, He или их смеси) и расходов; конфигурации и угла наклона сопел, а также расстояния от сопел до зоны сварки. При этом хорошо известно, что эти параметры оказывают существенное влияние как на формирование соединений, так и на их свойства [73–87]. В работах [88–90] при импульсной лазерной сварке сплавов Zircaloy расход аргона был увеличен до 60 л/мин с целью уменьшения загрязнения металла, хотя обычно рекомендуемые расходы значительно ниже: от 15...18 л/мин [31] до 30...45 л/мин [35]. Специальная камера использовалась для защиты импульсной лазерной сварки сплавов Zircaloy [66] и сплава Zr-1,0%Sn-1,0%Nb-0,1%Fe [67, 68], но это сильно снижало производительность процесса сварки. Однако опубликованных экспериментальных данных по лазерной сварке сплавов Zr-Nb при проведении данного исследования обнаружено не было.

2 Объекты исследования

2.1 Циркониевый сплав Э110

На рисунке 2.1 приведена диаграмма состояния системы цирконий-ниобий, построенная при медленных скоростях нагрева и охлаждения.

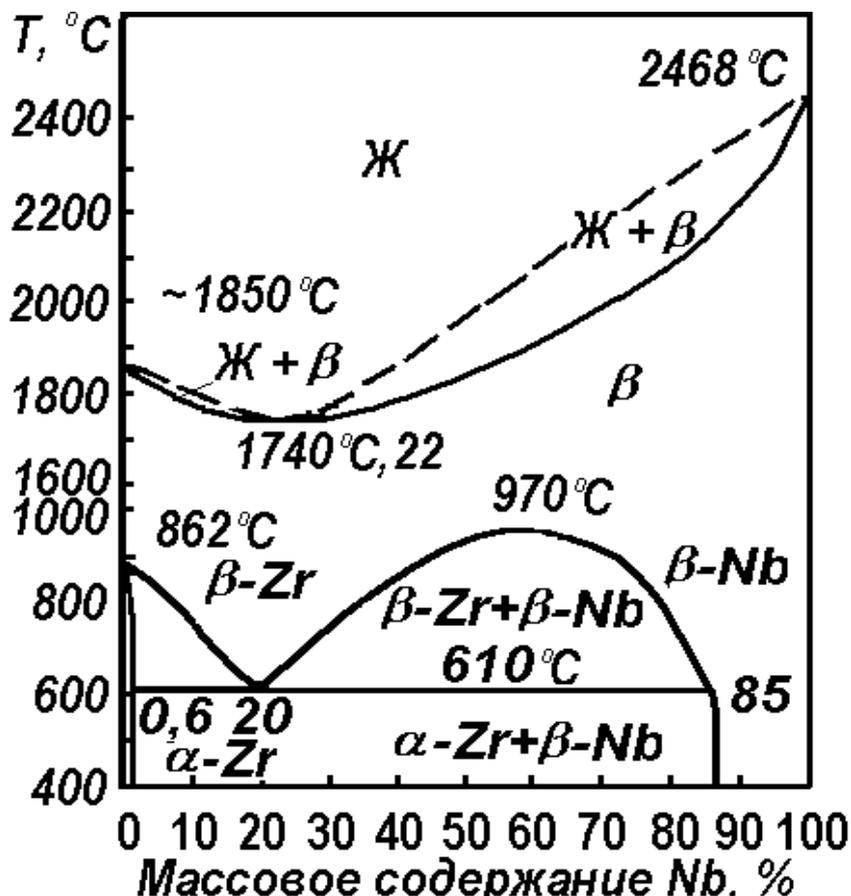


Рисунок 2.1 – Диаграмма состояния системы цирконий-ниобий [10]

При комнатной температуре бинарные сплавы циркония с массовым содержанием ниобия до 5,0%, применяемые в атомной энергетике, состоят из смеси α -твердого раствора ниобия в цирконии с гексагональной плотноупакованной решеткой и β -твердого раствора циркония (имеющего ОЦК решетку) в ниобии, с содержанием последнего $\approx 85\%$ [5]. В сплаве $Zr-1\% Nb$ основой является α -фаза, что, по текстуре и анизотропии, приближает этот сплав к чистому цирконию, который обладает анизотропией физико-механических свойств и меняет свою текстуру в процессе обработки давлением в значительной степени.

Причины, определяющие легирование циркония 1% ниобия (сплав Э110) [40, 91]:

- 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, имеющих в чистом цирконии, как кремний (до 0,4%), никель (до 0,18%), железо (до 0,3%), углерод, алюминий, титан, устраняется их вредное влияние (однако, с увеличением содержания ниобия, падает коррозионная стойкость);
- ниобий эффективно снижает долю водорода, поглощаемую циркониевым сплавом.

При изготовлении пластин из сплавов циркония, в них развивается предпочтительная ориентация, которая оказывает влияние на механические свойства и текстуру, в частности увеличивает значение предела текучести в поперечном направлении. Значительное влияние на качество изделий из сплавов циркония оказывают такие структурные показатели металла, как текстура, размер и форма зерна, дисперсность фаз, а также состояние поверхности, которое напрямую определяет коррозионную стойкость [40]. Мелкозернистость и дисперсность избыточных фаз необходима для обеспечения однородности и равномерности окисной пленки, в противном случае происходит усиление коррозионных процессов, сильное гидрирование, образование язв, а также, в худшем случае, к аварии ТВЭЛа. Содержание легирующих элементов в циркониевом сплаве Э110 приведено в таблицах 2.1 и 2.2, теплофизические свойства – в таблицах 2.3 и 2.4.

Сопротивление пластической деформации сплава Э110 составляет 260 МПа [92], удельное электросопротивление при 20 °С – $49 \cdot 10^{-4}$ Ом·м [93], твердость по Бринелю – 1500÷1700 МПа [95] (требования ТУ 95.166-98 – 1800 МПа). Толщина окисной пленки составляет от 0,05 до 0,6 мкм, а ее удельное сопротивление $190 \cdot 10^5$ Ом·м [96]. В литературных источниках приведены различные значения модуля упругости E при 20 °С: для недеформированного циркония

$E_{Zr} = 7500 \div 8400$ кг/мм² [97]; для циркония, деформированного холодной прокаткой
 $E_{Zr} = 9100 \div 10100$ кг/мм² [98].

Таблица 2.1 – Содержание легирующих элементов в сплаве Э110 [94]

Элемент	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>Cu</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ca</i>	<i>Cr</i>	<i>F</i>
Содержание, %	0,07	0,006	0,003	0,004	0,021	0,11	0,03	0,002	0,0009

Таблица 2.2 – Содержание легирующих элементов в сплаве Э110 [93, 99]

Элемент	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>C</i>	<i>Ca</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>
Содержание, %	0,054	0,003	0,017	0,01	0,012	0,004

Таблица 2.2 – Продолжение

<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>F</i>	<i>Cu</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>
0,0054	0,005	0,003	0,0013	0,003	0,012

Таблица 2.3 – Теплофизические свойства сплава Э110 [94, 100]

Температура, °С	20	350	380	420
σ_B , МПа	372 (306 [54])	196	182	174
$\sigma_{0,2}$, МПа	294	159	143	142
σ_T , МПа	204 [54]			
δ , %	32±2 (28 [54])	38±3	40	40

Таблица 2.4 – Теплофизические свойства сплава *Zr* – 1% *Nb* [40]

Температура, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Удельное электросопротивление ρ , 10 ⁻⁴ Ом·м	43,9	54,7	73,0	86,1	97,2	108,2	113,4	119,2	122,3
Теплопроводность λ , Вт/(м·град)	17,2	18,0	19,3	20,1	20,5	20,9	21,8	22,9	---
Теплоемкость <i>C</i> , кДж/(кг·град)	---	0,285	0,301	0,322	0,343	0,398	0,448	---	---
Коэффициент линейного расширения α , 10 ⁻⁶ 1/град	5,8	6,0	6,2	6,3	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2

2.2 Аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2

Установка включает твердотельный Nd:YAG лазер с блоками питания и охлаждения, оптическую систему с силовым и визуальным каналами и регулируемым положением по высоте (оси Z) относительно предметного стола, а так же пульт управления, газо-пневмосистему и педаль управления. Внешний вид аппарата представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2

Для визуального контроля за зоной обработки используется телевизионная система наблюдения с ТВ-монитором. Обрабатываемое изделие размещается на рабочем столе и перемещается относительно неподвижного светового пятна излучения в X-Y плоскости. Излучатель и оптическая система может перемещаться в вертикальном Z-направлении с помощью ручного или автоматизированного привода.

В установке предусмотрена автоматизированная подача защитных или вспомогательных газов в зону обработки с помощью гибких шлангов с соплами, что обеспечивает защиту фокусирующей оптики и улучшает качество сварного шва.

Энергия, частота повторения и длительность импульса могут варьироваться в широких пределах, что обеспечивает обширный диапазон режимов сварки.

Установка управляется с микропроцессорного пульта управления, обеспечивающего задание параметров лазера и управление приводами оснасток и вращателей. Основные технические характеристики аппарата представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики ЛТА 4-2 [101]

Наименование параметров	Значение
Параметры лазера	
Тип лазера	Импульсный Nd:YAG
Длина волны излучения, мкм	1,064
Частота следования импульсов, Гц	0,1 .. 50,0
Длительность импульса, мс	0,5 .. 20,0
Максимальная средняя мощность излучения, Вт	до 250
Максимальная энергия в импульсе излучения, Дж	до 50
Ток в лампах накачки, А	30 .. 510
Параметры оптической системы	
Фокусное расстояние силового объектива, мм	100
Рабочий диапазон длин волн объектива, мкм	1,064 и 0,520
Размер пятна излучения в зоне обработки, мм	0,3-2,0
Технологические особенности:	
Диапазон устанавливаемых скоростей сварки, мм/сек	0,1 .. 10,0
Автоматизированная или ручная подача газа или воздуха в зону сварки	

3 Расчеты, аналитика и методика эксперимента

Исследованы стыковые сварные соединения двух одинаковых пластин из сплава Э110 толщиной 0,5 мм (образцы для испытаний на растяжение 240x50 мм, для всех остальных испытаний – 100x24 мм).

Кромки заготовок для обеспечения минимального зазора обрабатывали на фрезерном станке с ЧПУ, а также непосредственно перед сваркой тщательно обезжировали ацетоном. Угол между лазерным лучом и заготовками составлял 90°. Диаметр сфокусированного пучка d составлял 0,95 мм. Зона сварки была защищена от атмосферы с обеих сторон соплами диаметром 10 мм (рисунок 3.1)

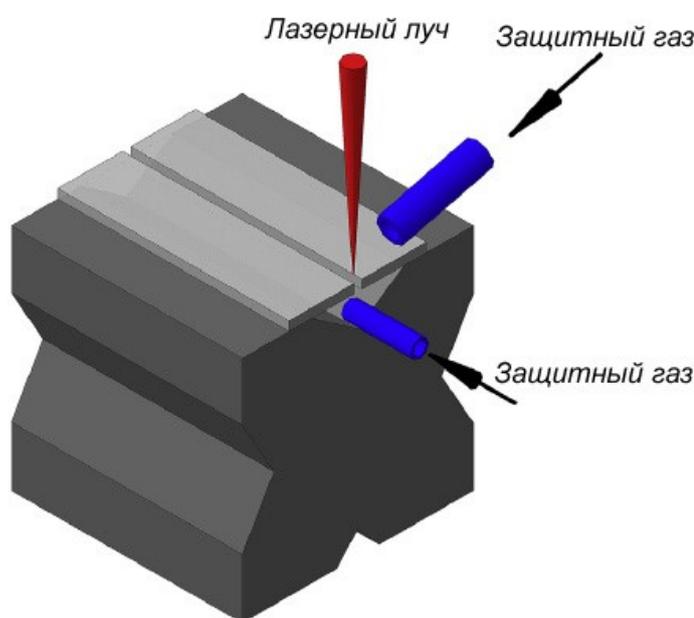


Рисунок 3.1 – Схема процесса лазерной сварки

Использовался аргон высшего сорта чистотой >99,993%. Скорость потока газа составляла 60 л/мин, как и в работах [88–90], хотя обычные рекомендуемые диапазоны значений значительно меньше: от 15–18 л/мин [32] до 30–45 л/мин [35].

Первоначально параметры сварки были определены экспериментально, с учетом отсутствия дефектов при визуальном контроле [102]. Затем были обоснованы еще девять режимов с учетом возможности настройки лазерной установки. Использовали три комбинации параметров при прочих равных условиях, все режимы сварки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Базовые параметры лазера

№ режима	I, А	τ , мс	E, Дж	V, мм/с.	D, мм	f, Гц	P_{peak} , кВт	P_{ave} , Вт	$PO_{расч}$
1	90	14	8,68	0,88	0,95	3	0,62	26,03	0,69
2	100		10,88	1,12			0,78	32,64	0,61
3	110		12,86	1,35			0,92	38,57	0,53
4	120		14,95	1,49			1,07	44,84	0,48
5	100	10	8,12	1,12	0,95	3	0,81	24,36	0,61
6		12	9,50				0,79	28,50	0,61
7		16	12,26				0,77	36,78	0,61
8	100	14	10,88	1,12	0,95	5	0,78	54,40	0,76
9			7			0,78	76,16	0,83	
10			9			0,78	97,92	0,87	

Скорость сварки V , также как и энергия импульса E изменялась путем варьирования тока I в лампах накачки (длительность импульса и частота не регулировались) для определения возможности увеличения производительности, благодаря повышению объема сваренного металла за один импульс (режимы 1, 2, 3, 4).

Длительность импульса τ варьировали для определения влияния периода воздействия лазерного излучения на свойства сварных соединений. Энергия импульса E также менялась из-за особенностей лазерной установки, несмотря на одинаковые значения тока I в лампах накачки. Скорость сварки V и частота f были одинаковыми (режимы 5, 6, 2, 7).

Частота импульсов f изменялась при постоянной скорости сварки V для определения наиболее эффективного коэффициента перекрытия OL . Энергия импульса не изменялась за счет постоянных значений тока I в лампах накачки и длительности импульса τ (режимы 2, 8, 9, 10).

Образцы для механических испытаний вырезали на фрезерном станке в соответствии с требованиями стандарта [103] (рисунок 3.2, таблица 3.2). Механические испытания проводили на установке МИРИ-100К со скоростью нагружения 1 мм/мин.

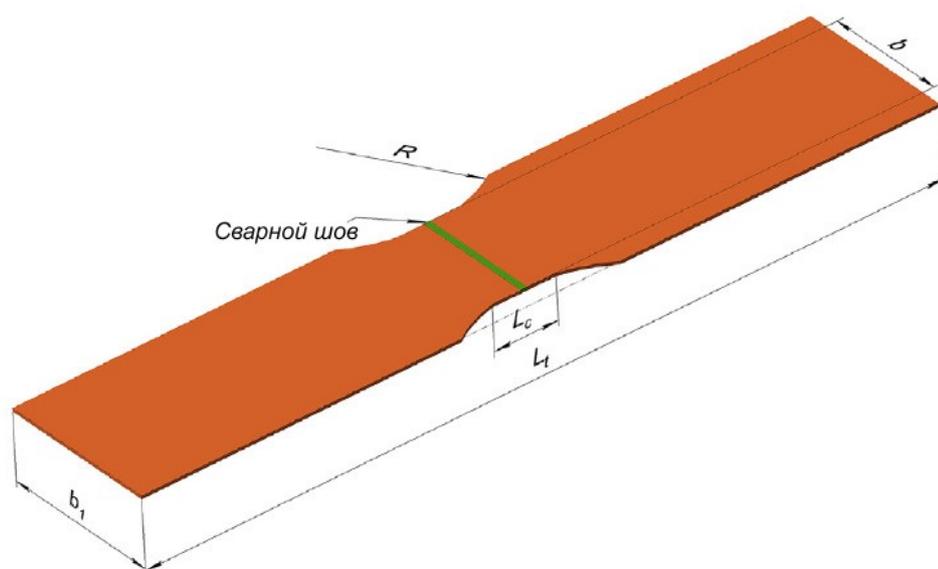


Рисунок 3.2 – Образец для проведения механических испытаний

Таблица 3.2 – Размеры испытательных образцов [103]

Наименование размера	Символ	Размер, мм
Общая длина	L_t	250
Ширина захватной части	b_1	50
Ширина рабочей части	b	$38 \pm 0,25$
Длина рабочей части	L_c	$\geq L_s + 12$
Радиус перехода от рабочей части образца к захватной	r	≥ 25

Микротвердость определяли на микротвердомере HVS-1000 в соответствии с требованиями стандартов [104, 105]. Расстояние между отпечатками 100 нм, нагрузка 100 г, время выдержки 10 с.

Сваренные образцы были разрезаны на несколько частей поперек шва для последующих испытаний. По одному образцу для каждого режима длиной 10 мм облучали импульсным ионным ускорителем. После этого облученные образцы разрезали поперек шва на две примерно равные части длиной 5 мм для последующих автоклавных коррозионных испытаний и высокотемпературного окисления в паре. Аналогичным образом были испытаны и необлученные образцы. Их длина составляла 40 мм для автоклавной коррозии и 5 мм для высокотемпературного окисления в паре.

При испытаниях на коррозию внутренние части статического автоклава промывали дистиллированной водой и протирали спиртом непосредственно перед за-

грузкой образцов и началом коррозионных испытаний. Каждый образец обезжиривали, промывали в горячей дистиллированной воде и промывали спиртом. Подготовленные к испытаниям образцы помещали в автоклав на вешалках (проволока из циркониевого сплава), которые промывали дистиллированной водой и протирали чистой безворсовой тканью, смоченной этиловым спиртом.

Испытание проводилось в воде при температуре 360 ± 6 °С и давлении $19,6 \pm 1,96$ МПа, что соответствует условиям эксплуатации ядерного топлива. Использовали бидистиллированную воду (кислотность 5,4...7,0 рН, удельная электропроводность $\geq 5 \cdot 10^{-4}$ С/м при температуре 25 °С). Образцы находились в воде в течение всего испытательного периода (200 ч).

Образцы для металлографии готовили стандартными методами шлифовки и последующей полировки. Для травления использовали раствор состава: H₂O (20 мл), 20 %-ый раствор NH₄F (30 мл) и HNO₃ (50 мл).

Поверхности и поперечные сечения изучались с помощью оптических микроскопов Olympus SZ-61 и Olympus GX-51. Сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6000PLUS (SEM) использовался для изучения поперечных сечений и фрактографии поверхностей после разрушения при механических испытаниях, а также для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS-анализ).

4 Результаты проведенного исследования

Зависимости ширины шва, а также предела прочности соединений от параметров сварки представлены на рисунках 4.1-4.3. Качественно они совпадают с указанными в [15, 16, 35, 36]. В диапазоне исследованных значений одновременное увеличение энергии импульса и скорости сварки приводит к линейному увеличению ширины шва и равномерности глубины проплавления (рисунок 4.1).

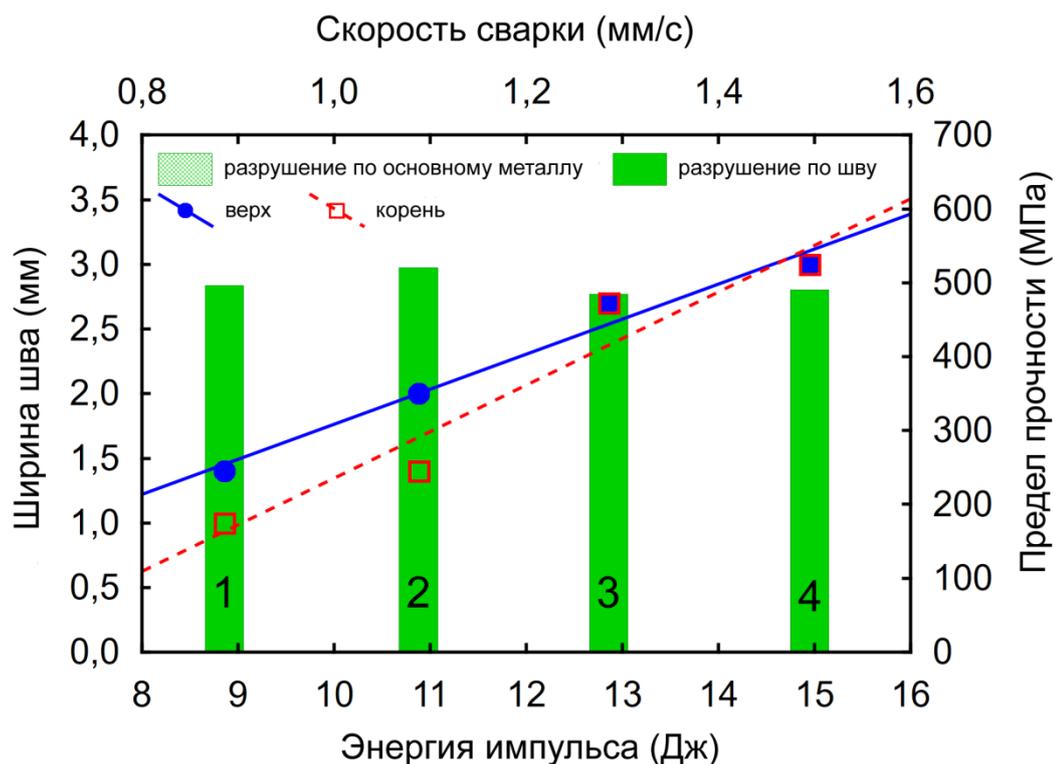


Рисунок 4.1 – Зависимость ширины шва и предела прочности от энергии импульса и скорости сварки (режимы 1, 2, 3, 4 таблица 3.1)

Одновременное увеличение длительности импульса и его энергии не влияет на ширину шва с верхней стороны, но равномерность проплавления снижается за счет потерь тепла в основном металле по теплопроводности (рисунок 4.2).

