

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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – Физика конденсированного состояния
Отделение школы (НОЦ) – Экспериментальной физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Испарение и перенос атомов на границе раздела фаз в сплаве 1370 при электронно-лучевой сварке

УДК 621.791.722

Студентка

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Байдикова Н.В.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
руководитель НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская Марина Витальевна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2018 г.

Результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Универсальные компетенции		
P1	Понимать необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-7), критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Свободно владеть русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС (ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС (ОК-8, ОК-9, ПК-14, ПК-19), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОК-4, 5, ПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEAN</i>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Профессиональные компетенции		
P7	Проявлять глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-1), критерий 5 АИОР, требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P8	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области физики с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределённости.	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7,9). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P9	Принимать активное участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики конденсированного состояния и материаловедения, разработке новых методов изучения материалов.	Требования ФГОС (ПК-2), критерий 5 АИОР с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Заниматься научно-педагогической деятельностью, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии в области физики.	Требования ФГОС (ПК-18, 19, 20). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда, определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-19, ПК-23, ПК-27, ПК-30, ПК-31, ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P12	Самостоятельно выполнять научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных потоков заряженных частиц на вещество, а также оптимизации параметров обработки с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-19, ПК-23, ПК-27, ПК-30, ПК-31, ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – Физика конденсированного состояния
 Отделение школы (НОЦ) – Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студентке:

Группа	ФИО
ОБМ61	Байдиковой Наталье Владимировне

Тема работы:

Испарение и перенос атомов на границе раздела фаз в сплаве 1370 при электронно-лучевой сварке
--

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Алюминиевый сплав 1370 (АД37) системы Al-Mg-Si-Cu
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Радиационный разогрев, фазовые превращения и перенос атомов в металлических материалах при воздействии пучка ускоренных электронов (обзор). 2. Материалы и методы исследования 3. Поле температур и фазовые превращения при сканировании пучка электронов по поверхности твёрдого тела 4. Результаты исследования образцов сплава 1370 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 6. Социальная ответственность 7. Раздел, выполненный на иностранном языке

Перечень графического материала	1) Пути эвакуации 2) План размещения светильников на потолке рабочего помещения
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент ОСГН ШБИП, к.э.н. Верховская Марина Витальевна
Социальная ответственность	профессор, д.т.н. Федорчук Юрий Митрофанович
Раздел на иностранном языке (Приложение А)	старший преподаватель Кабрышева Оксана Павловна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Глава 2. Экспериментальное оборудование и методы исследования	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	09.02.17
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
руководитель НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Кривобоков Валерий Павлович	д.ф.-м.н.		

Задание приняла к исполнению студентка:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Байдикова Наталья Владимировна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТИ
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Группа	ФИО
ОБМ61	Байдикова Наталья Владимировна

Студентка:

Школа	ИЯТ	Отделение	ЭФ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	03.04.02 Физика конденсированного состояния вещества

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

- 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих*
- 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов*

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

- 1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения*
- 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований*
- 3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

- 1. Оценка конкурентоспособности технических решений*
- 2. Матрица SWOT*
- 3. График проведения и бюджет НИ*
- 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ*
- 5. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования*
- 6. Сравнительная эффективность разработки*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание приняла к исполнению студентка:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Байдикова Наталья Владимировна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студентке:

Группа	ФИО
ОБМ61	Байдиковой Наталье Владимировне

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Кафедра	ЭФ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	03.04.02 Физика конденсированного состояния вещества

Тема диссертационной работы: Испарение и перенос атомов на границе раздела фаз в сплаве 1370 при электронно-лучевой сварке

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Цель данной работы состоит в том, чтобы получить закономерности развития тепловых процессов, массопереноса в зависимости от параметров электронного пучка.

1. Описание рабочего места на предмет возникновения:

- а) вредных проявлений факторов производственной среды (производственный шум, микроклимат, освещенность, ионизирующее излучение в рабочей зоне);
- б) опасных проявлений факторов производственной среды (различной природы).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
- предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).

2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- механические опасности (источники, средства защиты);
- термические опасности (источники, средства защиты);
- электробезопасность (в том числе статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);
- пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

3. Охрана окружающей среды:

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

4. Защита в чрезвычайных ситуациях:

- перечень возможных ЧС на объекте;
- выбор наиболее типичной ЧС: 1) сильные морозы и 2) попытка несанкционированного проникновения посторонних на рабочее место;
- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.

5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	
Перечень графического материала: 1) Пути эвакуации 2) План размещения светильников на потолке рабочего помещения	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.2018

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		26.02.2018

Задание приняла к исполнению студентка:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Байдикова Наталья Владимировна		26.02.2018

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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) - Физика конденсированного состояния
Уровень образования - Магистр
Отделение школы (НОЦ) - Экспериментальной физики
Период выполнения - (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

Испарение и перенос атомов на границе раздела фаз в сплаве 1370 при электронно-лучевой сварке магистерская диссертация
--

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
28.02.18	1. Литературный обзор	20
15.03.18	2. Материалы и методы исследования	20
30.03.18	3. Поле температур и фазовые превращения при сканировании пучка электронов по поверхности твёрдого тела	20
10.04.18	4. Результаты исследования образцов сплава 1370	15
15.04.18	5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
30.04.18	6. Социальная ответственность	15
15.05.18	7. Раздел, выполненный на иностранном языке	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
руководитель НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Кривобоков Валерий Павлович	д.ф.-м.н., профессор		

СОГЛАСОВАНО:

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

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 110 с., 26 рис., 27 табл., 63 источника литературы, 1 приложение.

Ключевые слова: электронный пучок, сварка, функция энерговыделения, скорость охлаждения, фазовый состав, элементный состав, алюминиевый сплав 1370.

Объектом исследования являются процессы миграции атомов в сплаве 1370 во время электронно-лучевой сварки на границе раздела фаз.

Цель работы состоит в том, чтобы установить основные закономерности тепломассопереноса в сплаве при воздействии пучка ускоренных электронов. Основное внимание уделено изучению процессов плавления, испарения атомов и их миграции вблизи границы раздела жидкой и твёрдой фаз в зависимости от параметров электронного пучка.

В работе исследовано поле температур в сплаве 1370 при воздействии остросфокусированного электронного пучка с учётом потерь тепла на фазовые превращения. Выполненные расчёты позволили определить время существования жидкой фазы, глубину и геометрию шва, характерные скорости охлаждения, рассчитать испарившуюся массу на единицу длины шва.

Первая глава представляет собой обзор, в котором рассмотрены процессы взаимодействия электронного пучка с веществом при электронно-лучевой сварке и сопутствующие явления.

Вторая глава посвящена описанию исследуемого материала, аналитического оборудования и некоторых методов исследований, использованных в работе.

В третьей главе рассмотрено уравнение теплопроводности с учётом потерь тепла на фазовые переходы, начальные и граничные условия. Решена задача о пространственно-временном изменении поля температур.

В четвертой главе представлены данные, относящиеся к экспериментальной проверке выполненных расчётов.

Пятая и шестая главы содержат анализ экономического обоснования выполненного исследования и требования к технике безопасности при работе с электронно-лучевой установкой.