Увеличение частоты импульса также не влияет на ширину шва с верхней стороны, но равномерность проплавления по глубине увеличивается за счет более высокой остаточной температуры между импульсами (рисунок 4.3).

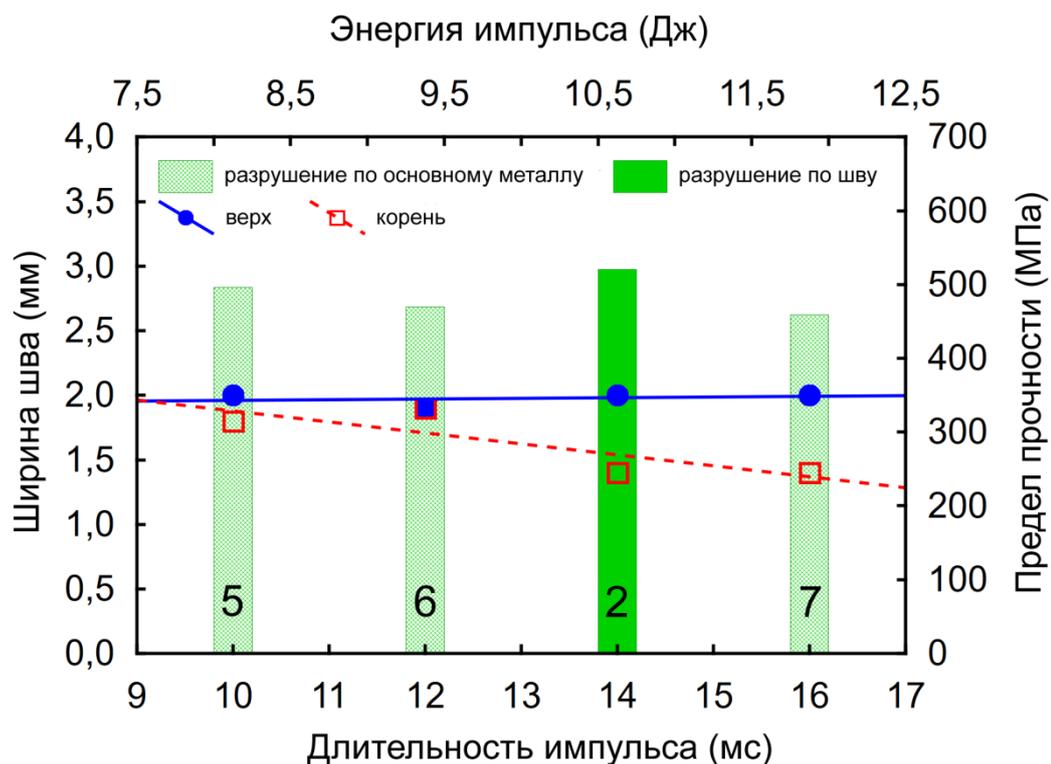


Рисунок 4.2 – Зависимость ширины шва и предела прочности от длительности импульса и энергии импульса (режимы 5, 6, 2, 7 таблица 3.1)

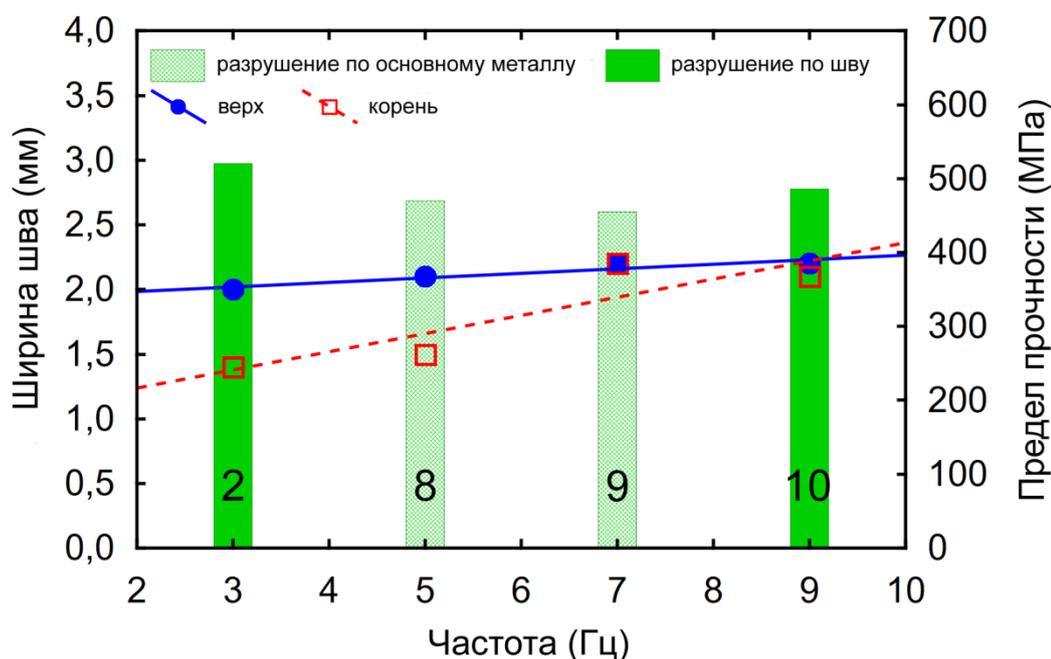
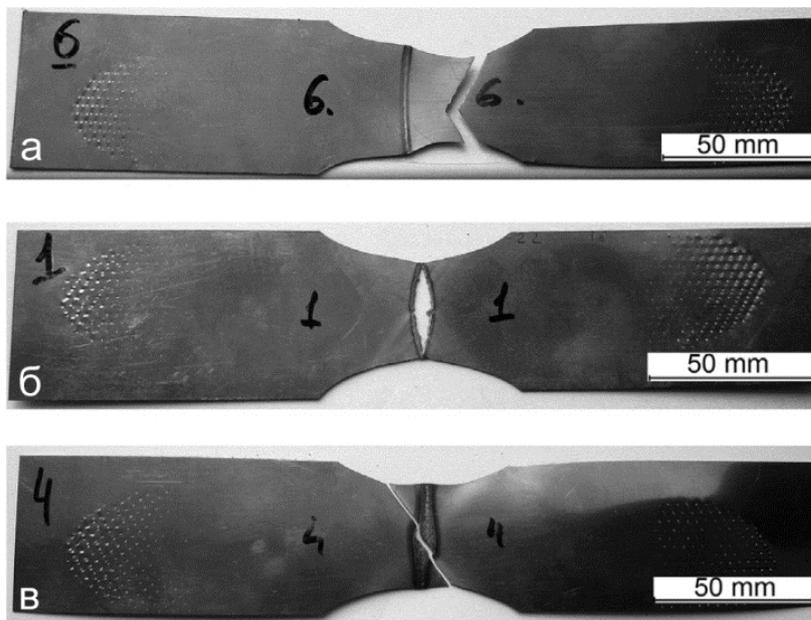


Рисунок 4.3 – Зависимость ширины шва и предела прочности от частоты (режимы 2, 8, 9, 10 таблица 3.1)

Следует отметить отсутствие зависимости между параметрами сварки и пределом прочности соединений во всех исследованных случаях.

Пять образцов разрушились по основному металлу (режимы 5, 6, 7, 8 и 9, рисунок 4.4а), а остальные пять по швам: по оси шва – для режимов 1 и 2 (рисунок 4.4б), через шов и основной металл для – режимов 3, 4 и 10 (рисунок 4.4в).



а – по основному металлу; б – по оси шва; в – через шов и основной металл

Рисунок 4.4 – Типы разрушений образцов при испытании на прочность (режимы 5, 6, 2, 7 таблица 3.1)

Значения предела прочности для образцов, разрушенных по швам (486-520 МПа), несколько выше, чем для образцов, разрушенных по основному металлу (455-496 МПа), но все они находятся в пределах допустимых значений [51, 52]. Вероятнее всего, по аналогии с титановыми сплавами [16], такой тип разрушения связан с насыщением металла газами из атмосферы. Двусторонняя защита зоны сварки и повышенные расходы аргона высокой чистоты не предотвратили загрязнения металла. Это предположение подтверждается темными цветами побежалости вдоль швов (рисунок 4.4в) и результатами спектрального анализа металла сварного шва после разрушения при испытании на растяжение (таблица 4.1). Содержание кислорода до 61,5% по массе, азота до 8,81% по массе.

Таблица 4.1 – Химический состав сварного шва после испытаний на растяжение в соответствии со спектральным анализом

№ режима	Элемент (массовые %)			
	Zr	Nb	O	N
1	31,65	0,98	61,50	5,86
2	82,83	1,10	12,01	4,06
3	75,06	1,08	18,84	5,01
4	63,83	1,44	25,92	8,81
10	88,05	0,75	8,87	2,33

Сведения о наличии дефектов сварных соединений сведены в таблицу 4.2, примеры приведены на рисунке 4.5. Часть дефектов выявлена при повышенных значениях тепловложения (режимы 3, 4, 7, 8, 9 и 10). При больших значениях энергии импульса (режимы 3 и 4) помимо загрязнения газами наблюдалось разбрызгивание в корне шва (рисунок 4.5а).

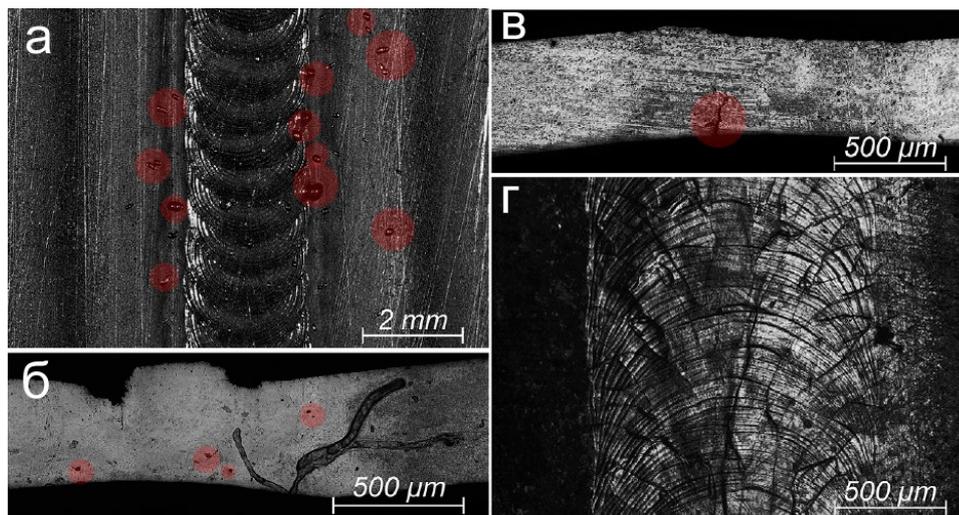
Таблица 4.2 – Дефекты в сварных швах

Тип дефекта	Режим									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Разбрызгивание в корне шва			+	+						
Локальные подрезы								+		
Газовые поры и раковины								+		
Продольные трещины	+									+
Ветвящиеся трещины	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

На поперечном сечении шва, выполненного по режиму 8, также обнаружены локальные прерывистые подрезы, газовые поры и раковины (рисунок 4.5б). Наиболее вероятной причиной этого факта была плохая подгонка и повышенный расход защитного газа при сварке [16, 35, 36]

Основной проблемой импульсной лазерной сварки сплава Э110 по предлагаемым режимам было наличие микротрещин, увидеть которые можно только с помощью микроскопа. Выявлены продольные микротрещины по краям шва и в центре шва (режим 10, рисунок 4.5в). Основной причиной образования трещин по обеим сторонам шва при использовании режима 1 является малый объем расплавленного металла из-за чрезвычайно низкой энергии импульса. Особенности лазерной сварки являются очень высокая скорость охлаждения металла и узкая зона, в которой возможна пластическая деформация. При количестве подводимой энергии меньше оптимального диапазона значений скорость охлаждения превышает допу-

стимый предел и формируется хрупкая закаленно-мартенситная структура с чрезвычайно высокими остаточными напряжениями.

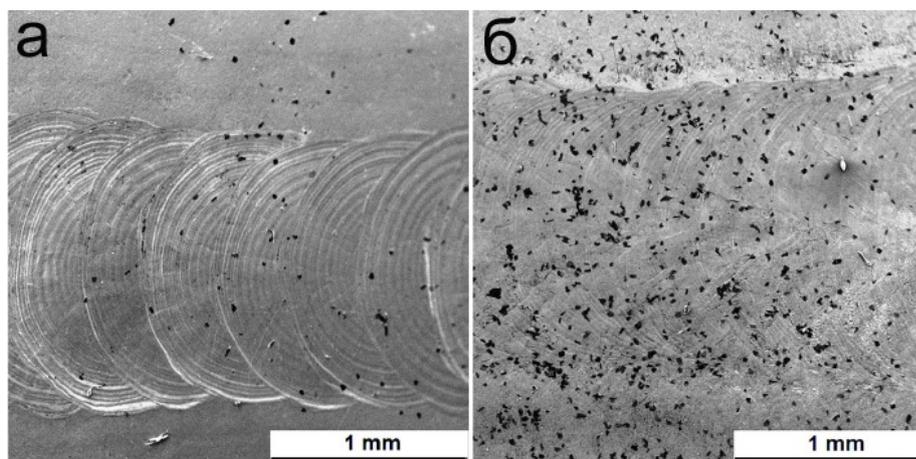


а – разбрызгивание; б – поры, раковины и подрезы; в – продольные трещины; г – разветвленные трещины.

Рисунок 4.5 – Типичные дефекты сваренных образцов

На всех сварных швах также были обнаружены разветвленные поверхностные микротрещины, которые можно увидеть только под микроскопом. Наиболее типичный пример показан на рисунке 4.5г.

При исследовании поверхности электронным микроскопом были обнаружены темные включения, причем их количество значительно увеличивалось с ростом тепловложения (рисунок 4.6).



а – режим 5; б – режим 8 (таблица 3.1)

Рисунок 4.6 – Поверхность швов

Поверхностные включения представляли собой химические соединения, в которых циркония было всего несколько процентов, а ниобия – сотые доли процента. Химический состав черных поверхностных включений (зона 005 рисунок 4.7): 7,39 % циркония, 0,03 % ниобия, 17,53 % кислорода, 25,92 % азота и 49,13 % углерода. Меньшие белые (зона 006 рисунок 4.7) содержали 5,06% циркония, 0,06% ниобия, 29,49% кислорода, 19,82% азота и 45,57% углерода.

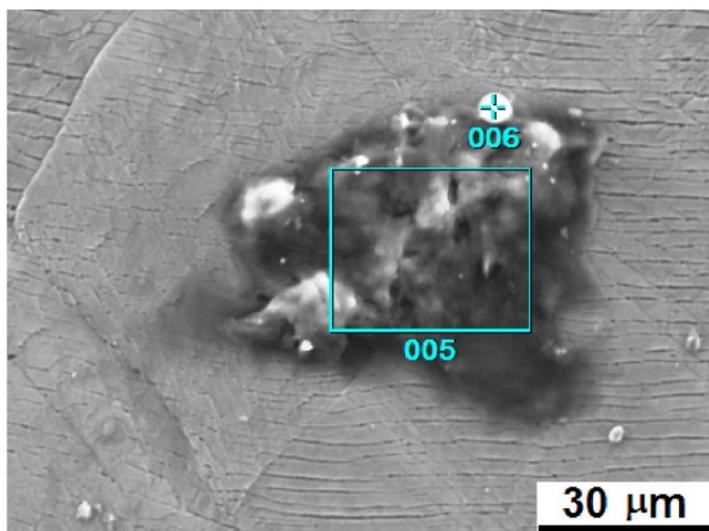
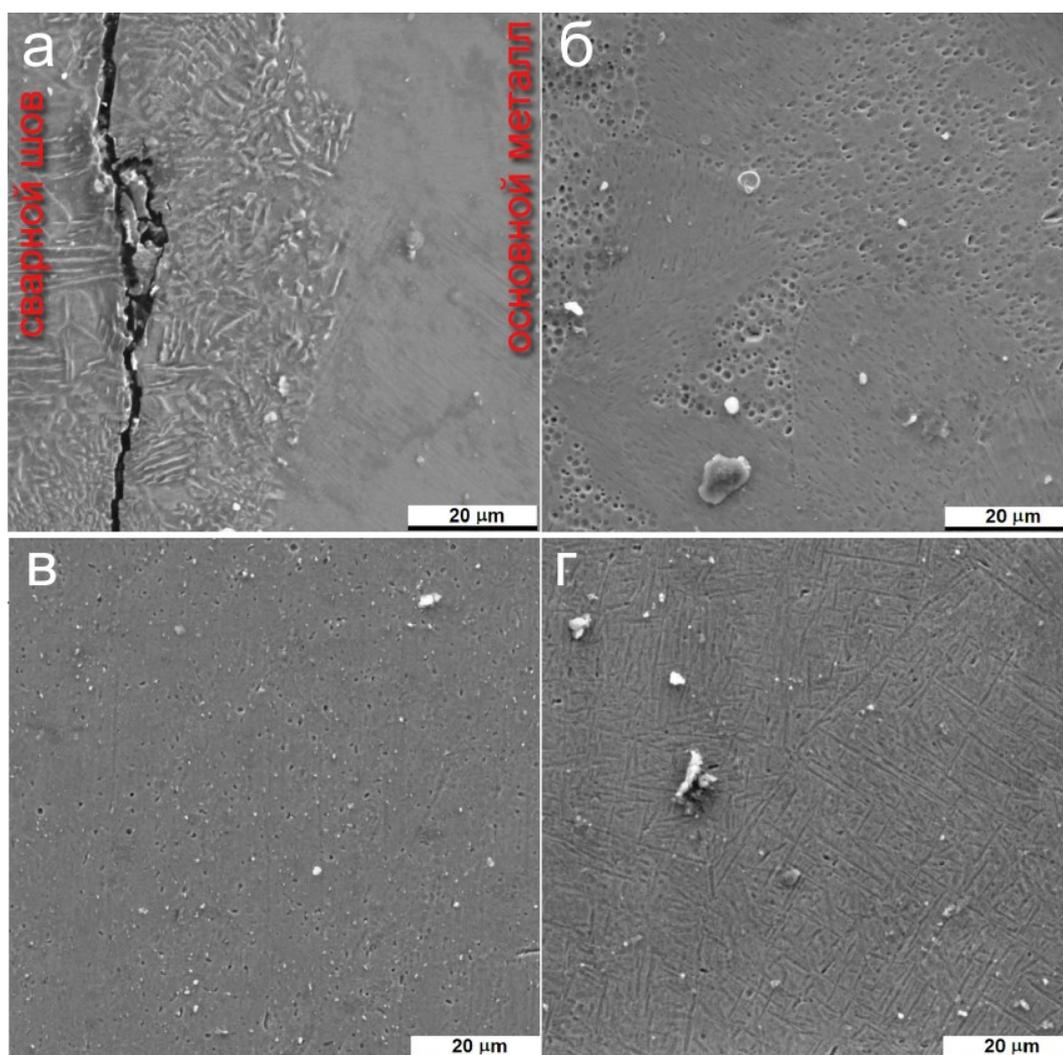


Рисунок 4.7 – Области анализа включений

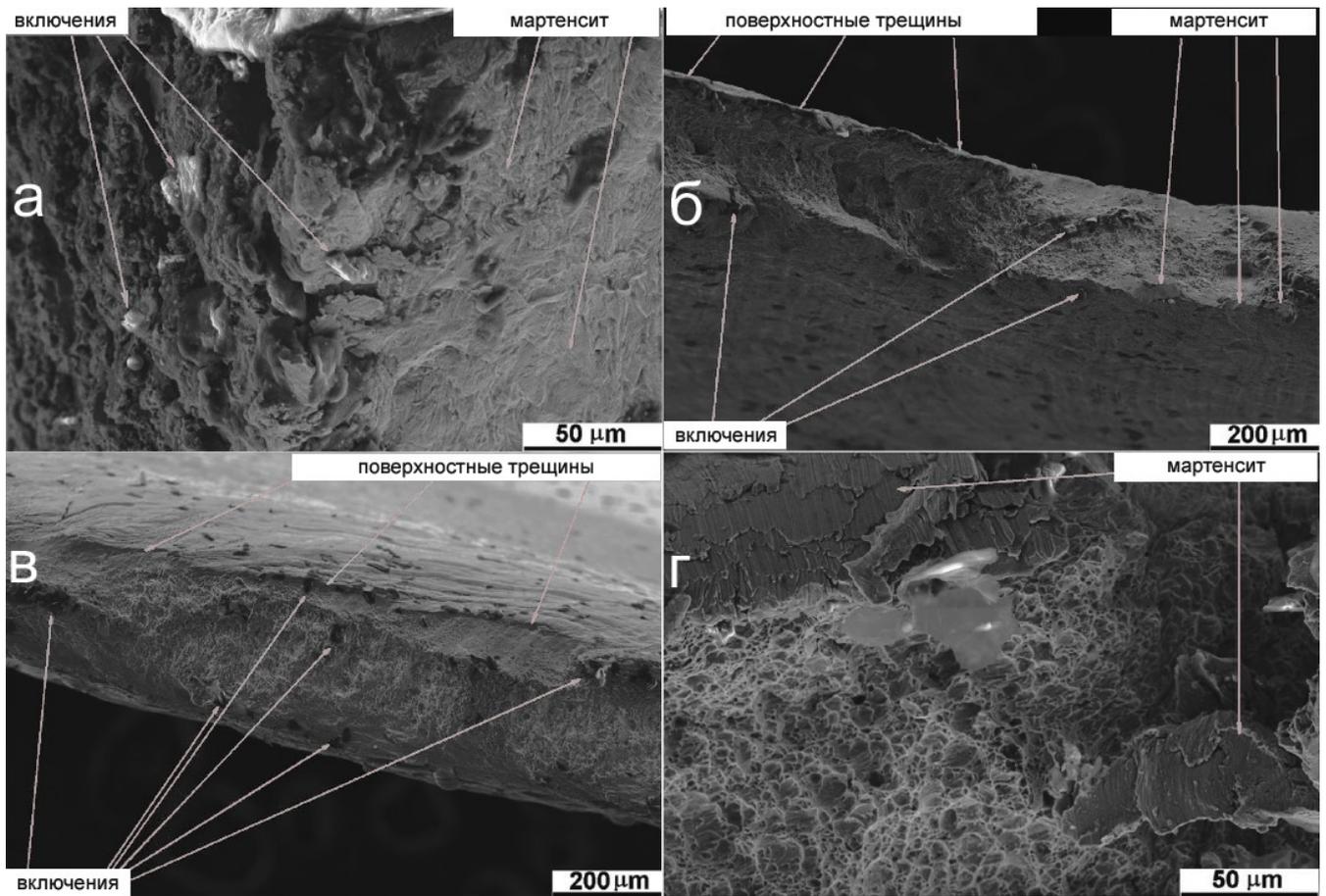
Микроструктура металла шва представлена на рисунке 4.8. При сварке по режиму 1 микроструктура в основном состояла из хрупкой закалочной мартенситной α' -фазы, имеющей игольчатую структуру и высокую микротвердость (рисунок 4.8а). Кроме того, были выявлены продольные микротрещины по обеим кромкам шва. Они образовались из-за очень малого объема расплавленного металла вследствие чрезвычайно малой энергии импульса. К этим дефектам привели сверхвысокая скорость охлаждения и узкие зоны возможной пластической деформации. Изменение параметров сварки в сторону увеличения погонной энергии привело к формированию пластинчатой микроструктуры (режим 2, рисунок 4.8б). Более рациональный подвод тепла позволил получить микроструктуру металла шва, соизмеримую с основным металлом (режим 5, рисунок 4.8в). При увеличении погонной энергии микроструктура металла шва имела типичную морфологию так называемого корзиночного плетения (режим 10, рисунок 4.8г).



а – режим 1; б – режим 2; в – режим 5; г – режим 10.

Рисунок 4.8 – Микроструктура сварных швов

Для более полного понимания влияния энергетических параметров на свойства сварных соединений, на электронном микроскопе также были рассмотрены фрактограммы поверхностей излома образцов, разрушенных по металлу шва (рисунок 4.9). Разрушение всех этих сварных швов было вязко-хрупким. Концентраторами напряжений были мартенситные пластины, поверхностные микротрещины и химические включения. Эти включения распространились по всему объему металла шва из-за многочисленных термоциклирований, многократно переплавляющих и перемешивающих ранее образованные участки шва.



а – режим 1; б – режим 3; в – режим 4; г – режим 10.

Рисунок 4.9 – Фрактограммы образцов

Образцы после коррозионных испытаний показаны на рисунке 4.10. Оксидная пленка на основном металле была черной (характерно для защитного высокопрочного слоя ZrO). Однако все сварные швы были покрыты слоем светлого цвета (характерно для рыхлого ZrO_2). На толщину оксидных слоев влиял алгоритм подвода тепла.

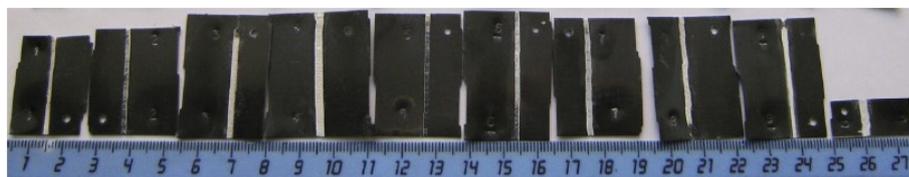


Рисунок 4.10 – Образцы после коррозионных испытаний

Увеличение энергии импульса в исследованном диапазоне вызывает увеличение скорости поглощения водорода. Увеличение длительности импульса снижало как начальное содержание водорода в сварных швах, так и скорость поглощения во-

дорода. Выраженных зависимостей между частотой импульсов и начальным содержанием водорода в сварных швах, а также скоростью его поглощения не обнаружено.

Согласно полученным результатам испытаний можно сформулировать основные закономерности формирования сварных соединений из сплава Э110, по полученным режимам. Общее количество загрязнений газами составляло более 50% во всех исследованных случаях. Поглощенные газы частично трансформировались во включения размером до нескольких десятков микрометров, представляющие собой сложные химические соединения с преобладанием кислорода, азота и углерода, причем увеличение погонной энергии при сварке за счет повышения энергии импульса или частоты приводило к росту плотности включений на единицу площади поверхности.

Морфология и глубина поверхностных микротрещин на швах, образовавшихся вдоль и внутри границ зерен, а также низкое содержание водорода в металле шва позволили отнести их к трещинам горячего затвердевания. Факторов, вызывающих их появление, много: химический состав и структура сплавов, размер зерен, погонная энергия при сварке и др. В исследованном случае основными причинами были загрязнение металла шва и его многократный повторный нагрев. Микротрещины обнаруживались одновременно со значительным уровнем загрязнения поверхностного слоя металла газами для всех исследованных режимов сварки.

Во всех исследованных случаях связи между энергетическими параметрами сварки и пределом прочности сварных соединений при растяжении не выявлено.

Известно, что поглощение водорода металлами представляет собой многофазный процесс, включающий адсорбцию, растворение и диффузию. Наличие оксидного слоя ZrO на поверхности циркониевых сплавов является существенным барьером, защищающим металл от воздействия окружающей среды, в том числе от поглощения водорода. Однако любые поверхностные дефекты этого слоя (в том числе трещины) снижают защитные свойства. Дефекты поверхности, остаточные напряжения, наличие мартенситных фаз и химические загрязнения также значительно ухудшают коррозионную стойкость циркониевых сплавов. К сожалению, все иссле-

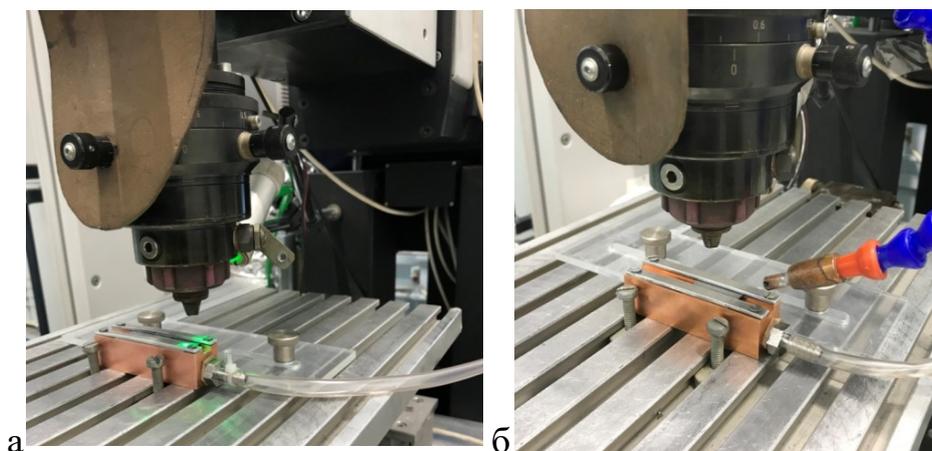
дованные швы имели эти дефекты и, как следствие, снижение коррозионной стойкости.

Так как все вышеперечисленное явно указывает на изъяны в схеме защиты процесса лазерной сварки от окружающей среды, было решено провести новую серию экспериментов, направленную на определение оптимального способа подачи защитного газа. Основными регулируемыми параметрами при данных исследованиях являлись расход аргона и схема защиты, представленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Режимы защиты процесса лазерной сварки

№ п/п	Схема защиты	Сопло		Корень		Боковая	
		Защитный газ	Расход, л/мин	Защитный газ	Расход, л/мин	Защитный газ	Расход, л/мин
1	схема 1	Ar	12	Ar	8	-	
2			16		10		
3			20		12		
4			24		14		
5	схема 2		12		8	Ar	12
6			16		10		16
7			20		12		20
8			24		14		24

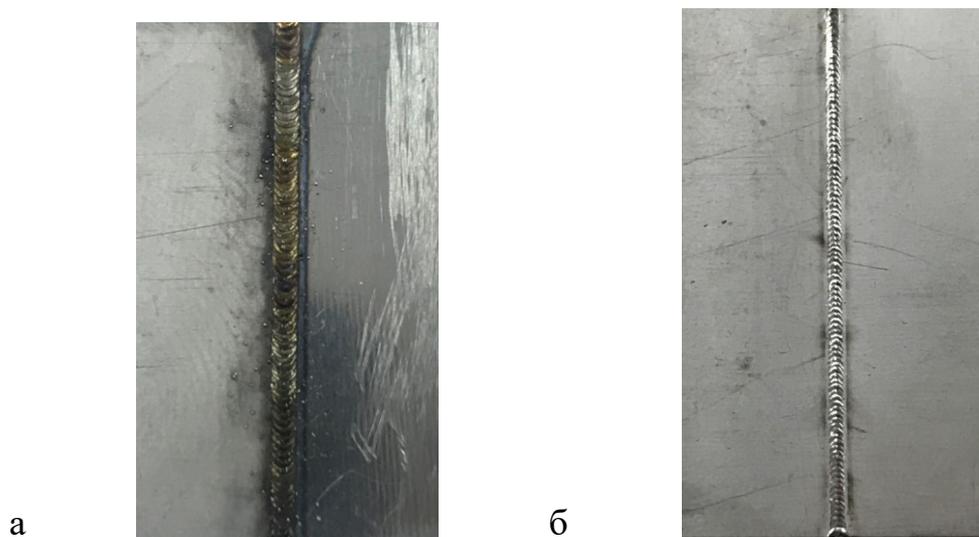
Первая схема защиты осуществлялась следующим образом: к заводской схеме, при которой газ подается в сопло аппарата, добавили струйную защиту корня шва с помощью подачи газа через отверстия медной формирующей подкладки (рисунок 4.11а). Во второй помимо добавления подкладки, добавили боковую защиту обдувом остывающей части шва, через гибкую насадку (рисунок 4.11б).



а – схема 1; б – схема 2;

Рисунок 4.11 – Предложенные схемы защиты

При использовании схемы 1, при визуальном осмотре наблюдались те же дефекты, что и в предыдущей серии экспериментов: цвета побежалости, значительное разбрызгивание в корне шва, поверхностные трещины (рисунок 4.12а). На образцах с применением схемы 2 по режимам 5 и 6 (рисунок 4.12.б, таблица 4.3) путем осмотра в оптический микроскоп указанных дефектов не наблюдалось. Дальнейшее увеличение расхода на режимах 7, 8 по всей видимости привело к турбулентному потоку газа и вышеперечисленные дефекты наблюдались даже в большем объеме, чем по схеме 1.



а – режим 1; б – режим 6 (таблица 4.3)

Рисунок 4.12 – Образцы, полученные с применением новых схем защиты

Для окончательного понимания механизмов образования дефектов при лазерной сварке циркониевого сплава Э110, требуется повторное исследование бездефектных образцов по методике, рассмотренной в ВКР. Кроме того, должны быть определены наиболее рациональные составы защитных газов (Ar, He или их смесь) и расходы, конфигурацию и угол наклона сопел, а также расстояние от сопел до зоны сварки, чтобы свести к минимуму загрязнение металла атмосферными газами. Это будет являться дальнейшим направлением исследований по рассматриваемой теме.

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

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ01	Елкин Максим Александрович

Школа	Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности	Отделение	Отделение электронной инженерии
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	- Примерный бюджет проекта – 368452,08 руб.; - В реализации проекта задействованы: научный руководитель и инженер (магистрант).
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 - Минимальный размер оплаты труда (на 2022 год) составляет 13 890 руб.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	- Отчисления по страховым взносам 27,1% от ФОТ; - Накладные расходы 16%; - Районный коэффициент 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения проектной работы с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.	- Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование; - Анализ конкурентных технических решений; - SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета проектной работы.	- Планирование выполнения работ по проекту; - Расчет бюджета затрат на проектирование; - Составление сметы затрат на основное электрооборудование рассматриваемого объекта.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.	- Описание потенциального эффекта

Перечень графического материала:

1. Календарный план-график выполнения проекта (Диаграмма Ганта).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.01.2022
-------------------------------------------------------------	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская М.В.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ01	Елкин Максим Александрович		

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Объектом исследования является разработка технологии лазерной сварки циркониевого сплава Э110, применяемого в атомной промышленности при изготовлении тепловыделяющих сборок, а также при изготовлении полупроводниковых приборов. Основная задача работы заключается в разработке технологии получения стыкового соединения пластин из вышеуказанного сплава.

Цель данного раздела – анализ конкурентоспособности и ресурсоэффективности технологии лазерной сварки циркониевого сплава Э110, а также расчёт бюджета проведённого исследования, определения ресурсной, финансовой и бюджетной эффективности исследования.

5.1 Предпроектный анализ

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода.

В качестве критериев, по которым будет производиться сегментирование рынка, целесообразно выбрать размер компании и выпускаемую продукцию. Карта сегментирования рынка представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Карта сегментирования рынка

		Выпускаемая продукция	
		ТВС	Полупроводниковые приборы
Размер компании	Крупные		
	Средние		
	Мелкие		

 НЗХК	 АО «ЗПП»	 Элемаш	 НЗПП с ОКБ
----------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------

Как видно из таблицы 5.1, наиболее перспективным сегментом в отраслях производства ТВС и полупроводниковых приборов для формирования спроса является сегмент мелких и средних предприятий, так как в нем конкуренция более низкая. Это будет являться основным направлением развития нашей технологии на начальном этапе.

В будущем, после того, как технология себя зарекомендует, привлекательным рынком для нашей технологии будут являться крупные предприятия.

5.1.2 Анализ конкурентных решений и технология QuaD

Поскольку рынок в современном мире динамичен и новые конкурентные технологии появляются и занимают лидирующие места, для любого научного исследования необходим анализ этих конкурентных технологий, существующих в данный момент времени.

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам. В настоящий момент единственным конкурентом разрабатываемой в данной работе технологии является контактная точечная сварка.

Установка контактной сварки, используемой для производства в атомной промышленности, является уникальной и дорогостоящей, к тому же ее цена растет пропорционально требуемой мощности. Помимо высокой стоимости самой установ-

ки, к источнику питания, в случае серийного производства, необходимо приобретение дополнительного робота. Разрабатываемая технология лишена данных недостатков и может осуществляться на стандартном, относительно недорогом оборудовании. Однако технология контактной сварки отработана и применяется долгое время, лазерная сварка же далека от внедрения.

Сварка циркониевых пластин возможна также электронно-лучевой сваркой, но данный способ не применим относительно готовых изделий ТВС, так как требует наличия вакуумной камеры, которая может быть использована рационально, только при малых размерах изделий. Рассмотрим данный способ, как второго конкурента разрабатываемой технологии.

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

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности	0,3	5	4	3	1,5	1,2	0,9
2.Удобство в эксплуатации	0,1	4	4	2	0,4	0,4	0,2
3. Безопасность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
4. Простота эксплуатации	0,1	4	3	2	0,4	0,3	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
5. Цена	0,2	4	4	1	0,8	0,8	0,2
6. Срок выхода на рынок	0,1	3	5	1	0,3	0,5	0,1
7.Финансирование научной разработки	0,1	3	5	3	0,3	0,5	0,3
Итого:	1	27	28	16	4,1	4,0	2,3

где B_{ϕ} – технология, разрабатываемая в ходе исследовательской работы;

$B_{к1}$ – технология контактной точечной сварки.

Таким образом, на основании таблицы 5.2 можно сделать вывод, что технология лазерной сварки, разрабатываемая в ходе исследовательской работы, может составить серьезную конкуренцию применяемой в настоящее время контактной стыковой сварке циркониевых сплавов. Главными преимуществами данной технологии является повышение производительности, безопасность и простота эксплуатации.

Технология лазерной сварки должна соответствовать таким критериям, как:

- Безопасность – возможность выполнения сварного соединения и его контроля, без существенного риска получения травмы рабочего;
- Повышение производительности – уменьшение трудовых затрат на единицу производимого продукта;
- Простота эксплуатации – легкая обучаемость персонала работе на оборудовании.
- Удобство в эксплуатации – заключается в отсутствие дополнительной оснастки при работе с оборудованием и легкость в работе.

Таблица 5.3 – Оценочная карта по технологии QuaD

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
1	2	3	4	5	
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Безопасность	0,1	90	100	0,90	9
Повышение производительности	0,3	100	100	1,00	30
Простота эксплуатации	0,1	90	100	0,90	9
Удобство в эксплуатации	0,1	90	100	0,90	9
Экономические критерии оценки эффективности					
Цена	0,2	90	100	0,90	18
Срок выхода на рынок	0,1	70	100	0,70	7
Финансирование научной разработки	0,1	70	100	0,70	7
Итого	1	600	700	6,00	89

По технологии QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по сто балльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле [4]:

$$P_{\text{ср}} = \sum B_i \cdot B_i \quad (5.1)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i – го показателя.

Значение позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя получилось от 100 до 80, то такая разработка считается перспективной. Если от 79 до 60 – то перспективность выше среднего. Если от 69 до 40 – то перспективность средняя. Если от 39 до 20 – то перспективность ниже среднего. Если 19 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Исходя из данных таблицы 5.3, можно сделать вывод, что разрабатываемая технология лазерной сварки является перспективной, и может быть успешно распространена в производстве вышеуказанных изделий.

5.2 SWOT-анализ

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

На основе данных, приведенных в предыдущих разделах магистерской диссертации, в несколько этапов был составлен SWOT-анализ научно-исследовательского проекта.

Первый шаг – описание сильных и слабых сторон проекта, в выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.

Угроза – нежелательная ситуация, тенденция или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

Покажем наглядно результаты SWOT-анализа в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Более высокая производительность, по сравнению с другими технологиями С2. Квалифицированный персонал С3. Актуальность проекта С4. Экологичность и безопасность технологии	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Окончательный вариант технологии, который можно будет ввести в производство, далек от завершения Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл3. Большой срок поставок материалов, используемых в проводимом исследовании.
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Получение качественных сварных соединений В3. Повышение стоимости конкурентных разработок		
Угрозы: У1. Появление новых технологий У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства		

После того как сформулированы четыре области SWOT переходят к реализации второго этапа. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивные матрицы проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT (таблицы 5.5-5.8).

Таблица 5.5 – Интерактивная матрица сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	+
	B2	+	+	-	-
	B3	+	+	-	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и возможности: B1C1C2C3C4, B2C1C2, B3C1C2C4.

Таблица 5.6 – Интерактивная матрица слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	+	+	-
	B2	+	+	-
	B3	-	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: B1Сл1Сл2, B2Сл1Сл2, B3Сл2.