Содержание

Введение.....	14
1. Радиационный разогрев, фазовые превращения и перенос атомов в металлических материалах при воздействии пучка ускоренных электронов (обзор).....	17
1.1 Особенности взаимодействия пучков ускоренных электронов с веществом.....	17
1.2 Основные свойства электронно-лучевой сварки.....	19
1.3 Тепловые процессы в веществе при облучении пучками электронов....	21
1.4 Роль испарения и сегрегационных явлений в формировании физических и механических свойств шва.....	25
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	30
2.1 Исследуемый сплав 1370 (АД37) системы Al-Mg-Si-Cu.....	30
2.2 Оборудование для электронно-лучевой сварки.....	31
2.3. Взвешивание образцов	35
2.4. Измерение твердости по методу Виккерса.....	36
2.5 Метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии	37
3. Поле температур и фазовые превращения при сканировании пучка электронов по поверхности твёрдого тела	38
3.1. Модельные представления о процессе диссипации энергии пучка	38
3.2 Уравнение теплопроводности, начальные и граничные условия, условие на границе раздела фаз, функция энерговыделения, исходные данные	41
3.3 Расчёт пространственного распределения поля температур в зоне расплава.....	44
Выводы.....	52
4. Результаты исследования образцов сплава 1370	53
4.1. Исследование механических характеристик.....	53
4.2. Результаты металлографического исследования.....	54
Заключение	56
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	57

5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	57
5.2. SWOT-анализ.....	58
5.3. Планирование научно-исследовательских работ	61
5.3.1. Разработка графика проведения научного исследования.....	61
5.4. Бюджет научного исследования	65
5.5. Организационная структура проекта	69
5.6. Матрица ответственности	70
5.7. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	71
6. Социальная ответственность.....	75
6.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	76
6.1.1. Микроклимат.....	77
6.1.2. Расчет искусственной освещенности рабочего места.....	79
6.1.3 Ионизирующее излучение в рабочей зоне	83
6.2 Анализ выявленных вредных факторов производственной среды.....	85
6.2.1. Электробезопасность.....	85
6.2.2 Пожарная и взрывная безопасность.....	88
6.3. Охрана окружающей среды	91
6.4. Защита в чрезвычайных ситуациях.....	92
6.5. Правовые вопросы обеспечения безопасности.....	93
Выводы	93
Список литературы	95
Приложение А	101

Введение

Актуальность темы. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) нашла широкое применение в машиностроительной промышленности и, в частности, в космическом приборостроении. Она обладает значительными преимуществами как эффективное средство для соединения деталей практически из любых металлических материалов. Источник энергии в виде пучка ускоренных электронов сконцентрирован в малом пространстве (диаметр его составляет десятые или даже сотые доли миллиметра), генерируется и транспортируется в вакууме и это создаёт благоприятные условия для прецизионной сварки без влияния неблагоприятных факторов газовой атмосферы.

Особенно эффективной подобная сварка бывает, если требуется большая плотность мощности пучка ($10^6 - 10^9$ Вт/см²), например, при соединении тугоплавких материалов. Такая концентрация энергии достигается специальными методами и устройствами фокусировки пучка и делает возможным производить сварку с недостижимыми для других методов параметрами (например, возможно отношение ширины к глубине проплавления 1:50). Глубокое проплавление свариваемых изделий при низких значениях погонной энергии (расход её для ЭЛС на единицу длины шва) приводит к повышенной скорости кристаллизации малой по объёму сварочной ванны. Это, в свою очередь, делает мелкодисперсной структуру шва, создаёт особые условия для миграции легирующих атомов на границе раздела фаз на периферии сварочной ванны, влияет на режим испарения её поверхности [1].

Размеры, конфигурация и механизм формирования шва при ЭЛС определяются характеристиками парового канала, которые в свою очередь зависят от мощности, эффективного радиуса, угла сходимости луча, скорости его сканирования, теплофизических свойств материала. Можно утверждать,

что явления переноса атомов оказывают значительное влияние на элементный состав шва и его прочностные свойства.

Несмотря на очевидную значимость механизмов переноса атомов как в паровой, так и в жидкой фазах сварочной ванны для состава и механических свойств шва, эти вопросы изучены пока недостаточно.

Объектом исследования служили процессы тепломассопереноса и механические свойства швов при ЭЛС алюминиевого сплава 1370, широко распространённого в космическом приборостроении.

Цель работы состоит в исследовании взаимодействия пучка ускоренных электронов со сплавом 1370 в режиме ЭЛС, а также явлений переноса атомов в паровой и жидкой фазах. В соответствии с ней в диссертационной работе рассмотрены следующие задачи:

- поглощение энергии пучка электронов сплавом 1370 при сварке, радиационный разогрев, диссипации энергии пучка;
- построение модели теплопереноса; получение пространственно-временного распределения поля температур, глубины проплавления, скорости охлаждения в зависимости от параметров пучка;
- изучение самодиффузии алюминия и миграции атомов легирующих элементов в сварочной ванне;
- испарение атомов из сварочной ванны;
- элементный состав и механические свойства шва;
- экономические аспекты работы;
- вопросы социальной ответственности.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели были использованы методы математического моделирования процессов диссипации энергии.

Личный вклад автора заключается в сборе и обработке материалов исследований, выполнении работ по математическому моделированию диссипации энергии электронного пучка.

Научная новизна работы состоит в том, что решена задача об эмиссии атомов с поверхности сплава при ЭЛС в режиме испарения и миграции в результате диффузии в расплаве. Сделана оценка влияния этих процессов на состав шва и его механические свойства (микротвёрдость).

Практическая значимость. Проверено качество математической модели диссипации энергии пучка, получены полезные данные о состоянии поля температур вокруг сварочной ванны.

1. Радиационный разогрев, фазовые превращения и перенос атомов в металлических материалах при воздействии пучка ускоренных электронов (обзор)

Вопрос о механизме диссипации энергии пучка ускоренных электронов, фазовых превращениях и переносе атомов имеет большое значение для ЭЛС. Ниже изложены некоторые важные закономерности явлений, которые имеют место в металлических материалах при воздействии электронного пучка. Данный раздел позволит нам уточнить задачи и программу исследований настоящей работы.

1.1 Особенности взаимодействия пучков ускоренных электронов с веществом

Пучки ускоренных электронов получили широкое распространение в таких областях как медицина, биология, физика твёрдого тела, материаловедение. С их помощью обрабатывают изделия и материалы, изменяя их форму, физико-химические и механические свойства. Они вносят в твердое тело энергию, которая расходуется на возбуждение атомов, ионизацию, образование радиационных дефектов, нагрев, и как следствие, изменение фазовой структуры.

В настоящей диссертации под словом «пучок» понимается поток частиц, движущихся по близким траекториям в одном направлении, обычно имеющий малые поперечные размеры по сравнению с его длиной. При этом частицы вдоль направления распространения пучка движутся со скоростью, значительно превышающей скорость их хаотического теплового движения [2].

Применение пучка заряженных частиц для технологической обработки материалов и изделий предполагает решение задач, связанных с анализом

механизмов его взаимодействия с веществом, прогнозированием изменения структурно-фазового состояния поверхности, радиационно-стимулированным переносом атомов.

В работе Асаинова О.Х. [3] показано, что в основе модифицирующего действия мощных пучков заряженных частиц на твёрдое тело, лежат тепловые процессы. При облучении в твёрдом теле происходит плавление, испарение, возникают термомеханические напряжения, усиливается миграция атомов. Одновременное присутствие двух и более фаз усложняет задачу, делает её нелинейной, не позволяет прийти к аналитическому решению даже в простейших случаях.

Опыт работы с подобными проблемами был получен в связи с изучением механизмов воздействия лазерного излучения на металлические материалы. Интерес к возможностям лазеров возник даже раньше, чем к пучкам ионов и электронов. Видимо, это связано с более ранним появлением достаточно мощных лазерных установок.

Процессы превращения кинетической энергии частиц в тепло при торможении в твёрдом теле находятся в сильной зависимости от параметров пучка, таких как плотность мощности, плотность тока, длительность импульса и площадь сечения пучка. Изучению этих вопросов посвящено множество работ, например, [4, 5].

Предварительные оценки показывают, что плотность мощности потока энергии, обеспечиваемая подобными пучками, находится на уровне 10^6 Вт/см² и выше, то есть они способны плавить обрабатываемую поверхность и испарять её. Поэтому при расчёте параметров пучков для ЭЛС мы принимали во внимание от возможностей этих устройств.

Технологически электронные пучки являются более выгодными так как ими легче управлять. С точки зрения длительности воздействия в последнее время получили распространение короткоимпульсные (нано- и микросекундные) источники электронов, которые позволяют снизить тепловое влияние пучка на глубинные слои обрабатываемого материала или

изделия. Но для того, чтобы их успешно использовать, надо уметь прогнозировать параметры процессов, которые они инициируют.

1.2 Основные свойства электронно-лучевой сварки

ЭЛС является одной из самых перспективных технологий обработки материалов, основанных на использовании высококонцентрированных источников энергии. Особенности, преимущества и недостатки её рассмотрены в работе [1].

ЭЛС позволяет соединять за один проход металлические материалы толщиной от 0,1 мм до 400 мм. Сварка выполняется преимущественно в вакуумных камерах при давлении остаточных газов порядка 10^{-2} Па, что позволяет получать максимальную степень чистоты соединений. При этом обеспечиваются максимальная пластичность и вязкость сварных соединений.

Этот процесс, основанный на использовании тепла, выделяемого во время торможения остросфокусированного пучка электронов, ускоренных до высоких энергий. Широкое применение этот источник нагрева получил лишь с развитием вакуумной техники и электронной оптики.

ЭЛС является наиболее перспективным способом соединения изделий из тугоплавких и химически активных металлов и сплавов, изделий из термически упрочнённых материалов, когда нежелательна, затруднена или невозможна термообработка, изделий после завершающей механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций, толстостенных конструкций ответственного назначения, энергетический КПД составляет порядка 80-90 %.

Действие таких пучков почти на все материалы характеризуется разогревом тонких приповерхностных слоёв до температур, значительно превышающих температуру плавления. Обычно при ЭЛС плотность мощности электронного пучка лежит в пределах $10^5 - 10^8$ Вт/см². При этом

энергия частиц равна 10-50 кэВ, а диаметр пучка – 0,1-1 мм. Величина минимальной плотности мощности пучка, при котором испарение становится заметным, находится в сильной зависимости от начальной энергии электронов. Процесс испарения носит поверхностный характер [5].

Источник нагрева в виде пучка электронов сосредоточен на малом пятне диаметром, составляющем сотые доли миллиметра. Высокая концентрация энергии, получаемая за счёт фокусировки пучка, позволяет достигать отношения глубины к ширине проплавления на уровне 50:1, что не свойственно другим видам сварки. Узкий шов, параллельность его границ и малая протяжённость зоны термического влияния обуславливают незначительные линейные и угловые деформации свариваемых изделий.

Погонная энергия, поперечная усадка и угловые деформации при ЭЛС лежат существенно ниже показателей для лазерной сварки. Глубокое проплавление металла при низких значениях погонной энергии ЭЛС приводит к повышенной скорости кристаллизации малой по объёму сварочной ванны, благодаря чему измельчается структура сварного шва.

Таким образом, ЭЛС имеет следующие преимущества перед другими способами сварки плавлением:

- широкий диапазон толщин свариваемых деталей;
- возможность получения узких швов с глубоким проплавлением;
- небольшие линейные размеры зоны теплового влияния;
- высокая производительность и экономичность;
- резкое снижение величины деформаций сварных конструкций.

К недостаткам её можно считать большие затраты на создание и поддержание вакуума

Исследования показали актуальность дальнейшего совершенствования технологии ЭЛС и выявили ряд задач, решение которых позволит реализовать комплексный подход к анализу процессов, происходящих при ЭЛС: определить зависимости структуры, формы и характеристик сварного

соединения от параметров сварки, установить причины влияния температурных полей на процесс сварки и качество соединения.

1.3 Тепловые процессы в веществе при облучении пучками электронов

При электронном облучении, в отличие от случая других атомных частиц, первичные электроны, попавшие в вещество, становятся неотличимыми от электронов твердого тела, и говорить об их распределении по глубине бессмысленно. На первый план здесь выходят не сами первичные частицы, а та энергия, которую они передают облучаемому веществу.

Для расчёта энерговыделения в первую очередь необходимы данные о функции распределения удельных потерь энергии по толщине образца $G(x) = -dE/dx$. Их можно получить из энергетических спектров электронов, прошедших сквозь тонкие слои, либо методом так называемого меченого слоя, расположенного на известной глубине в изучаемом материале. В последнем случае тем или иным способом (например, по изменению радиационной проводимости слоя) оценивается доля энергии первичного пучка, поглощённая на заданной глубине.

Примеры экспериментально измеренных распределений удельных потерь приведены на рисунке 1. Характерной особенностью является наличие в приповерхностной области максимума, положение которого смещается вглубь от образца с возрастанием E_1 . Отметим, что этот максимум обусловлен угловым рассеянием электронов, так как по закону Бете, удельные потери энергии должны монотонно возрастать по мере торможения электронов.

Ввиду большой сложности экспериментальных методов изучения $G(x)$ к настоящему времени получены сравнительно немногочисленные опытные

данные, которые охватывают узкий круг материалов и ограниченный диапазон энергий.

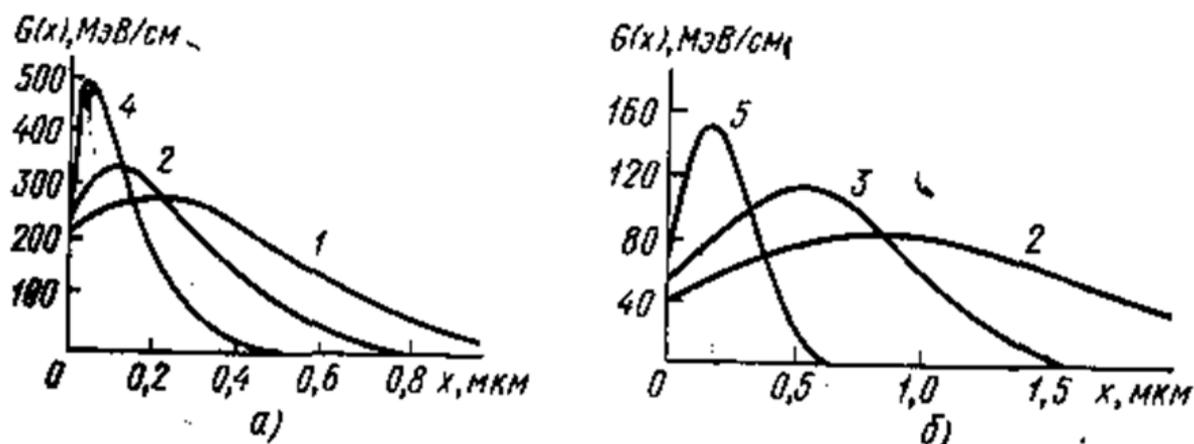


Рисунок 1. Экспериментальное распределение поглощенной энергии по глубине в меди и алюминии при E_1 , кэВ, 1-20, 2-15, 3-12, 4-10, 5-6 [4]

Это усложняет получение надёжной картины зависимости $G(x)$ от атомного номера, энергии электронов и других факторов. В этой связи большое значение имеют результаты, получаемые расчетным путем.

Способы расчета пространственного распределения линейных потерь энергии ускоренных электронов в веществе: решение кинетического уравнения; метод Монте-Карло; различные полуэмпирические (аппроксимирующие) формулы. В данной работе использован последний способ.

К настоящему времени разработан ряд полуэмпирических выражений для функции пространственного распределения потерь энергии электронов. Один из наиболее удачных методов аналитической аппроксимации $G(x)$ был предложен В.В. Макаровым, рисунок 2. В нем для описания распределения удельных потерь энергии по глубине использована функция Гаусса:

$$G(x) = G_m \exp(-(x - x_m)^2 / \Delta x_m^2) = G_m \exp(-(x/x_m - \chi)^2) \quad (1.1)$$

Здесь $\chi = x_m / \Delta x_m$ характеризует относительное положение максимума распределения, а Δx_m – его полуширину.