Таблица 5.7 – Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	+	-	+	+
	У2	+	-	-	-
	У3	-	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и угроз: У1С1С3С4, У2С1.

Таблица 5.8 – Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	-	-	-
	У2	-	+	+	-
	У3	-	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл1, У2Сл2Сл3.

В рамках третьего этапа построим итоговую матрицу SWOT-анализа, которая приведена в таблице 5.9.

Таблица 5.9. – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Более высокая производительность, по сравнению с другими технологиями С2. Квалифицированный персонал С3. Актуальность проекта С4. Экологичность и безопасность технологии	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Окончательный вариант технологии, который можно будет ввести в производство, далек от завершения Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл3. Большой срок поставок материалов, используемых в проводимом исследовании.
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Получение качественных сварных соединений В3. Повышение стоимости конкурентных разработок	Высокая производительность технологии, а также ее экологичность и безопасность увеличивает стоимость конкурентных разработок. Актуальность работы позволит привлечь инновационную инфраструктуру ТПУ в дальнейших исследованиях.	Отсутствие квалифицированного персонала ведет к снижению качества сварных соединений.
Угрозы: У1. Появление новых технологий У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	Появление новых технологий может привести к утрате актуальности исследования и снижению сравнительной производительности.	Отсутствие квалификации у специалистов может повлиять на спрос потенциальных потребителей. Несвоевременное финансовое обеспечение исследования увеличивает срок разработки окончательного варианта технологии.

По данным SWOT анализа можно заключить о ряде проблем, с которыми может столкнуться разрабатываемая технология на заключительном этапе внедрения в производство. Также результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

5.3 Структура работ в рамках научного исследования

Первым этапом работы над любым проектом является планирование этапов этой работы. Поэтому в данном этапе необходимо показать занятость всех участников проекта, а также назначить сроки выполнения всех этапов.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Распределим этапы выполнения проектов среди участников работ, занеся данные в таблицу 5.10.

Таблица 5.10. – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер
	5	Календарное планирование работ	
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение литературного обзора	Инженер
	7	Подбор нормативных документов	
	8	Теоретический расчет режимов	
	9	Сварка образцов	
	10	Разработка методики испытаний	
	11	Проведение прочностных испытаний	
	12	Проведение коррозионных испытаний	
	13	Модифицирование образцов	
	14	Высокотемпературное окисление	
	15	Металлографические исследования	
	16	Корректировка режимов сварки	
17	Сварка на новых режимах		
Оценка полученных результатов	18	Анализ результатов	Научный руководитель, инженер
	19	Вывод по цели, оформление работы	Инженер

5.4 Разработка графика проведения научного исследования

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения среднего значения трудоемкости $t_{ож}$ используем формулу (5.2) [4]:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (5.2)$$

где, $t_{ож}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения работы, чел.дн;

t_{min} и t_{max} – минимально и максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, в чел.дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i}, \quad (5.3)$$

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

$t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для наглядного изображения значения трудоемкости используют диаграмму Ганта, которая является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, необходимо, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни.

Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (5.4)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5.5)$$

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

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

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48.$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Все значения, полученные при расчетах по вышеприведенным формулам, были сведены в таблицу 5.11.

На основе таблицы 5.11 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта и представлен на рисунке 5.1 с разбивкой по месяцам и неделям за период времени дипломирования.

Таблица 5.11 – Временные показатели исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожи}$, чел-дни					
	Науч.рук.	Инженер	Науч.рук.	Инженер	Науч.рук.	Инженер	Науч.рук.	Инженер	Науч.рук.	Инженер
Составление и утверждение темы проекта	1	-	1	-	1		1		1	
Анализ актуальности темы	1	-	1	-	1		1		1	
Поиск и изучение материала по теме	-	2	-	5		3,2		3,2		5
Выбор направления исследований	1	1	1	2	1	1,4	0,5	0,7	1	1
Календарное планирование работ	1	1	1	2	1	1,4	0,5	0,7	1	1
Проведение литературного обзора	-	7	-	14		9,8		9,8		15
Подбор нормативных документов	-	2	-	5		3,2		3,2		5
Теоретический расчет режимов	-	3	-	7		4,6		4,6		7
Сварка образцов	-	3	-	7		4,6		4,6		7
Разработка методики испытаний	-	7	-	16		10,6		10,6		16
Проведение прочностных испытаний	-	3	-	7		4,6		4,6		7
Проведение коррозионных испытаний	-	3	-	7		4,6		4,6		7
Модифицирование образцов	-	3	-	7		4,6		4,6		7
Высокотемпературное окисление	-	3	-	7		4,6		4,6		7
Металлографические исследования	-	14	-	23		17,6		17,6		26
Корректировка режимов сварки	-	1	-	3		1,8		1,8		3
Сварка на новых режимах	-	2	-	5		3,2		3,2		5
Анализ результатов	1	14	2	23	1,4	17,6	0,7	8,8	1	13
Вывод по цели, оформление работы	-	5	-	9		6,6		6,6		10

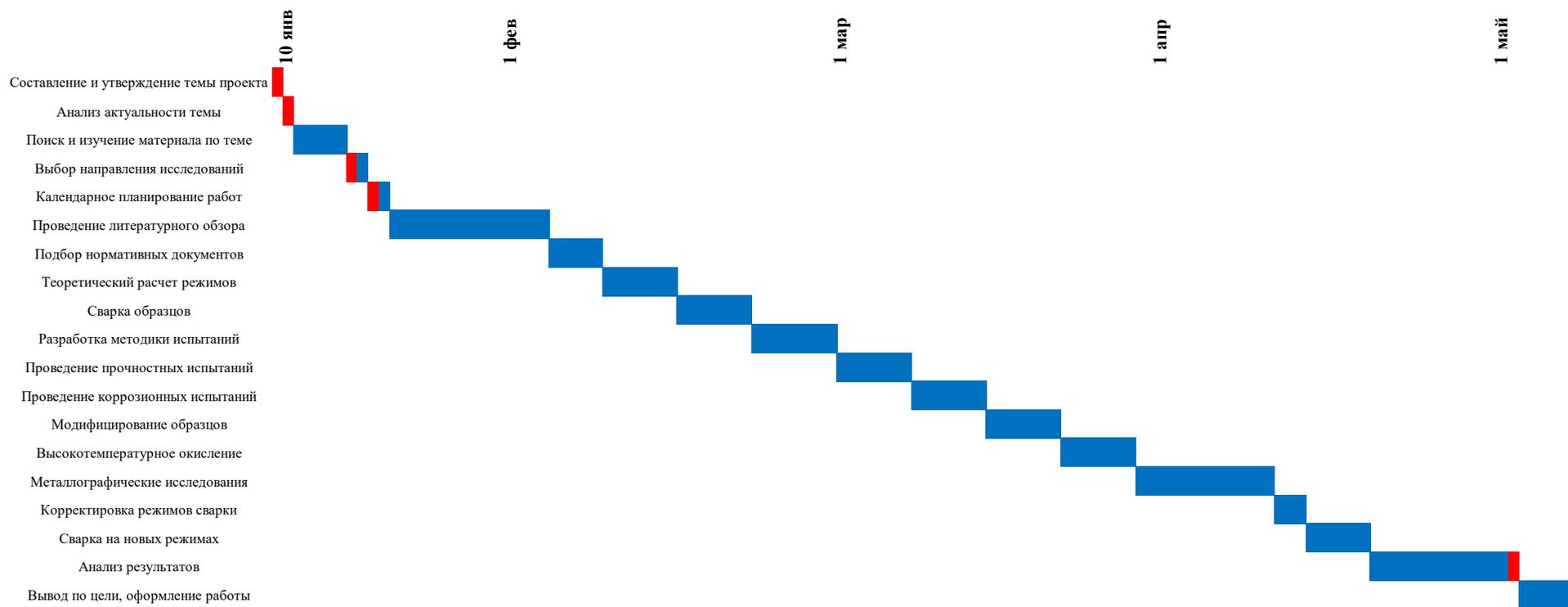


Рисунок 5.1 – Диаграмма Ганта

— - Инженер; - - Научный руководитель.

5.5 Бюджет научно-технического исследования

Составление бюджета данного исследования позволит верно оценить возможные затраты и экономическую эффективность этой работы. Для составления такого бюджета необходимо рассчитать несколько статей расходов, таких как [4]:

- 1 Материальные затраты;
- 2 Амортизационные отчисления;
- 3 Заработная плата персонала;
- 4 Расходы на внебюджетные фонды;
- 5 Накладные расходы

5.5.1 Расчёт материальных затрат

Материальные затраты включают в себя стоимость всех материалов или услуг, используемых в исследовательской работе.

Необходимо будет учесть расходы на пластины из сплава Э110, канцелярские товары и стоимость интернета. Сумму этих затрат необходимо будет умножить на $(1 + k_T)$, где k_T – коэффициент транспортно-заготовительных расходов, он назначается в пределах 5...20%, мы примем 15%. Расчет всех этих расходов отражается в таблице 5.8.

Таблица 5.12 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Кол-во, шт.	Сумма, руб.
Сплав Э110	кг	1	25200
Офисная бумага, шт	2	550	1100
Картридж для принтера	1000	1	1000
Интернет	400	4	1600
Итого			28900
Транспортно-заготовительные расходы, руб (15%).			4335
Итого с учётом ТЗР			33235

5.5.2 Расчёт амортизационных отчислений

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Для проведения эксперимента было использовано оборудование (таблица 5.13), имеющееся на кафедре.

Таблица 5.13 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2	1	10	2300	2645
2	Разрывная машина MIRI-100K	1	10	1800	2070
3	Оптический микроскоп Olympus SZ-61	1	10	192,76	221,67
4	Сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6000PLUS	1	10	10000	11500
5	Микротвердомер ХВС-1000	1	10	540	621
6	Импульсный ускоритель ионов ТЕМП-4М	1	Экспериментальное уникальное оборудование, существующее только в НИ ТПУ		
7	Установка высокотемпературного отжига ИТМ	1			
8	Весы RADWAG MXA-21	1	10	181,32	208,53
Итого:					17266,2 тыс. руб.

Норма амортизации N_A будет рассчитывается как [4]:

$$H_A = \frac{1}{T} \cdot 100\%, \quad (5.6)$$

где T – срок полезного использования, лет.

Для всего используемого оборудования срок полезного использования одинаков. Сроки использования оборудования представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Срок использования оборудования

Наименование оборудования	Количество дней работы
Аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2	12
Разрывная машина MIRI-100К	2
Оптический микроскоп Olympus SZ-61	26
Сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6000PLUS	2
Микротвердомер ХВС-1000	5
Весы RADWAG MXA-21	2

Подставив известные значения в формулу (5.6) получим:

$$H_A = \frac{1}{10} \cdot 100\% = 10\%.$$

отчисления вычисляются как:

$$A_r = \frac{H_A \cdot C_{\text{пер}}}{251} T_{\text{обі}}, \quad (5.7)$$

где $C_{\text{пер}}$ – первоначальная стоимость оборудования;

$T_{\text{обі}}$ – время использования оборудования, дни

Тогда получим:

Аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2 $A_r = \frac{0,1 \cdot 2645000 \cdot 12}{251} = 12645,42 \text{ руб}$

Разрывная машина MIRI-100К $A_r = \frac{0,1 \cdot 2070000 \cdot 2}{251} = 1649,40 \text{ руб}$

Оптический микроскоп Olympus SZ-61 $A_r = \frac{0,1 \cdot 221670 \cdot 26}{251} = 2296,18 \text{ руб}$

Сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6000PLUS $A_r = \frac{0,1 \cdot 11500000 \cdot 2}{251} = 9163,35 \text{ руб}$

Микротвердомер ХВС-1000 $A_r = \frac{0,1 \cdot 621000 \cdot 5}{251} = 1237,05 \text{ руб}$

Весы RADWAG MXA-21 $A_r = \frac{0,1 \cdot 208530 \cdot 2}{251} = 166,16 \text{ руб}$

Итого: 27156,57 рублей.

5.5.3 Основная заработная плата исполнителей

В этот раздел входит основная заработная плата персонала, участвовавшего в выполнении ВКР. Так как в данной работе участвуют только 2 работника – инженер (магистрант) и научный руководитель, то для расчёта необходимо знать только их оклады. Заработная плата вычисляется в соответствии с трудоёмкостью выполняемых работ, а также согласно действующей системы ставок в НИ ТПУ

Расчёт заработной платы будем вести по формуле (5.10) [4]:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (5.8)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$), руб.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ вычисляется по формуле (5.11) [9]:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (5.9)$$

где $T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых трудящимся, в рабочих днях (таблица 5.15);

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная $Z_{\text{дн}}$ плата рассчитывается по формуле (5.10):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.10)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл 5.15).

$M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя; $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя.

В нашем случае научный руководитель в должности кандидата технических наук и студент – ассистент низшей категории имеют разные рабочие недели, первый шестидневную, а второй пятидневную.

Таблица 5.15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	66	118
Потери рабочего времени на отпуск	56	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{окл} \cdot k_p, \quad (5.11)$$

где $Z_{окл}$ – оклад, руб.;

k_p – районный коэффициент, 1,3 для Томска.

Научный руководитель имеет должность доцента и степень кандидата технических наук оклад на весну 2022 год составляет 36 796 руб.

Оклад инженера (магистранта) будем считать как научного сотрудника без степени, на весну 2022 года он составляет 19 254 руб.

Для полного расчёта подставим обобщённые сведения о рабочем времени персонала из таблицы 5.15 в вышеуказанные формулы (5.8 – 5.11), полученные значения приведены в таблице 5.16.

Таблица 5.16 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{окл}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Научный руководитель	36 796	1,3	47834,8	2047,2	5	10236
Инженер	19 254		25030,2	1167,3	142	165756,6
Итого $Z_{осн}$						175992,6

5.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при

совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.). Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (5.12)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 5.17.

Таблица 5.17 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнитель	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн}}$	$Z_{\text{доп}}$
Научный руководитель	0,15	10236	1535,4
Инженер		165756,6	24863,49
Итого			26398,89

5.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.13)$$

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

Для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Таблица 5.18 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	10236	165756,6
Дополнительная заработная плата, руб.	1535,4	24863,49
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Сумма отчислений	3190	51658,04
Итого	54848,04	

5.5.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}} \quad (5.14)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= (33235 + 27156,57 + 175992,6 + 26398,89 + 54848,04) \cdot 0,16 \\ &= 50820,98 \text{ руб.} \end{aligned}$$

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

Таблица 5.19 – Расчет бюджета затрат НИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИ	33235
2. Затраты на амортизацию оборудования.	27156,57
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	175992,6
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	26398,89
5. Отчисления во внебюджетные фонды	54848,04
6. Накладные расходы	50820,98
7. Бюджет затрат НИ	368452,08

5.6 Определение ресурсоэффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (таблица 5.14). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} \quad (5.15)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

В качестве вариантов технологии получения стыкового соединения пластин из циркониевого сплава выберем аналоги технологии лазерной сварки (исполнение 1), такие как контактная точечная сварка и электронно-лучевая сварка (исп. 2 и 3 соответственно).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{368452,08}{400000} = 0,92$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{392000}{400000} = 0,98$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{400000}{400000} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки нашей технологии отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах, по отношению к самой дорогой разработки из сравниваемых аналогов.

5.6.1 Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую как интегральный критерий, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.16)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 5.20).

Таблица 5.20 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.Повышение производительности	0,3	5	4	3
2.Удобство в эксплуатации	0,1	4	4	2
3. Безопасность	0,1	4	3	4
4. Простота эксплуатации	0,1	4	3	2
5. Цена	0,2	4	4	1
6. Срок выхода на рынок	0,1	3	5	1
7. Финансирование научной разработки	0,1	3	5	3
ИТОГО	1	27	28	23

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 = 4,1$$

$$I_{p2} = 0,3 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 4,0$$

$$I_{p3} = 0,3 \cdot 3 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 2 + 0,2 \cdot 1 + 0,1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 3 = 2,3$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.1}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финр}} \quad (5.17)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблицу 5.15) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (5.18)$$

Таблица 5.21 – Эффективность разработки

№	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,92	0,98	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективной разработки	4,1	4,0	2,3
3	Интегральный показатель эффективности	4,46	4,08	2,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,91	0,52

По данным таблицы 5.21 лазерной сварки превосходит конкурентные аналоги как по ресурсоэффективности, так и по интегральному показателю эффективности, за счет повышения производительности, снижения стоимости и затрат на разработку.

Выводы по разделу

В ходе данной главы методами анализа, оценки и расчётов было выявлено, что технология лазерной сварки циркониевого сплава Э110 экономична, ресурсоэффективна, имеет высокую производительность, за счёт чего можно заключить, что данный научно-исследовательский проект будет весьма конкурентоспособным на рынке.

Были решены все задачи изначально установленные в этом разделе, а именно:

- Проведён анализ потенциальных конкурентов, в ходе которого выяснили, что наиболее перспективным сегментом в отраслях производства ТВС и полупроводниковых приборов для формирования спроса является сегмент мелких и средних предприятий за счет снижения конкуренции;
- Выполнен анализ конкурентных технических решений. Разрабатываемая технология оказалась достаточно конкурентной в сравнении с другими технологиями сварки на рынке.
- По итогам SWOT-анализа выявлены основные угрозы нашей разработки: появление более дешевой и совершенной технологии на рынке, отсутствие спроса на разрабатываемую технологию, отсутствие финансирования технологии для полного внедрения, предупреждающие мероприятия представлены в итоговой таблице.
- Выполнено планирование графика НИР и построена диаграмма Ганта для большей ее наглядности и определения очередности работ, по этому графику на инженера (магистранта) приходится 142 рабочих дня, а на научного руководителя – 5 рабочих дней.
- Рассчитан бюджет исследования, по которому можно полноценно оценить затраты на выполнение работ: согласно расчётам, они составили 368452,08 рубля.

В последнем подразделе дана оценка экономической эффективности проекта, а именно было установлено, что разрабатываемая технология превосходит конку-

рентов по ресурсоэффективности, как по общему показателю, так и по сравнительному.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ01	Елкин Максим Александрович

ШКОЛА	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение электронной инженерии
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

Тема дипломной работы: «Импульсная лазерная сварка циркониевого сплава Э110»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является аппарат для лазерной сварки ЛТА 4-2 Область применения исследования – лазерная микросварка. Работы проводились на базе АО НПЦ «Полус»
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов <ul style="list-style-type: none"> • Природа воздействия • Действие на организм человека • Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов) • СИЗ коллективные и индивидуальные 1.2. Анализ выявленных опасных факторов: <ul style="list-style-type: none"> • Термические источники опасности • Электробезопасность • Пожаробезопасности 	1. Вредные факторы: 1.1 Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры; 1.2 Недостаточная освещенность; 1.3 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.4 Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 2. Опасные факторы: 2.1 Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R _{заземления} , СКЗ, СИЗ; Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ; 2.2 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации. 2.3. Лазерное излучение, класс опасности, СКЗ, СИЗ.
2. Экологическая безопасность: <ul style="list-style-type: none"> • Выбросы в окружающую среду • Решения по обеспечению экологической безопасности 	Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника, бракованные образцы) и способы их утилизации.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> • перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; • разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; • разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), пред-

	ставлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.
4. Перечень нормативно-технической документации.	– ГОСТы, СанПиНы, СНИПы

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.01.2022 г.
-------------------------------------------------------------	---------------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ01	Елкин Максим Александрович		

6 Раздел «Социальная ответственность»

Введение

В этом разделе рассматриваются вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

Социальная ответственность является важным пунктом работы, так как она затрагивает вопросы ответственности организации перед интересами коллектива и общества, о важности безопасности их труда, а также защиты окружающей среды от вредных воздействий исследований.

В магистерской диссертации, разрабатывается технология импульсной лазерной сварки циркониевого сплава Э110, сварочные работы проводились на базе АО «НПЦ «Полюс» на рабочем месте, оборудованном установкой для лазерной сварки ЛТА-4-2, которая является объектом исследования в данном разделе. Соответственно, рассматриваются вопросы анализа и выявления возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте оператора установки. ЛТА-4-2 находится в отдельном помещении, площадью 80 м².

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях функционально взаимоувязанных средств производства (оборудования, оснастки, предметов труда и др.), необходимых для осуществления трудового процесса.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в городе Томске, наиболее типичной ЧС является мороз. Также, в связи с беспокойной ситуацией в мире, одной из возможных ЧС может быть диверсия.

6.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего человека в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

При анализе рабочего места были выявлены следующие вредные производственные факторы:

- нарушение уровня микроклимата в помещении;
- освещенность рабочей зоны;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- превышение уровней шума.

Опасным производственным фактором называется фактор, воздействие которого может являться причиной острого заболевания или внезапного ухудшения здоровья, смерти.

При анализе рабочего места были выявлены следующие опасные производственные факторы:

- электроопасность;
- пожароопасность;
- лазерное излучение.

Далее подробно рассмотрим каждый из выявленных факторов.

6.2 Микроклимат в помещении

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах ГОСТ Р 2.2.2006-05.

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

Проанализируем определенные допустимые параметры микроклимата в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88. Эти параметры устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и производственного помещения, покажем наглядно допустимые значения микроклимата в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Допустимые параметры микроклимата.

Период года	Температура воздуха, С°		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		
Холодный	15	24	20-80	<0.5
Теплый	22	28	20-80	<0.5

Теперь последовательно рассмотрим в качестве параметров микроклимата: температуру, влажность и скорость ветра.

Указанные параметры – каждый в отдельности и в совокупности – оказывают значительное влияние на работоспособность человека, его самочувствие и здоровье. При определенных их значениях человек испытывает состояние теплового комфорта, что способствует повышению производительности труда, предупреждению простудных заболеваний. И, наоборот, неблагоприятные значения микроклиматических показателей могут стать причиной снижения производственных показателей в рабо-

те, привести к таким заболеваниям работающих как различные формы простуды, радикулит, хронический бронхит, тонзиллит и др.

Рабочая зона ограничивается высотой 2,2 м над уровнем пола, где находится рабочее место. При этом нормируются: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха. Все категории работ разграничиваются на основе интенсивности энергозатрат организма в Вт. Экспериментальная часть диссертации проводилась в лабораторных условиях, по энергозатратам ее следует отнести к категории 1б – работа легкая физическая, производимая сидя или связанная с ходьбой, но не требующая систематического физического напряжения или поднятия и переноса тяжестей.

Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей температуры в холодное время года применяется водяное отопление (с нагревом воды до 100°C), а в теплый период года для обеспечения защиты от попадания прямых солнечных лучей применяются жалюзи.

Отопление лаборатории и корпуса в целом водяное с применением радиаторов, что обеспечивает постоянное и равномерное нагревание воздуха в холодное время года.

Площадь на одно рабочее место должна составлять не менее 6 м², по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. В нашем случае помещение имеет размеры 10х8х3,5 м, в таком случае общая площадь нашего рабочего помещения 80 м², объём составляет 280 м³. По нормам, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 объём воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40м³, соответственно, дополнительная вентиляция не требуется.

6.3 Освещенность рабочей зоны

Освещение крайне важно для любого человека, так как 90% информации об окружающем мире человек получает именно от зрительного аппарата. Поэтому соблюдение правильного количества света на рабочем месте — это ключевая задача для обеспечения необходимой работоспособности трудящегося.

Человек при работе в условиях недостаточного освещения или освещения низкого качества может испытывать: усталость глаз, переутомление, головные боли. Все эти факторы приводят к снижению работоспособности рабочего.

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

Расчет равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности будем выполнять методом коэффициента светового потока, который учитывает световой поток, отражённый от потолка и стен, и вести по параметрам, установленным в СП 52.13330.2016.

В помещении расположения лазерной установки отсутствуют окна, потолки свежепобелены. Наименьший размер объекта различения (в нашем случае это размер сварного шва), составляет 0,6 мм, что соответствует IV разряду зрительной работы, однако, согласно СП, из-за отсутствия естественного освещения разряд работы следует повысить на одну ступень шкалы.

Таким образом, исходными данными для расчета являются: длина помещения $A = 10$ м, ширина $B = 8$ м, высота = 3,5 м. Высота рабочей поверхности (стол лазера) над полом $h_p = 0,9$ м. Согласно СП 52.13330.2016 необходимо создать освещенность не ниже 300 лк (разряд работы IIIв). Коэффициент отражения стен $R_c = 50$ %, потолка $R_{\text{п}} = 70$ %. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с средним выделением пыли равен $K_z = 1,8$, коэффициент неравномерности $Z = 1,1$.

Рассчитаем систему общего люминесцентного освещения.

Площадь помещения

$$S = A \times B, \quad (6.1)$$

где A – длина, м;

B – ширина, м.

$$S = 10 \times 8 = 80 \text{ м}^2.$$

Выбираем светильники типа ОД, $\lambda = 1,4$.

Рассчитаем высоту подвеса светильника над расчетной поверхностью по формуле (6.2):

$$h = H - h_c - h_{\text{рп}} \quad (6.2)$$

где, h – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью;

$h_{\text{рп}}$ – высота рабочей поверхности над полом, м;

H – высота помещения, м;

h_c – расстояние светильников от перекрытия, свес (0,5 м).

Подставим известные значения в формулу 6.2, получим:

$$h = 3,5 - 0,5 - 0,9 = 2,1 \text{ м}$$

Определим расстояние между рядами светильников, по соотношению (6.3):

$$L = \lambda \cdot h. \quad (6.3)$$

$$L = 1,4 \cdot 2,1 = 2,94 \text{ м.}$$

Рассчитаем количество рядов светильников при заданной ширине помещения

$B = 8 \text{ м}$ (6.5):

$$n = \frac{B}{L} \quad (6.4)$$

$$n = \frac{8}{2,94} = 2,72$$

Округляем полученное значение в большую сторону $n = 3$ ряда.

Определим число светильников в одном ряду (6.6):

$$N_p = (A - 2l) / l_{\text{св}}, \quad (6.5)$$

где, $l_{\text{св}}$ – длина светильника, для светильника типа ОД-2-80 ($l_{\text{св}} = 1,531 \text{ м}$).

$$N_p = \frac{10 - 2 \cdot 1,531}{1,531} = 4,53$$

Округляем значение светильников в ряду до 4.

Таким образом общее количество светильников будет равно (6.6):

$$N_{\text{св}} = N_p \cdot n \quad (6.6)$$

$$N = 4 \cdot 3 = 12$$

Размещаем светильники в три ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильник типа ОД мощностью 80 Вт с габаритными размерами 1531x266x198мм, при этом разрывы между светильниками в ряду составят (50...500) см. Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $N = 12 \cdot 2 = 24$.

Индекс помещения определяется по формуле (6.7):

$$i = \frac{S}{h \cdot (A+B)} \quad (6.7)$$

$$i = \frac{80}{3,5 \cdot (10 + 8)} = 1,27$$

Расчетным уравнением метода коэффициента использования светового потока является формула (6.8):

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} \quad (6.8)$$

где η – коэффициент использования светового потока для данной формулы $\eta = 0,53$,
 E_n – нормируемая минимальная освещённость, лк [24].

$$\Phi = \frac{300 \cdot 80 \cdot 1,8 \cdot 1,1}{24 \cdot 0,53} = 3735 \text{ лк.}$$

Исходя из этого значения выбираем лампу ЛД мощность 80 Вт, световой поток которой равен 4250 лк.

Определим потребный световой поток ламп в каждом из рядов. Делаем проверку выполнения условия (6.9):

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{ст} - \Phi_{расч}}{\Phi_{ст}} \cdot 100\% \leq 20\%. \quad (6.9)$$

Подставим значения, для определения мощности осветительной установки:

$$-10\% \leq \frac{4250 - 3735}{3735} \cdot 100\% \leq 20\%$$

$$-10\% \leq 13,8\% \leq 20\%$$

Таким образом, мы получили, что необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Теперь рассчитаем мощность осветительной установки.

Потребляемая мощность осветительной установки составит:

$$P = N \cdot P_{\text{ламп}} \quad (6.10)$$

$$P = 24 \cdot 80 = 1920 \text{ Вт.}$$

Выбранная система освещения обеспечивает требуемую освещенность рабочего места, согласно проведенным расчётам.

Для схематического изображения размещения светильников необходимо рассчитать расстояние вдоль стен и от торца помещения:

$$L = N \cdot a \cdot L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + N \cdot L_1 \quad (6.11)$$

Согласно практикуму по расчету, равномерность освещения обеспечивается расстоянием от крайних светильников до стенок $= L/3$.

Составим уравнение с одной неизвестной:

$$8000 = 2L_1 + 2/3 \cdot L_1 + 3 \cdot 266$$

$$10000 = 3 \cdot L_2 + 2/3 \cdot L_2 + 4 \cdot 1531$$

Преобразуем уравнения для нахождения L_1 и L_2 .

$$L_1 = \frac{8000 - 3 \cdot 266}{2 + 2/3} \approx 2707 \text{ мм.}$$

$$L_2 = \frac{10000 - 4 \cdot 1531}{3 + 2/3} \approx 1059 \text{ мм.}$$

Тогда расстояние от края стенок будет равно:

$$\frac{L_1}{3} = \frac{2707}{3} \approx 902 \text{ мм.}$$

$$\frac{L_2}{3} = \frac{1059}{3} = 353 \text{ мм.}$$

Размещаем светильники в 3 ряда по 4 светильника. На рисунке 6.1 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

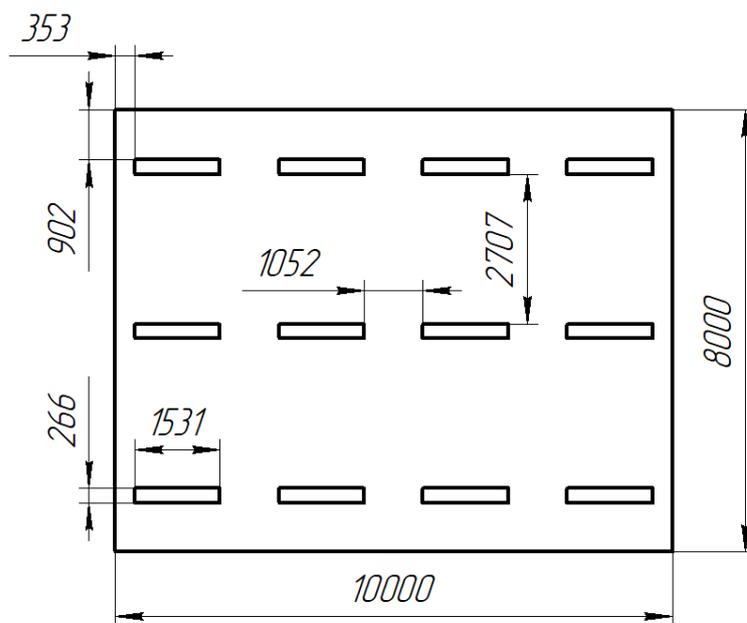


Рисунок 6.1 – План размещения светильников в кабинете

6.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Биологическое действие электромагнитного излучения зависит от длины волны, напряженности поля, длительности и режима воздействия.

Основными источниками электромагнитного излучения во время разработки проекта был дисплей ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать:

- в диапазоне частот 5 Гц... 2 кГц – 25 В/м
- в диапазоне частот 2 кГц...400 кГц – 2,5 В/м

Плотность магнитного потока не должна превышать:

- в диапазоне частот 5 Гц...2 кГц – 250 нТл
- в диапазоне частот 2 кГц...400 кГц – 25 нТл

Электростатический потенциал экрана видеомонитора 500 В.

В ходе работы использовалась ПЭВМ со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5 В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В.

Так как при постоянном воздействии электромагнитного поля, возникают различного рода последствия для здоровья человека, предусмотрены предельно допустимые уровни облучения по ОСТ 54 30013-83:

- до 10 мкВт/см², время работы (8 часов);
- от 10 до 100 мкВт/см², время работы не более 2 часов;
- от 100 до 1000 мкВт/см², время работы не более 20 мин. при условии использования защитных очков.
- для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см².

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

Средствами коллективной защиты:

1. защита временем;
2. защита расстоянием;
3. снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;
4. экранирование источника (с заземлением);
5. защита рабочего места от излучения;

Средствами индивидуальной защиты:

1. Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.
2. Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO₂).

6.5 Превышение уровней шума

Шум является общебиологическим раздражителем и в некоторых условиях может оказывать влияние на системы организма человека. Шум на рабочем месте инженера возникает от работы: ПЭВМ, принудительной вентиляции, ламп дневного света, а также проникает снаружи.

Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в дБ, в октавных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром.

Основным источником шума при работах, проводимых в ходе исследования, являются принудительная вентиляция лазерной установки, компьютерные охлаждающие вентиляторы и шум поступающий извне. Уровень шума варьируется от 40 до 45 дБА. Согласно СанПиН 2.2.4.3359-16, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБА.

Шум от работы ПК можно понизить, используя малошумные вентиляторы охлаждения, либо водяное охлаждение системного блока

При значениях выше ПДУ необходимо предусмотреть СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов, таких как: шамотный кирпич или микропористой резины);
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

В качестве средств индивидуальной защиты (СИЗ) можно использовать средства защиты органов слуха: беруши, наушники, антифоны.

6.6 Электроопасность

Электробезопасность по Р 2.2.2006-05 представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока.

Электробезопасность и допустимые нормы, и заземление регламентируются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), ГОСТ 12.1.038-82 и ГОСТ 12.1.030-81.

В зависимости от индивидуальных показателей человека (масса, рост, строение тела, пол, род занятий), его физического состояния (болезнь, наличие состояния алкогольного опьянения), параметров протекающего тока (сила тока и его частота), состояния окружающей среды зависит поражающее воздействие на организм.

Одним из наиболее опасных параметров являются переменный ток с частотой от 10 до 120 Гц. Наиболее безопасным напряжением для человека является до 12 В, условно безопасным до 36 В. Опасной величиной считается ток, более 1 мА, а смертельным более 100 мА. Опасность поражения человека электрическим током существует во всех случаях, когда используются электрические установки и оборудование.

Для предотвращения электрического поражения необходимо по возможности исключить причины поражения, к которым относятся:

- случайные прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- появление напряжения на механических частях электрооборудования (корпусах, кожухах и т.д.) в результате повреждения изоляции или других причин;
- появление напряжения на отключённых токоведущих частях, на которых работают люди в результате ошибочного включения;
- возникновения напряжения на поверхности земли или на опорной поверхности.

Согласно ПУЭ (7-е изд.) рабочее место относится к 1 классу – помещение без повышенной опасности. Так как в ней учтены все необходимые правила по электробезопасности, это сухое помещение без повышенного напыления, температура воздуха нормальная, пол покрыт изоляционным материалом. Безопасное значение тока $I < 0.1$ А, а значение напряжения $U < 12$ В. Влажность воздуха не превышает 75%, отсутствует токопроводящая пыль, температура не превышает 35°C. Оператор установки проходит первичный инструктаж по электробезопасности.

Основными техническими средствами защиты человека от поражения электрическим током, используемыми отдельно или в сочетании друг с другом, являются (ПУЭ): защитное заземление, защитное зануление, защитное отключение, электрическое разделение сети, малое напряжение, электрозащитные средства, уравнивание потенциалов, двойная изоляция, предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности.

При работе с ПК, с целью обеспечения электробезопасности пользователей компьютеров, должны выполняться следующие требования:

- все узлы одного персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети;
- корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;
- для аварийного отключения компьютерного оборудования должен использоваться отдельный щит с автоматами защиты и общим рубильником;
- все соединения ПЭВМ и внешнего оборудования должны производиться при отключенном электропитании.

Искусственное заземление — это преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки электрической сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством. Установка ЛТА 4-2 снабжена контуром заземления (РЕ), включающего в себя защитный проводник (заземляющий проводник, нулевой защитный проводник, защитный проводник системы уравнивания потенциалов).

6.7 Пожарная опасность

Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага, наносящего материальный ущерб. Согласно ГОСТ 12.1.033 – 81 понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность возникновения и развития пожара и воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

Пожарная безопасность предусматривает обеспечение безопасности людей и сохранения материальных ценностей предприятия на всех стадиях его жизненного цикла. Основными системами пожарной безопасности являются системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, включая организационно-технические мероприятия.

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Помещение по степени пожароопасности относится к классу В-4, так как в нем отсутствует выделение пыли и волокон во взвешенном состоянии.

Возникновение пожара при работе на аппарате для лазерной сварки ЛТА 4-2 может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера. Причины возникновения пожара неэлектрического характера: халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня). Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- назначение ответственного за пожарную безопасность помещений;
- издание приказов по вопросам усиления пожарной безопасности

- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- курение в строго отведенном месте;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например, ОП-5.

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.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к эвакуационному выходу.

Для снижения вероятности возникновения пожара необходимо оборудовать:

2. Специальные изолированные помещения для хранения и разлива легко воспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-85;

3. Специальные помещения для хранения в таре пылеобразной канифоли, изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

4. Первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

5. Автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Помещение соответствует нормам пожарной безопасности, т.к. имеет охранно-пожарную сигнализацию, план эвакуации (рисунок 6.2), требуемые огнетушители с поверенным клеймом, таблички с указанием направления движения в сторону эвакуационного выхода.

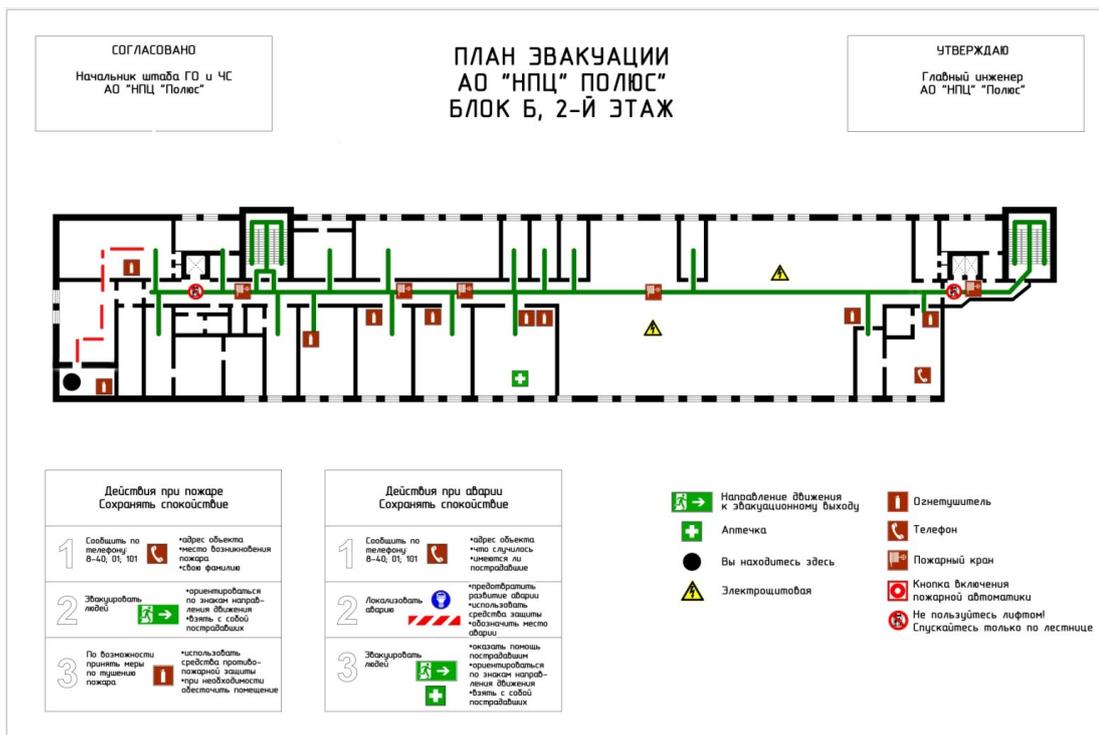


Рисунок 6.2 – План эвакуации (--- план эвакуации с рабочего места)

6.8. Лазерное излучение

По степени опасности генерируемого излучения согласно ГОСТ 12.1.040-83 лазеры подразделяются на четыре класса. Установка ЛТА 4-2 к лазерам II класса – такие лазеры, выходное излучение которых представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением.

Предельно допустимые уровни лазерного излучения, определяются по формулам для используемой длине волны в соответствии с требованиями "Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров «N 2392-81, утвержденных Министерством здравоохранения СССР».

Средства защиты должны снижать уровни лазерного излучения, действующего на человека, до величин ниже ПДУ.

К СКЗ, применяемым в нашем случае, можно отнести:

- экранирование источника излучения;
- предохранительные устройства (прекращающую работу лазера в случае вскрытия защитной камеры);
- устройства автоматического контроля и сигнализации;
- устройства дистанционного управления.

СИЗ применяются при проведении пусконаладочных и ремонтных работ, работ с открытыми лазерными изделиями. Они включают в себя средства защиты глаз и лица (защитные очки, щитки, насадки), средства защиты рук, специальную одежду.

При выборе средств индивидуальной защиты необходимо учитывать:

- рабочую длину волны излучения;
- оптическую плотность светофильтра.

Защитные лицевые щитки необходимо применять в тех случаях, когда лазерное излучение представляет опасность не только для глаз, но и для кожи лица.

6.9 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность – это допустимый уровень негативного воздействия со стороны природных и антропогенных факторов экологической опасности на окружающую среду и человека.

Согласно техническому описанию и условиям эксплуатации при работе установки лазерной сварки ЛТА 4-2 не выделяется и не выбрасывается в воду, атмосферу, вентиляцию или в рабочую зону каких-либо вредных веществ, газов, аэрозолей, дымов и т.д., превышающих допустимые уровни ПДК.