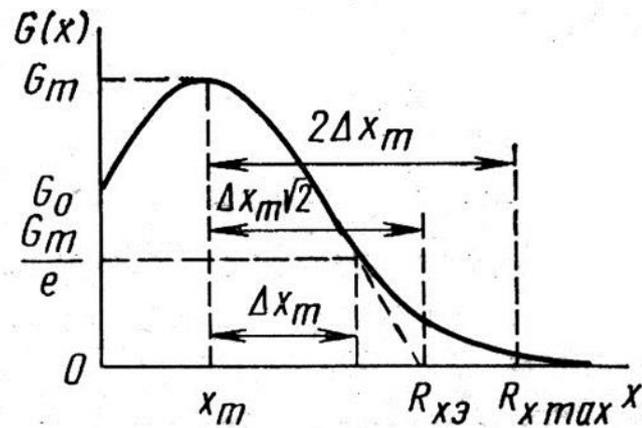


Рисунок 2. Эмпирическое описание формы пространственного распределения формы удельных потерь энергии $G(x)$. G_m – максимальное энерговыделение; G_0 – энерговыделение на облучаемой поверхности; R_{xmax} , $R_{x\varepsilon}$ – максимальный и экстраполированный пробеги электрона [4]

В процессе взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым материалом электроны теряют энергию в результате упругих и неупругих столкновений.

Процессы рассеяния электронов и потери ими энергии, ведущие к уменьшению интенсивности, носят вероятностный характер, что приводит к значительному разбросу величин пробегов отдельных частиц. Для электронов вводят такую величину как экстраполированный (или максимальный) пробег, то есть такую толщину поглотителя, при которой продолжение линейно спадающего участка зависимости интенсивности электронного пучка $I(x)$ пересекает уровень нулевой интенсивности [4].

Также необходимо учитывать, что если в рабочей камере поддерживается недостаточный вакуум, то потеря энергии первичными электронами будет происходить на пути к поверхности образца из-за рассеяния на частицах окружающей среды. То же самое происходит, если сама электронная бомбардировка сопровождается интенсивным выделением газов и паров. По литературным данным для того чтобы не менее 99 % электронов доходили до поверхности без нежелательного взаимодействия с атомами окружающей среды, необходимо поддерживать давление остаточных газов в рабочей камере на уровне 10^{-2} Па и ниже [4].

Проходя сквозь вещество, электрон взаимодействует как с кристаллической решеткой в целом, так и с отдельными встречающимися частицами: атомами, молекулами и электронами кристалла. В результате прохождения электронного пучка сквозь кристаллическую решетку, т.е. в пространстве, пронизанном электрическими полями отдельных атомов и молекул, возникают возмущения этих полей. Электроны передают при этом часть своей энергии атомам и молекулам вещества, которые несколько смещаются со своих мест и увеличивают амплитуду колебаний; параметры решетки изменяются. При достаточно больших энергиях первичные электроны могут вызвать ослабление и разрыв связей между атомами. Такие возмущения проявляются в виде перемещений атомов и молекул и увеличений амплитуды их колебаний. Внешним признаком этого является местное повышение температуры металла.

При прохождении внутрь металла электроны первичного пучка испытывают также столкновения с ядрами атомов, в результате которых последние либо захватывают электроны, образуя отрицательный ион, либо, что вероятнее, получают дополнительный импульс при тепловом колебании в кристалле. При захвате электрона ядром должен образоваться отрицательный ион нового элемента, имеющий атомный номер на единицу меньше. Однако, как правило, энергия электронов при обработке материалов электронным пучком для этого недостаточна, поэтому такой процесс во внимание не принимается.

Получение же ядром добавочного импульса проявляется также в виде местного повышения температуры. Так как электроны обладают малой массой и сравнительно невысокой энергией, то взаимодействие электронного пучка с полем кристаллической решетки и ядрами атомов практически приводит к торможению электронов с той или иной степенью эффективности. Кинетическая энергия электронов рассеивается в виде тепла, разогревающего металл в области попадания пучка. Затем тепло распространяется в металле в соответствии с законами теплопередачи.

Как отмечалось ранее, электронным пучком можно осуществить термическое и нетермическое воздействие на материал. Несмотря на то, что его энергия может преобразоваться в другие виды энергии, в основном она переходит в тепловую, т.е. происходит электронно-лучевой нагрев вещества.

Следует отметить, что при плотности мощности пучка более 10^6 Вт/см² возрастают механические силы, действующие на облучаемый участок, и обусловленные давлением самого электронного пучка, а также реактивным давлением («давлением отдачи») атомов, испарившихся с поверхности.

При большой длительности импульса необходимо учитывать потери энергии в результате рассеяния электронов на атомах паровой фазы.

Процесс обработки материала остросфокусированным электронным пучком можно реализовать и в неподвижном режиме (импульсном), особенность которого заключается в использовании принципа локального кратковременного проплавления вещества, при том, что процессом воздействия можно управлять, изменяя плотность тока пучка (варьировать током и диаметром пучка), а также длительность импульса [6].

1.4 Роль испарения и сегрегационных явлений в формировании физических и механических свойств шва

Распределение компонентов (примесей) в ходе процесса кристаллизации рассматривается как нежелательное явление химико-технологической и металлургической практики. Это обусловлено тем, что возникающие неоднородности химического состава кристаллов (сегрегация, ликвация) порождают неоднородность или ухудшение свойств кристаллического материала. Предпринимались многочисленные исследования явления сегрегации или ликвации (А. А. Байков, И. В. Горбачев, И. И. Новиков, Д. А. Петров, А. А. Буханова, М. В. Пикунов и другие).

Ликвация проявляется в виде повышенной концентрации некоторых химических элементов в определенных локализованных зонах слитков на макро- и микроуровнях. Наиболее подвержены ликвационным явлениям такие химические элементы как сера, углерод, фосфор, кремний, марганец, молибден, хром.

Алюминий одним из первых был изучен на предмет исследования поведения в нем примесей при кристаллизации из расплава. При этом одновременно были исследованы и коэффициенты распределения в нем компонентов.

Сведения о термодинамических свойствах алюминиевых сплавов представляют значительный интерес, как с практической, так и теоретической точек зрения. Они составляют фундаментальную научную базу для разработки технологий легирования, рафинирования сплавов. Термодинамические исследования необходимы для понимания природы химической связи, анализа поведения их компонентов.

Представим результаты теоретического анализа вопросов связанных с кристаллизационной сегрегацией компонентов в алюминии, которые являются теоретической основой технологии управления их пространственным распределением.

Под коэффициентом распределения будем понимать отношение концентрации в твердой фазе к концентрации в расплаве. Значение коэффициента – постоянная величина, определенная природой растворителя и растворённого вещества.

Элементы значительно вытесняющиеся при кристаллизации из твердой в жидкую фазу, как общий признак имеют коэффициент распределения значительно меньше единицы. Если примеси обладают сравнительно большой растворимостью в алюминии в твердом состоянии, то их коэффициенты распределения близки к единице, и, следовательно, их отделение кристаллизационными методами будет затруднено.

Так примеси имеющие равновесный коэффициент распределения меньше единицы, при сварке будут переноситься расплавленной зоной в конечную часть шва. Если растворимость примеси в алюминии ничтожно мала и коэффициент распределения выражается величиной порядка 10^{-4} , то сегрегация примесей в алюминии будет значительной.

При ничтожно малой растворимости примеси в алюминии при условии, если эвтектическая точка находится вблизи ординаты алюминия, коэффициент распределения не превышает 0,1 (Sb - 0,09; Fe - 0,03; Ni - 0,009; Ca - 0,08; Co - <0,02). Перераспределяться эти примеси будут хуже. При значительной растворимости примеси в твердом состоянии коэффициент распределения больше 0,1 (Mn от 0,7 до 0,93; Mg - 0,6; Cu - 0,17; Si - 0,16; Zn - 0,4). Примеси, имеющие равновесный коэффициент распределения больше единицы (V- 3,7; Nb - 1,57; Ta -1,6; Cr -1,4; Mo -2,5) будут концентрироваться в начальной зоне расплава.