Компьютеры, которые использовались для написания магистерской диссертации, к сожалению, содержат токсичные вещества и представляют угрозу для человека и для окружающей среды. Поэтому следует рассмотреть конкретно эти вещества и их влияние на человека:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу);

Ввиду вышеперечисленных негативных для здоровья эффектов этих веществ, необходима комплексная утилизация компьютеров. Производить эту утилизацию следует в такой последовательности:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- разделить металлические части на чермет и цветмет;
- кофир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно так же, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после сбора отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части компьютера подвергаются специально переработке;

Все виды отходов, передающихся на переработку, должны быть разложены и скоплены предприятием до размеров, которые рационально транспортировать, а после переданы либо перерабатывающим предприятиям, либо строительным компаниям. Поэтому еще до покупки компьютеров в рабочий кабинет, необходимо знать правила утилизации старых моделей, а также выяснить эко-стандарт «свежей» техники на возможность дальнейшей утилизации.

Кроме того, утилизация помимо заботы о природе путём безотходного производства (вторичной переработки пластика и металлов) для предприятия также несёт строгую необходимость. За возможное нарушение ст. 19.14. КоАП РФ о несоблюдении правил учета движения драгоценных металлов, да и несанкционированный вывоз техники и оборудования на «свалку» тоже грозит штрафом.

Решения по обеспечению экологической безопасности:

1. для литосферы – вывоз твердых бытовых отходов, с последующей переработкой по ГОСТ 17.4.3.04-85.

2. для атмосферы – проведение ежедневной влажной уборки на рабочем месте и проветривание помещения.

6.10 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Производство расположено в городе Томске с континентально-циклоническим климатом, потому такие природные явления как: землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д., в данном городе отсутствуют.

Наиболее вероятными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия. Рассмотрим подробнее эти виды ЧС и противодействие им.

Для Томска, как и для Сибири в целом зимнее время сопровождаются морозы. Достижение критически низких температур может привести к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям. Чтобы обезопасить себя от негативных последствий следует:

- Иметь калориферы на газе с катализатором (на случай переморозки труб). Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.
- В здании должен храниться запас воды в 30 литров на одного сотрудника.
- В случае отсутствия электроэнергии должны быть предусмотрены генераторы энергии (на дизеле), а также генераторы, способные поддерживать стабильное питание сварочного оборудования.
- В гаражном парке должны находиться теплые автобусы и микроавтобусы. Также для перевозки людей в удаленные районы нужно предусмотреть менее габаритные автомобили, способные работать в сильные морозы.

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, ввиду сложной политической ситуации возникают все чаще, и хоть большинство таких угроз оказываются ложными, но порой случаются серьезные взрывы или иные повреждения средств производства.

Для уменьшения вероятности успешного выполнения диверсии на предприятии необходимо организовать: систему видеонаблюдения и контролируемого прохода на территорию, круглосуточную охрану и надежную систему связи. Кроме того, конфиденциальной должна быть информация о: системе охраны объекта, расположении цехов и оборудовании в них, сигнализаторах, камерах и иных средств охраны (их количество и расположение). Должностные лица раз в полгода должны проводить тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации, ввиду диверсии.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудовании в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

Для недопущения несанкционированного проникновения на рабочее место на предприятии применяется система контроля и управления доступом, каждый сотрудник имеет ключ – карту для прохода через пропускной пункт. На лицевой стороне карты размещается фотография и ФИО сотрудника, на задней стороне ключ – карты – номер пропуска. Пропускные пункты расположены на входе и внутри предприятия, контроль осуществляется, в том числе визуально на соответствие фотографии, что практически исключает несанкционированный доступ.

Перечень нормативно – технической документации

1. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.
2. ГОСТ Р 2.2.2006-05 Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Стандартинформ, 2015. – 45 с.
3. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. / Разработаны: НИИ медицины труда РАМН / Афанасьева Р.Ф., Репин Г.Н., Михайлова Н.С., 1996. – 45 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
5. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы / Минздрав России / Москва 2003. – 27 с.
6. СП 52.13330.2016 Свод правил. Естественное и искусственное освещение Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. / НИИСФ РААСН / Дата введения 2017 – 35с.
7. СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах" / Минздрав России / Москва 21 2016 год. – 26 с.
8. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов. //М.: ИПК Издательство стандартов, 2001 – 42с.
9. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. // Минюст России 01.08.2003 – 25с.
- 10.СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы // Госстрой СССР 01.01.1987 – 29с.

- 11.ГОСТ 12.1.040-83 Лазерная безопасность. Общие положения / Минздрав России / Переиздание от 2001 года – 16 с.
- 12.ГОСТ 12.1.030-81 Электробезопасность защитное заземление. Зануление. / Государственный комитет СССР/ Переиздание от 2001 года – 19 с.
- 23.ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
- 24.СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.
- 25.СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 26.Р 2.2.2006-05. Руководство гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
- 27.ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2013.
- 28.ГОСТ 12.1.009-76 межгосударственный стандарт система стандартов безопасности труда.
29. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2013. –704с.
- 30.ОСТ 54 30013-83. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности. // Дата принятия 04.04.1983 // ОСТ СССР (Отраслевой Стандарт СССР) – 25с.

Заключение

В результате выполнения магистерской выпускной квалификационной работы, была предложена технология лазерной сварки модельных стыковых соединений листов толщиной 0,5 мм из циркониевого сплава Э110 на установке ЛТА 4-2. Определены энергетические параметры лазера, позволяющие получить структуру шва, близкую к основному металлу. Результаты показывают, что предел прочности не может быть использован в качестве критерия качества сварных швов циркониевых сплавов. Спектральный анализ показывает повышенное загрязнение поверхностного слоя кислородом, азотом и углеродом во всех исследованных случаях. В связи с этим, определено, что повышенный расход защитного газа не позволяет полностью защитить металл шва и способствует образованию дефектов. Таким образом, требуется применение специальных насадок или сопел для получения ламинарного потока защитного газа, определение его состава и рационального расхода. Исходя из этого сформулировано дальнейшее направление исследований.

Также была проведена экономическая оценка технологии в сравнении с конкурентными разработками, где была обоснована целесообразность данной разработки и рассчитан бюджет исследования.

В рамках охраны труда были описаны мероприятия по безопасности жизнедеятельности, которые обеспечивают минимальное влияние вредных и опасных факторов производства на инженера, сохраняя его максимальную трудоспособность, дополнительно рассмотрены вопросы экологической безопасности и безопасности при ЧС.

Список использованных источников

1. Ёлкин М.А., Шабалин Р.В., Кузнецов М.А. Применение циркониевых сплавов в строительстве АЭС нового поколения // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2016). Материалы III Международной научной конференции студентов и молодых ученых [Электрон. текстовые дан.]. – 2016. – С. 313-315.
2. Слободян М.С. Способы создания неразъемных соединений циркониевых сплавов в реакторостроении // Цветные металлы. – 2016. – №10.– С. 91-98.
3. Кочергин В., Лернер А., Ляхов Д. и др. Лазерные и оптические технологии в производстве компонентов энергетических ядерных реакторов // Фотоника. – 2015. – №4(34). – С. 22-29.
4. Семенов А.Н., Плышевский М.И., Гордо В.П. и др. Оптимизация формы источника нагрева при электронно-лучевой сварке циркониевых труб // Сварочное производство. – 2012. – №1. – С.22-26.
5. Займовский А. С., Калашников В. В., Головнин И. С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. – М.: Атомиздат, 1966. – 520 с.
6. Quality and Reliability Aspects in Nuclear Power Reactor Fuel Engineering, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2015.
7. ISO 9606-5:2000 Approval Testing of Welders e Fusion Welding - Part 5: Titanium and Titanium Alloys, Zirconium and Zirconium Alloys.
8. ISO 15614-5:2004 Specification and Qualification of Welding Procedures for Metallic Materials - Welding Procedure Test e Part 5: Arc Welding of Titanium, Zirconium and Their Alloys.
9. AWS G2.5/G2.5M:2012 Guide for the Fusion Welding of Zirconium and Zirconium Alloys.
10. ОСТ 95-503-2006 «Соединения сварные и паяные для изделий активных зон ядерных реакторов. Общие технические требования. Правила приёмки и методы контроля качества»// Дата принятия 01.01.2007 – 66 с.

11. ОСТ 95 877-2011 «Реакторы ядерные. Активные зоны. Соединения сварные и паяные. Правила проектирования и организации производства» // Дата принятия 01.10.2011 – 60 с.
12. Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010.
13. Mishra P. et al. In-reactor degradation of fuel and cladding in fuel pins operated with weld defects //Journal of Nuclear materials. – 2013. – Т. 439. – №. 1-3. – С. 217-223.
14. M.S. Slobodyan, Methods of creation of permanent zirconium alloy joints in reactor art: a review, Tsvetnye Met. 10 (2016) 91-98.
15. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989, 304 с
16. S. Katayama (Ed.), Handbook of Laser Welding Technologies, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013.
17. Колачев Б. А. Водородная хрупкость цветных металлов. М.: Металлургия. 1966. — 256с.
18. Мороз Л. С., Чечулин Б. Б. Водородная хрупкость металлов //М.: Металлургия. – 1967. – Т. 256. – С. 5.
19. Slobodyan M. S., Kudiiarov V. N., Lider A. M. Effect of energy parameters of pulsed laser welding of Zr-1% Nb alloy on metal contamination with gases and properties of welds //Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Т. 45. – С. 472-490.
20. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. – 1976.
21. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. М., //Высшая школа. – 1977.
22. Фролов В. В., Фролов В. В. Теория сварочных процессов //М.: Высш. шк. – 1988.
23. Походня И. К. и др. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами //Киев: Наукова думка. – 2004.

24. Баранов М. С., Воцинский М. Л., Гейринхс И. Н. Лазерная сварка металлов. – 1979.
25. Стельмах М. Ф. Лазеры в технологии. М //Энергия. – 1975.
26. Крылов К. И., Прокопенко В. Т. Митрофанов АС//Применение лазеров в машиностроении и приборостроении //Л.: Машиностроение. – 1978.
27. Mazumder J. Laser welding: state of the art review. JOM 1982;34(7):16–24.
28. Малащенко А.А., Мезенов А.В. Лазерная сварка металлов – М.: Машиностроение, 1984. – 46 с.
29. Рыкалин Н. Н. и др. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов //м.: Машиностроение. – 1985. – Т. 496. – С. 3.
30. Андрияхин В. М. Процессы лазерной сварки и термообработки //М: Наука. – 1988.
31. Григорьянц А. Г. и другие "Лазерная техника и технология: Учебное пособие для вузов в 7 книгах / Под редакцией А. Г. Григорьянца; — М.: Высшая школа. — 1987. 1127 с.
32. Grigoryants A.G. Basis of laser Material Processing // CRC Press, Boca Raton (USA) Ann Arbor, Tokyo, London. — 1994.- 312 p.
33. Miyamoto I, Knorovsky GA. Laser microwelding. In: Zhou Y, editor. Microjoining and nanojoining. Abington: Woodhead Publishing Limited; 2008. Boca Raton: CRC Press LLC.
34. Na X. (ed.). Laser welding. – BoD–Books on Demand, 2010.
35. Havrilla D. Process fundamentals of industrial laser welding and cutting. Plymouth: Rofin-Sinar Inc.; 1999.
36. Dawes C. Laser welding: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2008.
37. Torkamany M. J. et al. The effect of process parameters on keyhole welding with a 400 W Nd: YAG pulsed laser //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2006. – Т. 39. – №. 21. – С. 4563.

38. Gao X. L. et al. Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets //Materials Characterization. – 2014. – Т. 93. – С. 136-149.
39. Janasekaran S. et al. Influence of the overlapping factor and welding speed on T-joint welding of Ti6Al4V and Inconel 600 using low-power fiber laser //Metals. – 2016. – Т. 6. – №. 6. – С. 134.
40. Слободян М.С. Управление свойствами соединений сплавов циркония.– Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 108 с.
41. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
42. Материалы для ядерных реакторов / Пер. с англ., под ред. Ю.Н. Сокурского. – Москва: Госатомиздат, 1963. – 386 с.
43. Уайэтт Л.М. Материалы ядерных энергетических установок / Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 256 с.
44. Герасимов В.В., Монахов А.С. Материалы ядерной техники. – М.: Энергоиздат, 1982. – 288 с.
45. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 408 с.
46. Малыгин В.Б. Эксплуатационные свойства материалов для обоснования проектов твэлов энергетических реакторов. – М.: МИФИ, 2007. – 124 с.
47. Выговский С.Б., Рябов Н.О., Семенов А.А. и др. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
48. Azarenkov N., Neklyudov I., Voyevodin V. Reactor materials-modern status //East European Journal of Physics. – 2012. – №. 1017 (3). – С. 4-18.
49. Nikulina A. V., Malgin A. G. Impurities and their effect on the structure and properties of zirconium parts in nuclear reactors //Atomic energy. – 2008. – Т. 105. – №. 5. – С. 328-339.
50. ТУ 95.166-98 Циркониевые сплавы в заготовках.

51. Никулин С. А. Циркониевые сплавы для ядерных реакторов //М.: Учеба. – 2007.
52. Калинин Б. А. Физическое материаловедение. Том 1: Физика твердого тела. – 2007.
53. Bollinghaus T, Herold H, editors. Hot cracking phenomena in welds. Berlin: Springer-Verlag; 2005.
54. Böllinghaus T. et al. (ed.). Hot cracking phenomena in welds II. – Springer Science & Business Media, 2008.
55. Lippold J, Böllinghaus T, Cross CE, editors. Hot cracking phenomena in welds III. Berlin: Springer-Verlag; 2005.
56. Boellinghaus T, Lippold JC, Cross CE, editors. Hot cracking phenomena in welds IV. Switzerland: Springer International Publishing; 2016.
57. Martínez R. L. et al. Hydrogen distribution study in Zircaloy-4 welded samples //Proceedings of a Technical Meeting 'Behaviour of high corrosion resistance Zr-based alloys'. Buenos Aires. – 2005. – С. 126-33.
58. 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. – Т. 350. – №. 2. – С. 195-201.
59. Une K., Ishimoto S. Crystallographic measurement of the β to α phase transformation and δ -hydride precipitation in a laser-welded Zircaloy-2 tube by electron backscattering diffraction //Journal of nuclear materials. – 2009. – Т. 389. – №. 3. – С. 436-442.
60. Kumar N. A. P. K., Szpunar J. A., He Z. Microstructural studies and crystallographic orientation of different zones and δ -hydrides in resistance welded Zircaloy-4 sheets //Journal of Nuclear materials. – 2011. – Т. 414. – №. 3. – С. 341-351.
61. Goncharov A. B. Mechanical properties and corrosion resistance of weld joints of zirconium and its alloys //Chemical and Petroleum Engineering. – 1988. – Т. 24. – №. 11. – С. 625-628.

62. Malakhova E. K., Kuzyukov A. N., Meshcheryakov A. V. Corrosion resistance of zirconium alloys in acetic acid environment //Khimicheskoe i Neftyanoe Mashinostroenie. – 1995. – C. 29-30.
63. Xue X. Y. et al. Influence of welding and subsequent vacuum annealing on corrosion resistance. of Zr-1Nb alloy //Rare Metal Materials and Engineering. – 2005. – T. 34. – №. 1. – C. 64-68.
64. 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. – №. 2. – C. 195-201.
65. Zaid B. et al. Microstructure and corrosion aspects of dissimilar joints of Zircaloy-4 and 304L stainless steel //Journal of materials engineering and performance. – 2013. – T. 22. – №. 3. – C. 854-862.
66. Cai C. et al. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – T. 77. – №. 1. – C. 621-628.
67. Cai C. et al. Weld bead size, microstructure and corrosion behavior of zirconium alloys joints welded by pulsed laser spot welding //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – T. 25. – №. 9. – C. 3783-3792.
68. Cai C., Li L., Peng G. Comparative study of oxides formed on fusion zone and base metal of laser welded Zr-1.0 Sn-1.0 Nb-0.1 Fe alloy //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – T. 28. – №. 2. – C. 1161-1172.
69. Yao Z. J. et al. Corrosion behavior of Zirconium R60702 weldment in 75 wt% sulfuric acid //Materials and Corrosion. – 2015. – T. 66. – №. 1. – C. 61-66.
70. Shankar A. R. et al. Corrosion of Zircaloy-4 and its welds in nitric acid medium //Corrosion Science. – 2007. – T. 49. – №. 9. – C. 3527-3538.
71. Zhang B. et al. Microstructure and corrosion behavior of Zr-702 joined by electron beam welding //Vacuum. – 2015. – T. 121. – C. 159-165.
72. 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.

73. Avilov V. V., Vicanek M., Simon G. Thermal diffusion in laser beam welding of metals //Journal of Physics D: Applied Physics. – 1996. – T. 29. – №. 5. – C. 1146.

74. Li X., Xie J., Zhou Y. Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet //Journal of materials science. – 2005. – T. 40. – №. 13. – C. 3437-3443.

75. Zhao C. X. et al. The effect of oxygen on transitional Marangoni flow in laser spot welding //Acta Materialia. – 2010. – T. 58. – №. 19. – C. 6345-6357.

76. Quintino L. et al. Gas shielding in fibre laser welding of high strength pipeline steel //Science and Technology of Welding and Joining. – 2011. – T. 16. – №. 5. – C. 399-404.

77. Sathiya P., Abdul Jaleel M. Y. Influence of shielding gas mixtures on bead profile and microstructural characteristics of super austenitic stainless steel weldments by laser welding //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – T. 54. – №. 5. – C. 525-535.

78. Yang S., Carlson B., Kovacevic R. Laser welding of high-strength galvanized steels in a gap-free lap joint configuration under different shielding conditions //Welding journal. – 2011. – T. 90. – №. 1. – C. 8.

79. Boukha Z. et al. Influence of CO₂-Ar mixtures as shielding gas on laser welding of Al-Mg alloys //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2013. – T. 44. – №. 13. – C. 5711-5723.

80. Nirsanametla Y. et al. Fiber laser welding in a controlled inert gas atmosphere: an experimental and numerical investigation //Lasers Based Manufacturing. – Springer, New Delhi, 2015. – C. 399-419.

81. Li K. et al. Investigation on the effects of shielding gas on porosity in fiber laser welding of T-joint steels //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – T. 77. – №. 9. – C. 1881-1888.

82. Elmer J. W. et al. The Effect of Ar and N₂ Shielding Gas on Laser Weld Porosity in Steel, Stainless Steel, and Nickel //Welding Journal. – 2015. – Т. 2015. – №. LLNL-JRNL-663819.
83. Keskitalo M. et al. Laser welding of duplex stainless steel with nitrogen as shielding gas //Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Т. 216. – С. 381-384.
84. Lai R. et al. Influence of absorbed nitrogen on microstructure and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel joint processed by fiber laser welding //Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Т. 231. – С. 397-405.
85. Ahn J. et al. The effect of Ar and He shielding gas on fibre laser weld shape and microstructure in AA 2024-T3 //Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Т. 29. – С. 62-73.
86. Wu S. K. et al. A study of the behavior and effects of nitrogen take-up from protective gas shielding in laser welding of stainless steel //Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Т. 34. – С. 477-485.
87. Vyskoč M., Sahul M., Sahul M. Effect of shielding gas on the properties of AW 5083 aluminum alloy laser weld joints //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – Т. 27. – №. 6. – С. 2993-3006.
88. Jeong D. H. et al. Fatigue characteristics of laser welded Zircaloy thin sheet //International Journal of Modern Physics: Conference Series. – World Scientific Publishing Company, 2012. – Т. 6. – С. 367-372.
89. Kim S., Lee W., Kim D. One-step distortion simulation of pulsed laser welding with multi-physics information //International Journal of Simulation Modelling. – 2015. – Т. 14. – №. 1. – С. 85-97.
90. Kim S. et al. Pulsed laser induced mechanical behavior of Zircaloy-4 //Journal of Materials Research. – 2015. – Т. 30. – №. 4. – С. 556-565.
91. Блащук В. Е. Цирконий: сплавы, сварка, применение (обзор) // Автоматическая сварка. – 2005. – №7. – С. 36–43.
92. Полетика Т. М., Нариманова Г. Н., Колосов С. В. Пластическое течение в сплавах циркония с гексагонально плотноупакованной решеткой на макро- и мик-

роуровнях // Известия Томского политехнического университета. – 2004.– Т. 307. – №4. – С. 126-128.

93. Клименко С. П., Грицина В. М., Петельгузов И. А. и др. Использование методов измерения термоЭДС и электросопротивления для исследования фазовых превращений в сплаве Zr1Nb // Вопросы атомной науки и техники. – 2007. – С. 142-148.

94. Петельгузов И. А., Савченко В. В., Мухин М. В. Влияние отжигов на механические свойства твэльных труб из сплава Zr1Nb на основе кальциетермического циркония // Вопросы атомной науки и техники. – 2006.– №1. – С. 86-91.

95. Ажажа В. М., Бутенко И. Н., Борц Б. В. и др. Сплав Zr1Nb для атомной энергетики Украины // Ядерна Фізика та енергетика. – 2007. – №3. – С. 67-75.

96. Nikulina A. V. et al. Irradiation-induced microstructural changes in Zr-1% Sn-1% Nb-0.4% Fe //Journal of Nuclear Materials. – 1996. – Т. 238. – №. 2-3. – С. 205-210.

97. Болдырев А. М. Управление кристаллизацией металла шва при сварке плавлением. – Воронеж: ВПИ, 1980. – 87 с.

98. Брюханов А. А., Бобров В. М., Тарасов А. Ф. Интегральные характеристики текстуры и анизотропия свойств поликристаллического циркония, деформированного холодной прокаткой // Физика металлов и металловедение. – 1996. – т. 82. – №6. – С. 71-75.

99. Решетников Ф. Г., Бибилашвили Ю. К., Головин И. С. Проблемы создания твэлов ВВЭР-1000 для работы в маневренных АЭС и повышенного выгорания // Атомная энергия. – 1988. – Т. 64. – в. 4, С. 258-266.

100. Справочник по редким металлам / пер. с англ., под ред. В. Е. Плющева – М.: Мир, 1965.

101. Лазерный аппарат для сварки ЛТА 4-2. Техническое описание и условия эксплуатации – М: Лазеры и аппаратура, 2007. – 27 с.

102. Elkin M. A., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. Pulsed laser welding of Zr1% Nb alloy //Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – Т. 51. – №. 3. – С. 776-783.

103. ANSI/AWS B4.0-2007 Standard Methods for Mechanical Testing of Welds.

104. ISO 6507-1:2018 Metallic Materials e Vickers Hardness Test e Part 1: Test Method.

105. ISO 22826:2005 Destructive Tests on Welds in Metallic Materials e Hardness Testing of Narrow Joints Welded by Laser and Electron Beam (Vickers and Knoop Hardness Tests).

Приложение А

(обязательное)

Pulsed laser welding of zirconium E110 alloy

Обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ01	Елкин Максим Александрович		

Консультант школы отделения (ОЭИ)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ ИШНКБ	Киселев А.С.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

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

1 The literature review

1.1 Specifics of laser welding

The processes of laser welding of various metals and alloys have been studied for half a century [15, 16]. However, development of a welding technology for each new combination of the type and the dimensions of joints as well as material compositions is still a difficult task.

To date, many guides and recommended practices for welding of reactive metals (titanium, zirconium and their alloys) have been developed [9, 17–23]. In general, they contain requirements for thorough preliminary cleaning of parts to be welded and welding consumables; proper shielding of a weld zone as well as setting the optimal welding parameters. There are no specific tables, graphs and other clear guidelines for setting welding parameters depending on a welding method, chemical composition of alloys, part sizes and a configuration of a joint. In this regard, firstly it is necessary to summarize information about influence of main welding parameters on the process and, as a result, properties of the welded joints. Only then, the welding technology could be intelligent developed in each specific case.

Concerning laser technology, welding processes are classified into two main types depending on the ratio of energy input to a volume of melted metals [9–11, 16, 24–36]. The first type, a conduction mode, is typical for welding thick-walled structures. A weld pool is formed due to dissipation of energy of a laser beam deep into the metals by thermal conductivity. The temperature of the weld pool is in the range between the melting and vaporization temperatures of the metals. Welds usually have a semi-circular cross-section with a small aspect ratio. The second type, a keyhole mode, is used for welding relatively small work-pieces. This type of welding processes uses high values of heat input, and temperatures on surface of weld pools can be more than the boiling point.

Besides this, laser welding processes are divided into continuous and pulsed modes. In the case of continuous energy input, the main technological parameters are beam diameter focused at a surface d , welding speed V and laser power P . For pulsed

modes, the determining energy parameters are pulse energy E , pulse duration τ , frequency f and peak power:

$$P_{peak} = E/\tau \quad (1.1)$$

All the above parameters are interdependent. Their values are determined by thickness of work-pieces to be welded, a configuration of a joint, thermo-physical and optical properties of materials. As mentioned above, considering that thickness of parts of nuclear fuel assemblies generally does not exceed 1 mm, the most rational technology of their joining is keyhole pulsed laser welding [9–11, 16, 24–36]. Therefore, it is necessary briefly to consider influence of these parameters on properties of welds.

Pulse energy is the main parameter of the process [16, 28–31, 35]. It determines the amount of heat generated in a weld zone. At low pulse energies, a diameter of a weld pool may be smaller than a diameter of a laser beam d due to non-uniform temperature distribution on surface of work-pieces. In turn, increase in pulse energy enhances both penetration depth and the diameter of the weld pool up to $(1,25..1,50) \cdot d$, while strength of joints varies along a curve with a maximum. Initially, it rises due to increase in dimensions of a fusion zone and then goes down because of decrease in area of the weld cross-section caused by evaporation and splashes of the metal [25, 28, 32].

Reactive vapor pressure takes place when pulse energy is excessive. It causes formation of geometric imperfections of the welded joints. Probability of burn-through or undercuts increases during keyhole welding of thin-walled work-pieces, for instance. Furthermore, protection of the weld zone by inert gases declines and oxidation of the surfaces is intensified. As a consequence, energy absorptivity increases, heat generation rises and quality of the welded joints becomes worse. With the optimal welding parameters, the metal is quickly heats up to the required temperature. Then, this temperature is maintained at the same level until the end of the pulse due to smooth decreasing in the amount of energy input. At the same time, heat spreads into the metal because of thermal conductivity, and metallurgical reactions occurs on the surface without intensive evaporation, extensive reactive vapor pressure and other non-equilibrium processes [32, 33].

Pulse duration determines a period while laser radiation has an effect on metal. The range of the optimum values of this parameter depends on pulse energy, thickness of work-pieces to be welded, a configuration of a joint. Relatively short duration is necessary for welding metals with high reflection coefficient and thermal conductivity because probability of splashes of the metal is high when energy input is too fast. Increased pulse duration heats up metal to a temperature higher than the melting point. This decreases the amount of undissolved gases in the weld pool and reduces porosity formation during crystallization. On the other hand, a part of energy lost due to thermal conductivity increases and, consequently, HAZ dimensions increases. Maximum penetration depth without splashes of the metal may be achieved using an optimal combination of increased pulse duration and reduced power density [16, 25, 28, 34].

Pulse frequency should be set taking into account the features of pulsed laser welds. When the welding process starts, the work-pieces are melted at one point during the first pulse. Then, the place where the laser beam interacts with the surface is shifted due to movement of the work-pieces or the welding head. The next pulse melts another metal volume while a considerable amount of energy is expended on reheating of a part of the previously welded metal. Overlapping factor of adjacent points OL is an important criterion affecting quality of the welds. It is determined by welding speed V , beam diameter d and frequency f by the following relationship:

$$OL = \frac{d \cdot V / f}{d} \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

The recommended OL values stated in different guidelines concerning pulsed laser welding differ from each other: 30..50 % [25, 31, 32], 50..60 % [16] and 50..70 % [35] – for welded joints without any specific requirements; 50..90 % [25, 31, 32], 70..80 % [34], 75..80 % [16] и ~70 % [35] – for pressure-tight welds.

Improving efficiency of pulsed laser welding is possible by increasing average power with the minimum pulse energy and the maximum frequency [28]. Because of high pulse repetition rate, the metal in a welding zone does not have time to cool down and heats up much quickly at subsequent pulses. However, this also causes changes in reflection coefficient and thermo-physical properties of the metal and, as a result, dimensions of

the welds and HAZ. In addition, time duration between pulses should be enough to dissipate metal plasma clouds. Otherwise, they defend the weld pool from the laser beam and, as a result, penetration depth decreases [31, 32]. It should be noted that numerous thermal cycles negatively affect metal structure, contribute to formation of discontinuities, high residual stresses and distortion when welding of two- or multiphase materials [37–39]. Hence, the most rational *OL* value is to be determined taking into account these changes in the weld metal and HAZ.

1.2 Welding of zirconium alloys

Quite high requirements are imposed on structural materials from which it is possible to manufacture fuel elements and spacer grids: corrosion resistance, neutron capture cross section, resistance to radiation and mechanical properties at high temperatures. Materials are affected by fuel, high temperature, chemically aggressive environment, all of which add up to extremely difficult operating conditions [1, 2]. Beryllium, magnesium, aluminum, austenitic stainless steels and zirconium satisfy these conditions most fully [40].

However, the use of beryllium is limited by its high cost due to the small distribution of the ore, as well as the significant difficulties in production and machining. The use of aluminum and its alloys is possible only in low-temperature nuclear reactors due to a significant decrease in mechanical properties and corrosion resistance at high operating temperatures. Magnesium alloys have poor corrosion resistance in contact with pressurized water. The operation of fuel assembly parts made of beryllium is limited by its extremely low ductility and toxicity.

The most widely used for the manufacture of elements of nuclear reactors are zirconium alloys and stainless steels [5], as they most satisfy the following requirements [41]:

- minimal parasitic neutron capture;
- mechanical reliability, shape and size constancy;
- high thermal conductivity, ensuring long-term heat transfer without excessively high thermal stresses in the sheath;

- corrosion and erosion resistance of the sheath in the coolant and in contact with the nuclear fuel of the fuel element.

Zirconium alloys are used in the most common thermal neutron (water-cooled) nuclear reactors, as well as in ship nuclear power plants that operate at temperatures up to 300 degrees: E110, E125 and E635 (Russia); Zircaloy-2, Zircaloy-4 and ZIRLO (USA); Zr-2.5%Nb (Canada, Germany); M4 and M5 (France); MDA and NDA (Japan), HANA (South Korea), etc. [40, 42–48].

The specificity of zirconium alloys is strong influence of impurities in the metal on its performance properties [49]. Due to this fact, the maximum concentration of impurities in Zr-Nb alloys is regulated by the standard [50], but, for instance, the content of widely used E110 alloy (Zr-1%Nb) is much lower in most cases [51]. Rolled metal of E110 alloy is supplied in recrystallised annealing condition. It has microstructure, which includes α -Zr matrix with Nb precipitations (grain size of 3-4 μm) and β -Nb with size 40-60 μm . Presence of β -Zr as well as metastable α' -Zr and ω -Zr is undesirable, because it significantly decreases corrosion resistance and deteriorates another characteristics [51]. It should be noted that the values of tensile strength of the Zr-Nb, alloys used for nuclear fuel assemble production are unstable due to non-isotropic nature of the metal. This parameter also depends even on minor changes in chemical and phase composition, microstructure and texture. The allowable range of tensile strength at room temperature is considered to be 400-800 MPa [51, 52].

Complex metallurgical processes including interaction with gases take place during fusion welding. High concentration of hydrogen, oxygen, nitrogen and carbon in weld metal impairs mechanical properties and corrosion resistance of welded joints. Also, it contributes to formation of hot and cold cracks [53–56].

Regrettably, few results have been published about contamination of zirconium alloys with atmospheric gases during welding. Furthermore, the published data is fragmentary and sometimes contradictory. For instance, cracks formation in a joint of Zircaloy-4 plates made by diffusion welding (vacuum, 800 °C) was induced by hydrogen during an autoclave corrosion test in superheated steam at 400 °C [57]. The main cause was a combination of residual stresses and contamination of the weld metal with hydrogen, oxygen

and carbon. Zircaloy-4 welds made by plasma arc and gas tungsten arc welding (GTAW) were studied in [58]. Contents of oxygen, nitrogen and hydrogen in the weld metal met the requirements of the standard [7].

In [59] hydrogen saturation of welded joints made by vacuum electronbeam welding was investigated. The samples were made of Zircaloy-4 and experimental zirconium alloys with different chromium contents. Chromium alloying had a negative effect on the amount of absorbed hydrogen during an autoclave corrosion test because of second phase particles $Zr(Fe, Cr)_2$ were in α -Zr matrix and facilitated hydrogen uptake. Formation of hydrides with forced hydrogen saturation of Zircaloy-2 welds made using a CO_2 -laser and Zircaloy-4 welds made by resistance upset welding were investigated in [59] and [60] respectively. However, no data on initial hydrogen content in the welds was published.

In addition to hydrogen uptake, there was a problem of reduced corrosion resistance of welds [61–69] that was impossible to improve even by subsequent heat treatment [61, 63, 67]. High corrosion resistance of welded joints was found only after electron beam welding of Zircaloy-4 [70] as well as electron-beam [71] and laser [72] welding of commercially pure zirconium. Corrosion resistance of E110 alloy welds made by GTAW decreased in all investigated cases [61–63]. The reasons were changes in microstructure, residual stresses and insufficient shielding of a weld zone by inert gas flows. At present, it is impossible to determine how strong each of these factors affects corrosion resistance of zirconium alloy welds because of the lack of a complete data set for comparison. In particular, there is no data on chemical composition of the weld metals as well as properties of the surface layers of the welds in all cited publications [63–72]. At the same time, pulsed laser welding of zirconium alloys in a chamber with shielding gases deteriorated corrosion resistance of the welds too [66–68].

With the exception of GTAW [61–63] data on corrosion resistance of E110 alloy welds has not been found during this investigation.

1.3 Shielding of welding zone

Usually, molten metal is shielded by inert gas flows during laser welding. The main requirements for shielding gas supply systems are [9–11, 16, 24–36]: effective reduc-

tion of the shielding effect of metal plasma clouds; total air displacement from a weld zone; maximum removal of vapor and splashes; prevention of metal oxidation; formation of imperfections such as pores, cavities, undercuts, etc.

Due to the fact that zirconium alloys are reactive, it is necessary to use the highest purity gases. In addition to the weld pool shielding, great attention should be paid to protect back side and HAZ from the environment. However, there are no clear guidelines how to select the optimal shielding gas compositions (Ar, He or their mixture) and flow rates; configuration and inclination angle of nozzles as well as distance from the nozzles to the weld zone. At that, it is well known that these parameters produce considerable effect on the formation of joints as well as onto their properties [73–87]. In [88–90] argon flow rate was increased up to 60 l/min during pulsed laser welding of Zircalloys in order to reduce metal contamination, although usually recommended flow rates are much lower: from 15...18 l/min [31] to 30...45 l/min [35]. A chamber was used for pulsed laser welding alloys of Zircaloy [66] and Zr-1,0%Sn-1,0%Nb-0,1%Fe alloy [67, 68], but that greatly reduced efficiency of the welding process. However, no published experimental data on laser welding of Zr-Nb alloys has been found while doing this research.

4 Results of the study

The dependences of weld width as well as tensile strength of the joints on welding parameters are shown in Figure 4.1-4.3. They coincide qualitatively with the fundamentals [15, 16, 35, 36]. In the range of values studied, simultaneous increase in pulse energy and welding speed leads to linear increase in weld width and uniformity of depth penetration (Figure 4.1).

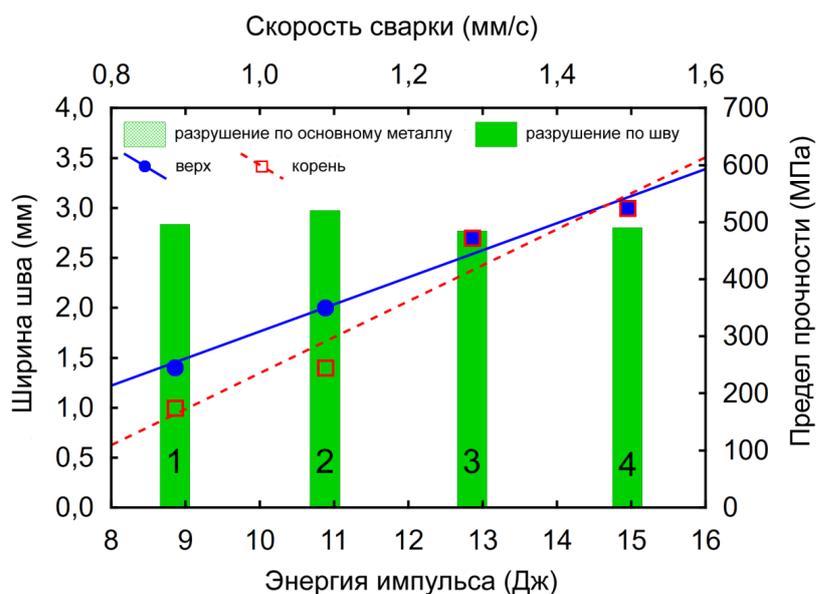


Figure 4.1 – Dependence of weld width and tensile strength of joints on pulse energy and welding speed (modes 1, 2, 3, 4 table 3.1)

Simultaneous increase in pulse duration and its energy does not affect welds width on the upper side, but uniformity of penetration decreases due to heat losses to the base metal by thermal conductivity (figure 4.2).

Increase in pulse frequency also does not affect weld width from the upper side, but the uniformity of depth penetration increases due to higher residual temperature between pulses (figure 4.3).

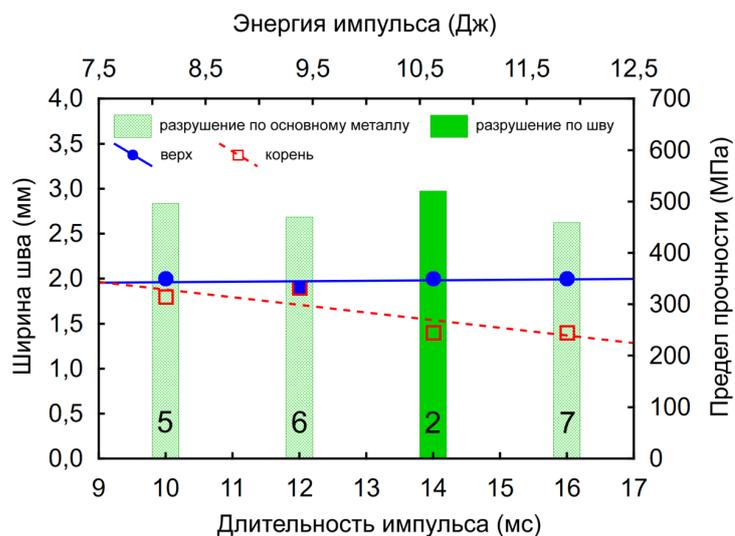


Figure 4.2 – Dependence of weld width and tensile strength of joints on pulse duration and its energy (modes 5, 6, 2, 7 table 3.1)

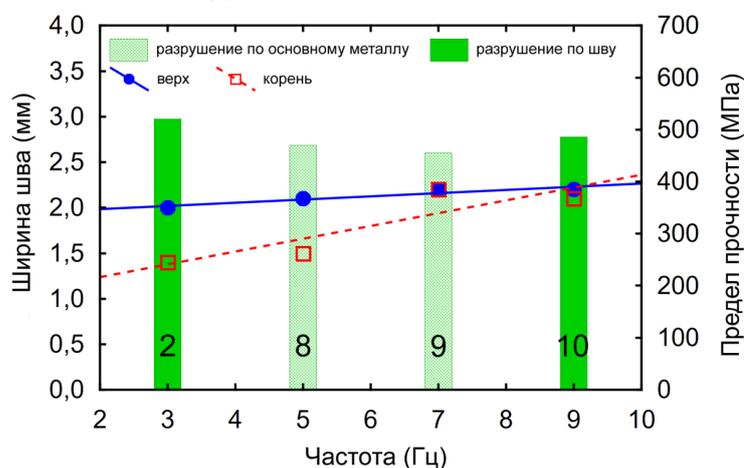
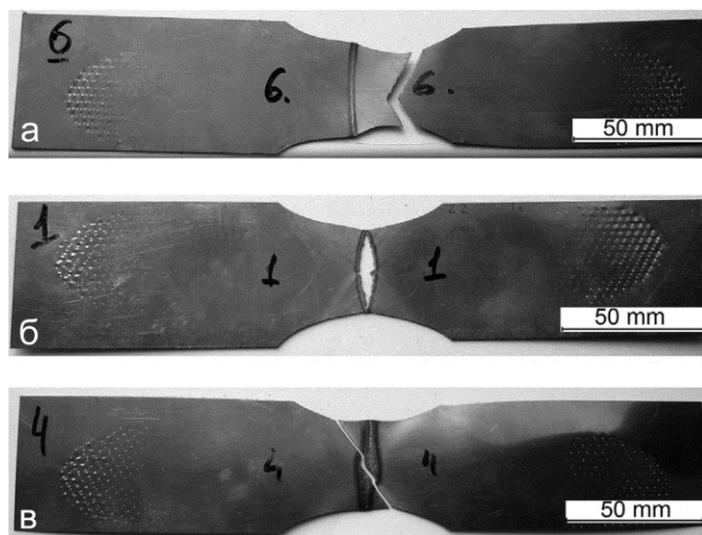


Figure 4.3 – Dependence of weld width and tensile strength of joints on frequency (modes 2, 8, 9, 10 table 3.1)

It should be noted that there is no relationship between welding parameters and tensile strength of the joints in all cases studied.