Равновесное состояние довольно просто описывается с позиции классической термодинамики. Для бинарных систем веществ A и B , теплоёмкости вещества в жидкой и твёрдой фазах, должны удовлетворять условию:

$$k_A(T) = \frac{C_A^S}{C_A^L} = \exp\left(\frac{H_A}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_A}\right)\right) \quad (1.2)$$

$$k_B(T) = \frac{C_B^S}{C_B^L} = \exp\left(\frac{H_B}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_B}\right)\right) \quad (1.3)$$

где $C_A = \frac{n_A}{n}$ – концентрация вещества A ; $C_B = \frac{n_B}{n}$ – концентрация вещества B в системе; $n = n_B + n_A$ – число частиц в единичном объеме того и другого вещества; n_A – вещества A ; n_B – вещества B . Верхний индекс S означает твердую фазу, L – жидкую. Очевидно, что в этом случае в любой фазе:

$$C_A + C_B = 1 \quad (1.4)$$

$k_A = C_A^L / C_A^S$ - равновесный коэффициент распределения вещества А в системе; $k_B = C_B^L / C_B^S$ - равновесный коэффициент распределения вещества В в системе; H_A - скрытая теплота плавления одного моля вещества А, T_A - его температура плавления, H_B - скрытая теплота плавления одного моля вещества В, T_B - его температура плавления, R – универсальная газовая постоянная, T- температура кристаллизации сплава.

Зависимость концентрации того и другого компонента системы от температуры при термодинамическом равновесии:

$$C_A^L = \frac{k_B(T) - 1}{k_B(T) - k_A(T)} \quad (1.5)$$

$$C_A^S = k_A \cdot C_A^L \quad (1.6)$$

$$C_B^L = \frac{1 - k_B(T)}{k_B(T) - k_A(T)} \quad (1.7)$$

$$C_B^S = k_B \cdot C_B^L$$

Как видим по выражениям (1.2) и (1.3), равновесный коэффициент распределения зависит от температуры, которая определяется предельной концентрацией примеси в жидкой фазе на фронте кристаллизации. Другими словами, значение равновесного коэффициента распределения зависит от состава расплава, который в процессе направленной кристаллизации непрерывно меняется.

Важный момент, связанный с расчетом сегрегации, заключается в том, что эффективный коэффициент распределения K_0 и равновесный k отличаются друг от друга из-за конечной скорости переноса примеси у фронта кристаллизации, определяемой в основном диффузией.

Равновесный коэффициент распределения K_0 :

$$K_0 = \frac{k}{k + (1 - k) \exp\left(-\frac{V_{kp} \cdot d}{D}\right)} \quad (1.8)$$

где $V_{кр}$ - скорость перемещения расплавленной зоны;

d - толщина диффузного слоя;

D - коэффициент диффузии в жидкой фазе.

Разделив обе части уравнения (19) на k , запишем уравнение в виде:

$$K_0 = [1 + (1/k - 1) \exp(-V_{кр} G)]^{-1}, \quad (1.9)$$

где $G = d/D$ – параметр диффузии.

Примеси металлов, имеющих большую упругость паров при температуре жидкой ванны, в процессе сварки будут удаляться из расплава в газовую фазу (Mg, Ca, Cd, Zn, Sb, As). Кроме того, учитывая, что процесс происходит в вакууме, скорость испарения основного металла и примесей увеличивается как минимум на порядок.

Таким образом, формирование химического состава металла шва определяется совместным протеканием процессов испарения и диффузии примесей. Поскольку свойства алюминиевых сплавов в значительной мере зависят от содержания легирующих добавок, то металл шва после электронно-лучевой обработки будет отличаться по своим параметрам от основного металла. Изменится размер зерна, предел прочности, пластичность, стойкость металла шва к воздействию агрессивных сред.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Исследуемый сплав 1370 (АД37) системы Al-Mg-Si-Cu

Все расчёты и эксперименты выполнены на примере высокотехнологичного термически упрочняемого алюминиевого сплава марки 1370 (АД37) системы Al-Mg-Si-Cu, разработанного Всероссийским научно-исследовательским институтом авиационных материалов (ФГУП ВИАМ, г. Москва) [10].

Элементный состав сплава, определенный методом энергодисперсионного анализа, представлен в таблице 2.1.

Таблица 2. 1. Элементный состав сплава марки 1370

Элементы сплава	Al	Mg	Si	Mn	Cu	Zn
Содержание, %	93,1	1,74	1,11	0,95	1,9	1,19

Являясь одним из перспективных конструкционных материалов для авиационной и аэрокосмической техники, используется для изготовления деталей сложной конфигурации, в том числе работающих в условиях воздействия эксплуатационных нагревов: обшивок и внутреннего набора фюзеляжей гидросамолетов и палубной авиации, крыльев и стабилизаторов, в виде штамповок и прессованных полуфабрикатов - для самолетов морской авиации.

В последнее время получил широкое распространение благодаря тому, что обладает хорошей технологической пластичностью при горячей и холодной деформации, значительной прочностью, высоким сопротивлением по отношению к многоцикловой усталости. Экономно легированный магнием, кремнием и медью обладает повышенными характеристиками жаропрочности ($\sigma_{\text{в}}^{20^\circ} > 400\text{--}450$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20^\circ} > 350\text{--}370$ МПа, $\sigma_{500}^{150^\circ} = 290$ МПа, $\sigma_{500}^{175^\circ} = 240$ МПа), хорошим сопротивлением общей коррозии и практически не чувствителен к коррозионному растрескиванию.

Сплав является базовыми конструкционным материалом современной и перспективной авиационной техники благодаря легкости, оптимальному комплексу необходимых эксплуатационных характеристик, хорошей технологичности и освоенности в металлургическом и авиационном производствах.

Приготовление сплава и литьё слитков осуществлялось на ОАО «КУМЗ» (г. Каменск-Уральский). Слитки были получены на плавильно-литейных агрегатах с автоматическими машинами нового поколения фирмы «Wagstaff» (США).

2.2 Оборудование для электронно-лучевой сварки

Процесс электронно-лучевой сварки (ЭЛС) осуществляется за счет превращении кинетической энергии направленного потока электронов в тепловую при торможении в свариваемых металлах. Это объясняется тем, что поток ускоренных заряженных частиц, направленный на твердое тело, теряет в нем почти всю свою энергию в различных упругих и неупругих взаимодействиях с частицами вещества мишени. Часть энергии падающего потока может быть унесена с поверхности отраженными (как первичными, так и вторичными) частицами. Оставшаяся часть энергии, поглощенная веществом мишени, в конечном итоге почти вся превращается в тепло.

Электронный пучок образуется за счет эмиссии электронов с нагретого катода, либо за счёт извлечения электронов из плазмы в плазменных источниках электронов. Электронный пучок фокусируется с помощью электростатических и электромагнитных линз [11].

Вакуум применяют как для эффективной генерации электронного пучка и беспрепятственного прохождения его до свариваемой детали, так и для создания инертной среды без вредных примесей (кислорода, азота и водорода). Это позволяет получать сварные соединения высокого качества

при сварке таких химически активных сплавов, как титановые, циркониевые, ниобиевые, молибденовые.

При выходе электронного луча в атмосферу рассеяние пучка электронов столь велико, что не удастся увеличить рабочее расстояние от пушки до изделия больше чем на 30 мм, поэтому сварку электронным лучом осуществляют преимущественно в вакууме. Электронный луч в зоне сварки обладает высокой мощностью, превосходящей традиционные сварочные источники нагрева, уступая только лучу лазера.

Образцы сварных швов были изготовлены на установке электронно-лучевой сварки ЭЛС-0,5-6 предприятия ОАО «НПЦ «Полус». Отличительной особенностью установки является использование пушки с плазменным источником электронов [12].

Внешний вид установки представлен на рисунке 2.



Рисунок 2. Установка электронно-лучевой сварки ЭЛС-0,5-6

Установка включает в себя следующие основные узлы:

- рабочая (вакуумная) камера – куб с внутренним ребром 800 мм;
- откачная система, состоящая из форвакуумного пластинчатороторного насоса и высоковакуумного криогенного насоса;

- электронная пушка с двухлинзовой фокусирующей системой, системами напуска рабочего газа и охлаждения;

- блок управления электронно-лучевой аппаратурой и вакуумной системой.

Основные параметры установки приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры установки ЭЛС-0,5-6 [13].

Наименование параметра	Значение
Напряжение питающей сети, В	$380 \pm 5\%$
Потребляемая мощность, кВт	12
Расход охлаждающей воды, м ³ /час	0,5
Предельное остаточное давление, Па	$2 \cdot 10^{-3}$
Время достижения предельного давления в камере, мин	25
Ускоряющее напряжение, кВ	до 30
Диапазон регулировки тока пучка, мА	1-200
Размеры вакуумной камеры: длина, ширина, высота, мм	800, 800, 800
Масса установки, кг	932

В последнее время все больше внимания уделяется плазменным электронным источникам (плазменным катодам).

В системах с плазменным катодом значительно проще получать пучки большого поперечного сечения, электронные источники с плазменным катодом более надежны, так как их параметрами можно легко и быстро управлять. Одной из главных особенностей плазменного катода является возможность отбора из плазмы практически всех электронов, генерируемых в разрядном промежутке, что обуславливает высокую эффективность эмиттера электронов такого типа [14].

Установки для обработки электронным лучом – это сложные устройства, основанные на достижениях современной электроники, электротехники и автоматики. Основная их часть – электронная пушка, генерирующая в вакууме пучок электронов. Стабильная работа пушки возможна при давлении остаточного газа в рабочей камере не выше 10^{-3} Па.

Для эксплуатации пушки рекомендуется использовать проточную воду с температурой не выше 20 °С.

Принцип действия электронной пушки основан на эмиссии электронов из газоразрядной плазмы, образованной в специальной электродной системе, под действием электрического поля (рис. 3).

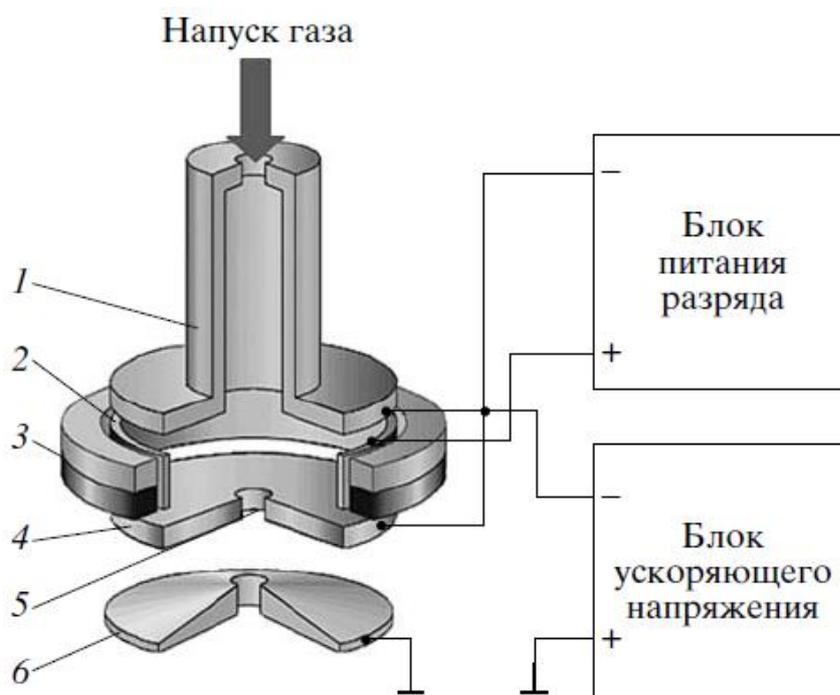


Рисунок 3. Электродная система пушки с плазменным катодом
1 – полый катод; 2 – анод; 3 – постоянный магнит; 4 – эмиттерный катод;
5 – эмиссионный канал; 6 – ускоряющий электрод (экстрактор) [15].

В работе все эксперименты проводились при расстоянии до фокусирующей системы равном 270 мм, ускоряющее напряжение не изменялось и составляло 28 кВ. Несмотря на то, что в таблице представлен большой диапазон для регулировки тока пучка, для работы был выбран интервал от 15 мА до 45 мА, так как при увеличении значения тока пучка появляются нежелательные эффекты. Диаметр сфокусированного пучка принимали 300 мкм [16].

2.3. Взвешивание образцов

Измерение количества удаляемого материала проводилось на лабораторных аналитических весах OHAUS Pioneer (PA413). Данные весы могут использоваться для измерения массы с высокой точностью [17]. Поэтому они находят применение как в промышленности, так и в научных, учебных и медицинских учреждениях. Используя счетный режим данных весов можно определить количество деталей малой массы, их можно применять при взвешивании ювелирных украшений, драгоценных металлов и камней, легких предметов. Весы серии OHAUS Pioneer (PA) сочетают в себе простоту конструкции, удобство в использовании и оптимальную комбинацию функций.



Рисунок 4 – Внешний вид весов OHAUS Pioneer PA413[17]

Технические характеристики:

- 1) тип: лабораторные;
- 2) габаритные размеры: 196×92×320 мм;
- 3) максимальный вес: 410 г;
- 4) дискретность: 1 мг;
- 5) время установления показаний: 3-5 секунд

2.4. Измерение твердости по методу Виккерса

Данный метод является одним из наиболее распространенных в лабораторной практике, так как он позволяет получить значения с большой точностью. Измерение реализуется путем внедрения алмазной пирамидки с углом при вершине между противоположными гранями 136° в образец.

Схема твердомера KB30S Pruftechnik GmbH представлена на рисунке 5.

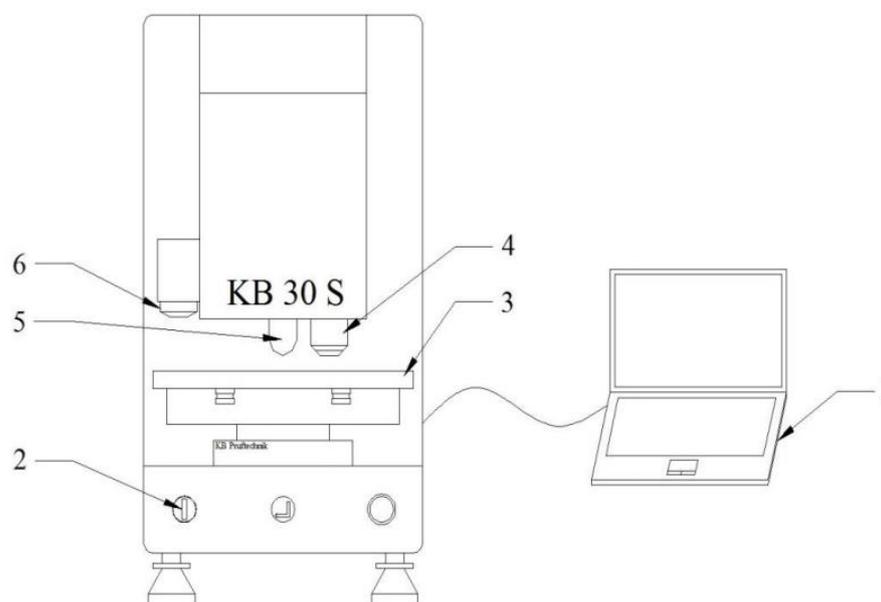


Рисунок 5 – Схема твердомера KB30S Pruftechnik GmbH [20]

1 – компьютер со специальным программным обеспечением; 2 – кнопка включения питания; 3 – стол; 4 – 20X объектив; 5 – индентор (алмазная пирамидка); 6 – обзорная камера.

Также с помощью твердомера можно проводить металлографические исследования поверхности образца, предварительно подготовив его. Твердомер позволяет проводить измерения твердость двумя способами: методы Бринелля и Виккерса. В представленной работе твердость измерялась методом Виккерса. Метод нежелателен для измерения крупнозернистых и разнородных структур.

2.5 Метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

Прибор Quanta 200 3D представляет собой сканирующий электронный микроскоп с термоэмиссионным катодом и сфокусированным ионным пучком, позволяющим прецизионно наносить и удалять материалы. Прибор оснащен системой энергодисперсионного анализа (EDS) и анализа структуры и текстуры кристаллических материалов методом дифракции отраженных электронов (EBSD Pegasus). Приставка позволяет проводить качественный и количественный микроанализ в EDS в диапазоне элементов от Be до U.