Five specimens failed along the base metal (modes 5, 6, 7, 8 and 9, figure 4.4a), and other five through the welds: along the weld axis for modes 1 and 2 (figure 4.4b), as well as through the weld and the base metal for modes 3, 4 and 10 (figure 4.4c).



a – through the base metal; б – along the axis of the weld; B – through the weld and the base metal

Figure 4.4 – Types of welded joints failure (modes 5, 6, 2, 7 table 3.1)

The values of tensile strength for specimens failed through the beads (486e520 MPa) are slightly larger than for specimens failed through the base metal (455e496 MPa), but all of these are within the allowable range [51, 52]. Most probably, by analogy with titanium alloys [16], this is caused by the saturation of the metal with gases from the atmosphere. Double-sided protection of the welding zone and increased flow rates of high purity argon did not prevent contamination of the metal. This hypothesis is confirmed by dark discoloration along the welds (figure 4.4B) and the results of EDS analysis of the welded metal after failure during the tensile test (table 4.1). Oxygen content is up to 61.5% by mass, and nitrogen is up to 8.81% by mass

Table 4.1 – Chemical composition of the welded metal after failure during the tensile test according to the results of EDS analysis

Mode	Element (mass, %)			
	Zr	Nb	O	N
1	31,65	0,98	61,50	5,86
2	82,83	1,10	12,01	4,06
3	75,06	1,08	18,84	5,01
4	63,83	1,44	25,92	8,81
10	88,05	0,75	8,87	2,33

Information on the presence of imperfections in the welded joints is summarized in table 4.2, examples are shown in figure 4.5. Some imperfections were identified for ele-

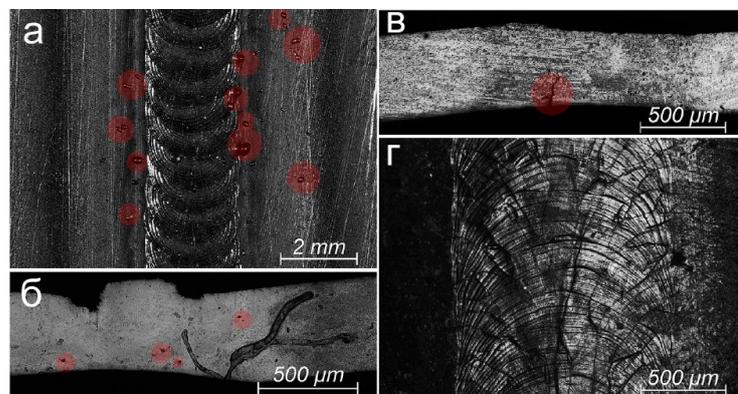
vated values of heat input (modes 3, 4, 7, 8, 9 and 10). For high values of pulse energy (modes 3 and 4), spatter on bottom surface was observed in addition to contamination with gases (figure 4.5a).

Table 4.2 – Imperfections in welded joints.

Type of imperfections	Welding mode									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spatter (bottom surface)			+	+						
Local intermittent undercuts								+		
Gas pores and cavities								+		
Longitudinal microcracks	+									+
Branching microcracks	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Local intermittent undercuts, gas pores and cavities were also detected on the cross-section of the weld made using mode 8 (figure 4.56). The most likely cause of this fact was poor fit-up and increased shielding gas flow rate during welding [16, 35, 36]

The main problem of pulsed laser welding of E110 alloy according to the proposed technology was the presence of microcracks, which can be visible only using microscopes. Longitudinal microcracks along the edges of the weld and in the center of the weld were detected (mode 10, figure 4.5B). The main cause of cracking along both sides of the weld using mode 1 is a small volume of the molten metal because of extremely low pulse energy. The features of laser welding are very high cooling rate of the metal and a narrow zone where plastic deformation is possible. When the amount of input energy is less than the optimum range of values, cooling rate exceeds the allowable limit and a brittle quenching martensitic structure with extremely high residual stresses is formed.

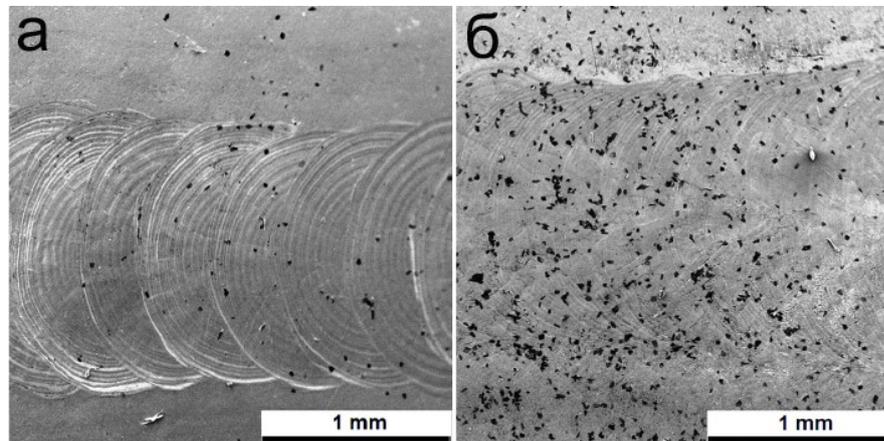


a – Spatter; б – Gas pores, cavities and undercuts; B – Longitudinal microcracks; Г – Branching microcracks.

Figure 4.5 – Typical imperfections of welded joints

Branching microcracks were also found on all welds, which can only be seen under a microscope. The most typical example is shown in Figure 4.5d.

When examining the surface with an electron microscope, dark inclusions were found, and their number increased significantly with increasing heat input (figure 4.6).



a – mode 5; б – mode 8 (table 3.1)

Figure 4.6 – Weld surface

The surface inclusions were chemical compounds in which zirconium was only a few percent and niobium was hundredths of a percent. Chemical composition of the black surface inclusions was (zone 005 figure 4.7): 7.39% zirconium, 0.03% niobium, 17.53% oxygen, 25.92% nitrogen and 49.13% carbon. The smaller white ones (zone 006 figure 4.7) had 5,06% zirconium, 0,06% niobium, 29,49% oxygen, 19,82% nitrogen and 45,57% carbon.

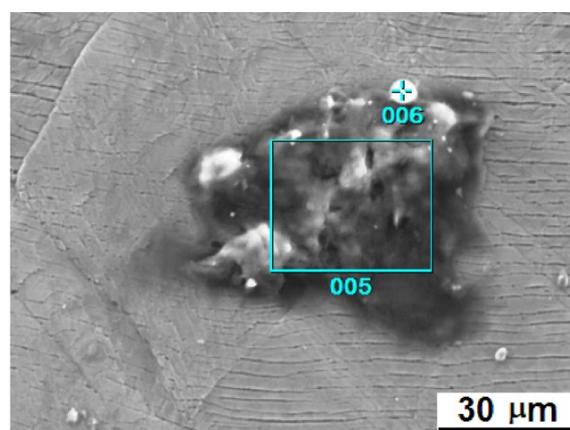
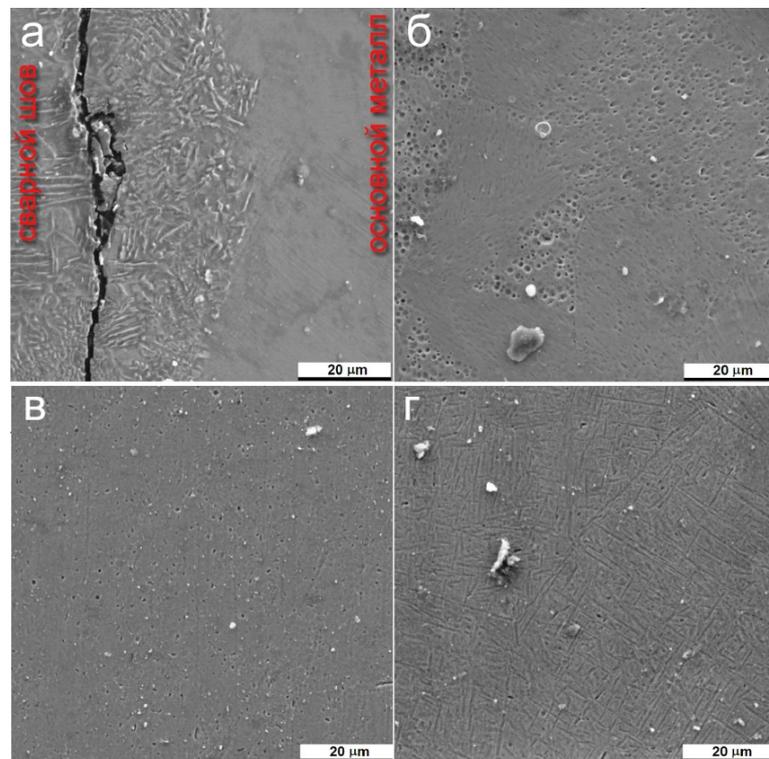


Figure 4.7 – Zones of inclusions analysis

Weld metal microstructure are shown in figure 4.8. When welding using mode 1, the microstructure largely consisted of a brittle quenching martensitic α' -phase having a needle structure (figure 4.8a). In addition, longitudinal microcracks along the both weld edges were revealed. They formed because of a very small volume of the molten metal due to extremely low pulse energy. Extra high cooling rate and narrow zones of possible plastic deformation produced these effects. Change of welding parameters in the direction of heat input increasing caused formation of a plate-shaped microstructure (mode 2, figure 4.8б). More rational heat input enabled to have the weld metal microstructure commensurate with the base metal (mode 5, figure 4.8в). When increased heat input, the weld metal microstructure had typical basket-weave morphology (mode 10, figure 4.8г).

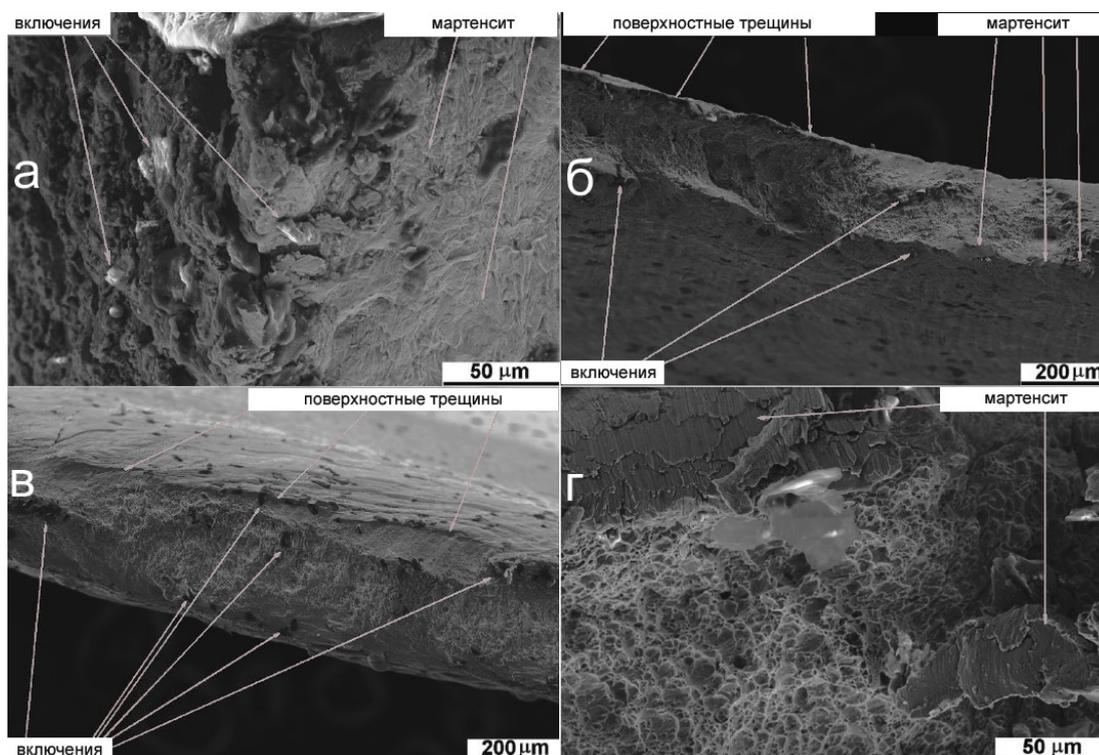


a – mode 1; б – mode 2; в – mode 5; г – mode 10.

Figure 4.8 – Weld metal microstructure

In order to gain a deeper understanding of the effect of welding energy parameters on the properties of the welded joints, using an electron microscope, fractograms of the fracture surfaces of specimens fractured along the weld metal were also examined (figure 4.9). Failures of all these welds were in a ductile-brittle manner. Stress raisers were martensitic plates, surface microcracks and chemical inclusions. These inclusions had spread

in whole volume of the weld metal because of numerous thermal cycles repeatedly remelting and remixing previously formed parts of the welds.



а – mode 1; б – mode 3; в – mode 4; г – mode 10.

Figure 4.9 – Fractography of fracture surfaces

Figure 4.10 shows the samples after the corrosion test. The oxide film was black on the base metal (typical for a protective high-strength ZrO layer). However, all welds were covered by a light color layer (typical for loose ZrO₂). The thickness of the oxide layers was influenced by heat input algorithm.

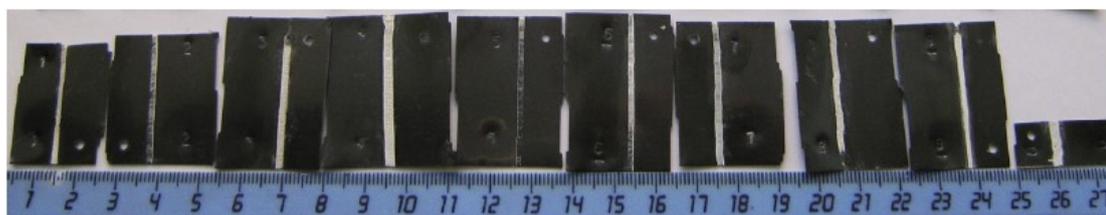


Figure 4.10 – Samples after corrosion test

An increase in pulse energy in the investigated range caused an increase in hydrogen absorption rate. An increase in pulse duration reduced both initial hydrogen content in the welds and hydrogen absorption rate. There were no pronounced dependences between pulse frequency and initial hydrogen content in the welds as well as its absorption rate.

The main findings were defined on the basis of the presented results analysis. Total amount of contamination with the gases were more than 50% in all investigated cases. The absorbed gases partially transformed into the inclusions up to several tens of micrometers in size which were complex chemical compounds with a predominance of oxygen, nitrogen and carbon. An increase in heat input during welding due to an increase in pulse energy or frequency caused a higher density of the inclusions per surface area.

Morphology and depth of the surface microcracks on the welds that formed along and within the grain boundaries as well as low hydrogen content in the weld metal made it possible to classify them as hot solidification cracks. There are many factors causing their appearance: chemical composition and structure of alloys, grain sizes, heat input during welding, etc. In studied case, the main causes were the weld metal contamination and its multiple reheating. The microcracks were found simultaneously with a significant level of contamination of the metal surface layer with the gases for all investigated welding modes.

There was no relationship between energy input algorithm and tensile strength of the welded joints in all investigated cases.

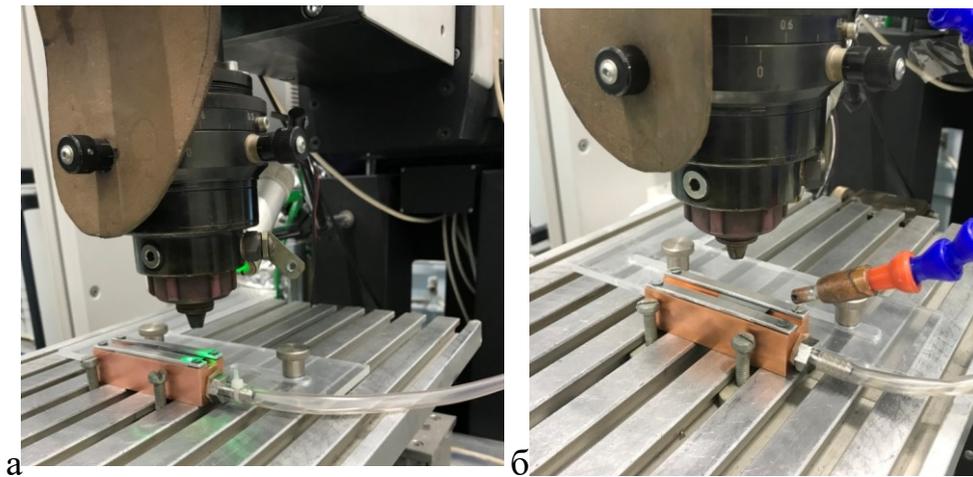
It is known that hydrogen absorption by metals is a multiphase process which includes adsorption, dissolving and diffusion. Presence of an oxide layer of ZrO on the surface of zirconium alloys is an essential barrier protecting the metal from the environment including hydrogen absorption. However, any surface defects of this layer (including cracks) reduce the protective properties. Surface imperfections, residual stresses, presence of martensitic phases and chemical contamination significantly deteriorate corrosion resistance of zirconium alloys. Unfortunately, all investigated welds had these discontinuities and, as a result, decreased corrosion resistance.

Since all of the above clearly points to flaws in the scheme for protecting the laser welding process from the environment, it was decided to conduct a new series of experiments aimed at determining the optimal method for supplying protective gas. The main adjustable parameters in these studies were the argon flow rate and the protection scheme presented in the table 4.3.

Table 4.3 – Laser welding process protection modes

№	Protection schemes	Nozzle		Root protection		Side protection	
		Shielding gas	Flow rate l/min	Shielding gas	Flow rate l/min	Shielding gas	Flow rate l/min
1	scheme 1	Ar	12	Ar	8	-	
2			16		10		
3			20		12		
4			24		14		
5	scheme 2		12		8	Ar	12
6			16		10		16
7			20		12		20
8			24		14		24

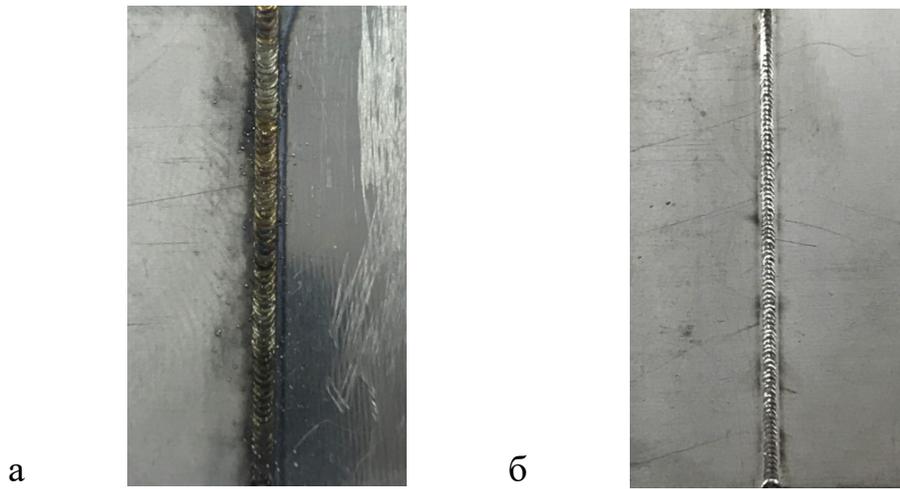
The first protection scheme was carried out as follows: to the factory scheme, in which gas is supplied to the nozzle of the apparatus, jet protection of the weld root was added by supplying gas through the holes of the copper forming lining (figure 4.11a). In the second scheme, in addition to adding a lining, they added side protection by blowing the cooling part of the seam through a flexible nozzle (figure 4.11б).



a – mode 1; б – mode 2;

Figure 4.11 –Protection modes

When using scheme 1 during visual inspection the same defects were observed as in the previous series of experiments: discoloration, significant spatter at the root of the weld, surface cracks (figure 4.12a). On samples using scheme 2 in modes 5 and 6 (figure 4.12.б, table 4.3) no indicated defects were observed by inspection through an optical microscope. A further increase in flow rate in modes 7, 8 apparently led to a turbulent gas flow and the above defects were observed even to a greater extent than in scheme 1.



a – mode 1; б – mode 6 (table 4.3)

Figure 4.12 – Samples obtained using new protection schemes

For a final understanding of the mechanisms of defect formation during laser welding of the E110 zirconium alloy, a repeated study of defect-free samples according to the technique considered in the study is required. In addition, the most rational compositions of shielding gases (Ar, He or a mixture thereof) and flow rates, the configuration and angle of the nozzles, as well as the distance from the nozzles to the welding zone, must be determined in order to minimize contamination of the metal by atmospheric gases. This will be a further direction of research on the topic under consideration.