Технические характеристики ионной оптики:

- ускоряющее напряжение 0,5-30 kV;
- разрешение 10,0 nm при 30 kV.

Принцип работы заключается в следующем: пучок электронов падает на поверхность образца и взаимодействует с материалом, в результате чего возникает, в том числе, характеристическое рентгеновское излучение, которое регистрируется полупроводниковым детектором. Система обработки сигнала затем разделяет рентгеновские фотоны по энергиям и, таким образом мы получаем полный спектр, по которому судим об элементном составе образца-мишени.

3. Поле температур и фазовые превращения при сканировании пучка электронов по поверхности твёрдого тела

3.1. Модельные представления о процессе диссипации энергии пучка

Поток ускоренных частиц, падающий на поверхность твердого тела, становится источником тепловыделения. Для обозначения процесса превращения кинетической энергии потока бомбардирующих частиц при их торможении в веществе в другие виды энергии используется понятие диссипации энергии.

Диссипация энергии – это необратимое преобразование кинетической энергии в теплоту, обусловленное работой неконсервативных сил.

Разогрев вещества при воздействии излучения может быть очень интенсивным, как по количеству переданного количества тепла, так и по скорости его ввода в облучаемый материал. Следствием такого разогрева могут быть и фазовые превращения, в том числе испарение, а также генерация волн сжатия и нагрузки и возникновение термомеханических напряжений. Поля температур и давлений стимулируют интенсификацию многих других процессов, ведущих к изменению макроскопических свойств вещества, в том числе, к усилению миграции атомов, отжигу дефектов, изменению кристаллической структуры, аморфизации, десорбции, термоэлектронной эмиссии.

Нагрев потоками излучения приводит к следующим процессам в веществе:

- фазовые превращения (плавление, испарение, образование плазмы);
- изменение кристаллической структуры (например, может появиться мелкозернистая структура или «наноструктура»);
- аморфизация;

- генерация термомеханических напряжений, разрушение облучаемого вещества;

- отжиг дефектов;
- усиление миграции атомов;
- десорбция;
- термоэлектронная эмиссия.

В качестве основных каналов диссипации энергии потоков заряженных частиц в веществе будем рассматривать:

- разогрев вещества мишени,
- фазовые превращения в облучаемом веществе, стимулированные разогревом,
- эрозия облучаемой поверхности,
- тепловое излучение.

Закономерности диссипации энергии потоков излучения в веществе представляют большой интерес для исследователей, так как они являются источником модифицирования свойств материалов, подвергнутых облучению.

В условиях развитого испарения на обрабатываемой поверхности диссипация энергии пучка в веществе происходит по следующим каналам:

- а) отражение электронов от поверхности;
- б) нагрев вещества в области торможения частиц и его перевод в паровую фазу;
- в) расход энергии пучка на нагрев, в том числе и расплавление, тех приповерхностных слоев образца в области торможения частиц, которые остаются в конденсированном состоянии;
- д) уход энергии пучка из области торможения частиц в виде теплопроводного потока;
- е) тепловое излучение разогретой пучком поверхности.

Пункты в) и д) можно объединить, подразумевая энергию E_{Term} , расходуемую на нагрев, в том числе и плавление, конденсированной фазы вещества облучаемого образца.

Так как температура поверхности меняется в течение испарения, приводя к изменению скорости $v(T)$ и удельной теплоты испарения $q_{ev}(T)$, E_{ev} рассчитывается по следующей формуле:

$$E_{ev} = \int_{-\infty}^{+\infty} [(T_s(t) - T_0)c\rho + q_{ev}(t)]v(t)dt. \quad (3.1)$$

Здесь $T_s(t)$ – температура наблюдаемого элемента поверхности, T_0 – его температура перед облучением.

Пределы интегрирования от $-\infty$ до $+\infty$ подразумевают, что должна быть учтена вся энергия, поступающая от движущегося пучка с нормально распределенной по его сечению плотностью тока.

Коэффициент отражения электронов n_{ref} рассчитывался по методике, описанной в работе [22]. Коэффициент отражения энергии связан с n_{ref} соотношением [23]:

$$k_{ref} = 0,5 \cdot n_{ref} \quad (3.2)$$

Доля энергии, уносимой с облучаемой поверхности тепловым излучением, ничтожно мала. Она на 3-4 порядка меньше всех остальных составляющих энергетического баланса. Поэтому в моделях для расчета неравновесных тепловых процессов, возникающих под действием достаточно мощных потоков излучения, ею пренебрегают.

С увеличением J_{max} быстро возрастает та часть энергии пучка, которая расходуется на нагрев и испарение вещества. Причем, она тем выше, чем больше t_{beam} , так как вещество получает больше энергии, а в отсутствие потерь энергии в парах это приводит к росту этой составляющей энергетического баланса.

Уменьшение скорости сканирования увеличивает время воздействия пятна на каждый элемент поверхности t_{beam} , и он получает больше энергии. В

диапазоне $v_x > \frac{2a}{r}$, где тепловое расплывание в течение t_{beam} мало по сравнению с размерами пятна, уменьшение скорости сканирования пучка V_x приводит к росту K_{ev} - коэффициента использования энергии пучка на испарение, который является индикатором энергоэффективности удаления атомов с поверхности под действием сканирующего электронного пучка.

Для исследования диссипации энергии излучения в веществе привлекаются все возможные способы. Особую роль здесь играет математическое моделирование.

Математическое моделирование – важный, зачастую единственный способ получить данные о закономерностях происходящих в веществе тепловых процессов под действием различного вида излучения. Потому что мы имеем дело с быстропротекающими процессами, тонкую структуру развития которых невозможно исследовать экспериментальными методами.

В основе математического моделирования лежат данные о пространственно-временном распределении энергии излучения в веществе. При этом для развития тепловых процессов в веществе не важно, какие именно частицы воздействуют на него. Важно, какое пространственно-временное распределение выделенной энергии при этом создается потоками этих частиц.

3.2 Уравнение теплопроводности, начальные и граничные условия, условие на границе раздела фаз, функция энерговыделения, исходные данные

При описании математической модели испарения на поверхности твердого тела под действием сфокусированных сканирующих пучков нужно исходить из того, что эрозия поверхности в случае электронных пучков вызывается испарением.

Выделение энергии пучка на поверхности локализовано в некотором очень маленьком пятне радиусом r , примерно равном радиусу поперечного сечения пучка. Причем, это пятно быстро перемещается по поверхности.

В общем случае здесь должна быть решена трёхмерная краевая задача на основе уравнения теплопроводности. Однако её двумерный вариант в декартовых координатах тоже является корректным, если выполняются следующие условия [24]:

- 1) диаметр следа пучка должен быть намного (как минимум на порядок) больше глубины проникновения электронов в вещество;
- 2) скорость его движения должна быть достаточно большой для того, чтобы за время прохождения следа по любому элементу поверхности тепло не успевало заметно распространиться из области торможения электронов в направлении, перпендикулярном к поверхности.

Если последнее требование не выполняется, то двумерное приближение будет некорректным.

Тогда задача о расчете пространственно-временного поля температур и количества испаряющегося вещества под действием сфокусированного сканирующего пучка принимает следующий вид:

$$\frac{\partial E(x, z, t)}{\partial t} - v(T) \frac{\partial E(x, z, t)}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial z^2} \right) + W(x, z, t), \quad (3.3)$$

$$\text{начальные условия: } T(x, z, 0) = T_0; \quad (3.4)$$

граничные условия:

$$\lambda \left(\frac{\partial T(x, z, t)}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = v\rho L(T) - \quad (3.5)$$

в любой точке на облучаемой поверхности при возникновении испарения;

$$\lambda \left(\frac{T(x, z, t)}{dz} \right) \Big|_{z=z_{\text{кон}}} = \lambda \left(\frac{T(x, z, t)}{dx} \right) \Big|_{x=x1} = \lambda \left(\frac{T(x, z, t)}{dx} \right) \Big|_{x2} = 0 \quad (3.6)$$

на обратной стороне образца и его боковых поверхностях отсутствует теплообмен (им можно пренебречь по сравнению с основными тепловыми потоками в образце).

E – тепловая составляющая внутренней энергии вещества мишени. Запись уравнения теплопроводности с использованием E связана с тем, что в этом случае облегчается учет затрат тепла на плавление.

Здесь v – скорость испарения, которая зависит от температуры поверхности и может быть рассчитана по уравнению Герца-Кнудсена.

$L(T)$ – удельная теплота испарения.

Функция энерговыделения $W(x,z,t)$, создаваемая в веществе пучком, движущимся по поверхности вдоль оси Ox со скоростью V_x и имеющим в сечении нормальное распределение плотности тока, представляется как:

$$W(x, z, t) = G(z) \cdot \frac{1}{e} j_{\max} \exp\left(-\frac{(x - X_C(t))^2}{2r^2}\right), \quad (3.7)$$

где $G(z)$ – линейные потери энергии тормозящейся частицы пучка в веществе, e – заряд электрона, $J_{\max} = \frac{I}{2\pi r^2}$ – плотность тока в центре пятна,

I – полный ток пучка, $X_C(t)$ – координата центра пятна в текущий момент времени.

Если пучок движется по поверхности с постоянной скоростью и при этом его ток, радиус поперечного сечения и энергия частиц не изменяются, то относительно центра пятна формируется стационарное температурное поле, и параболическое уравнение теплопроводности фактически становится эллиптическим. Однако методом решения этой стационарной задачи является счет на установление нестационарной задачи. Поэтому она принята за основу.

Линейные потери энергии ускоренного электрона в вещества рассчитывались методом аналитической аппроксимации Макарова, который учитывает отражение частиц и энергии пучка от облучаемой поверхности.

3.3 Расчёт пространственного распределения поля температур в зоне расплава

Считается, например, что если в течение облучения тепловой поток успевает распространиться на расстояния, существенно превышающие глубину проникновения частиц пучка в вещество, то есть $R \ll \sqrt{at_{beam}}$ (a - коэффициент температуропроводности, м/с²), то пространственное распределение энерговыделения не оказывает существенного влияния на эволюцию пространственно-временных полей температур и скоростей испарения в облучаемом образце.

Это обстоятельство приводит к тому, что для количества испарившегося вещества и коэффициента использования энергии пучка на испарение важна лишь величина плотности мощности пучка, а не значения формирующих ее множителей E и J . Названное условие выполняется при облучении поверхности сфокусированным сканирующим пучком электронов с энергией частиц $E \leq 50$ кэВ, радиусом пятна фокусировки $r > 100$ мкм, скоростями сканирования $v_x < 10..50$ м/с.

Максимальную глубину проникновения электронов в алюминий определяем по выражению Канайа-Окаяма [7]:

$$R_{Al} \approx \frac{0,0267 \cdot A \cdot E_0^{1,67}}{\rho \cdot Z^{0,889}} \text{ мкм}, \quad (3.8)$$

где Z - атомный номер, A - атомный вес, г/моль, ρ - плотность материала мишени, г/см³, E_0 - энергия первичных электронов, кэВ.

Рассчитанные по формуле 3.8 величины глубины проникновения электронов для различных энергий в алюминии, представлены на рисунке 6.

Максимальное значение глубины при $E_0 = 28$ кэВ не превышает 7 мкм.

В нашем случае расстояние, на которое успеет распространиться тепло за время действия пучка $t_{beam} = \frac{2 \cdot r_{beam}}{v_x}$, составит миллиметры.

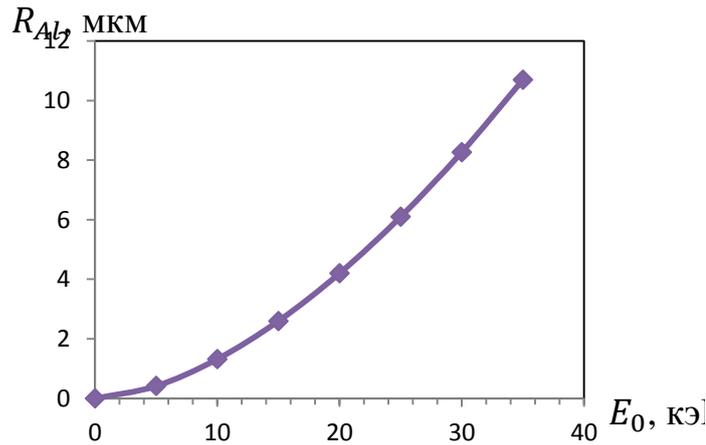


Рисунок 6. Глубина проникновения электронов в алюминий в зависимости от энергии

Тепловой фронт распространится за время действия пучка на длину l .

$$l = \sqrt{\frac{\lambda}{c_p \rho} \cdot t_{beam}} = \sqrt{\frac{\lambda}{c_p \rho} \cdot \frac{2 \cdot r_{beam}}{v_x}} = \sqrt{\frac{190}{917 \cdot 2700} \cdot \frac{2 \cdot 150 \cdot 10^{-6}}{0,01}} = 1,52 \text{ [мм]}$$

Следовательно, энергия, вносимая электронным лучом, выделяется в тонком приповерхностном слое, и источник тепла можно считать плоским.

Пространственно-временное изменение поля температур $T(x, z, 0)$ и кинетика испарения взаимосвязаны. Для расчетов параметров испарения, необходимо знать: полный ток I , энергия частиц E_0 , радиус следа от пучка на облучаемой поверхности r и скорость движения вдоль поверхности V_x . Эти характеристики определяют плотность энергии, которую получает каждый элемент, лежащий на траектории пучка.

Промоделируем распределение тепла в объеме алюминиевого образца при его облучении электронным пучком.

В качестве начальных условий принимаем, что температура образца во всем объеме – комнатная. Постановка задачи для расчета пространственно-временного поля температур и скорости фронта испарения в цилиндрических координатах имеет следующий вид:

$$\frac{\partial E(z, r, t)}{\partial t} - v_{ucn}(r, t) \frac{\partial (E(z, r, t))}{\partial z} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T(z, r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(z, r, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T(z, r, t)}{\partial z^2} \right)$$

где $\partial E(z, r, t)$, $T(z, r)$ - распределение тепловой составляющей внутренней энергии и температуры в облучаемом образце, R – радиус пучка; r - ширина образца; z - глубина.

Температура плавления и кристаллизации находится из следующих соотношений:

$$T(z, r, t) = \begin{cases} E / c\rho, & E \leq E_m \\ T_m, & E_m < E \leq E_m + q_m \cdot \rho \\ T_m + (E - (E_m + q_m \cdot \rho)) / c\rho, & E > E_m + q_m \cdot \rho \end{cases}$$

Начальные условия:

$$T(z, r) = T_0, \quad T_0 = 300 \text{ К}$$

Граничные условия:

На облучаемой поверхности:

$$\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial z} = -q_{beam}(r, t) + \varepsilon_p T^4 + q_{ucn}$$

На оси OZ: $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0$

$$\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial z} \Big|_{z=h} = q_{rad}$$

$$\lambda \frac{\partial T(z, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_{rad}$$

Уравнение с начальными и граничными условиями представляет нестационарную осесимметричную задачу теплопроводности в цилиндре конечных размеров с плоским поверхностным источником

Решение задачи выполнено методом конечных разностей по явной схеме для уравнений параболического типа. Вычисления производим на слоях по времени с шагом τ и по пространственным координатам $h_z = \frac{H}{n}$ и

$$h_r = \frac{R}{m}, \quad \text{где } n \text{ и } m - \text{ количество расчетных ячеек по глубине } z \text{ и радиусу } r.$$

Расчет производим в центре ячеек. Время наблюдения (количество слоев) задаем по необходимости. Чтобы численное решение сходилось к решению дифференциальной задачи, достаточно выполнения условия устойчивости

разностной схемы:
$$\Delta \tau \leq \frac{\rho \cdot c}{2 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{h_z^2} \right)}$$

Вид равномерной пространственной сетки представлен на рисунке 7.

Рассмотрим алгоритм решения задачи:

Тепловая составляющая на новом шаге по времени: для внутренней области $1 < j < m - 2$, $1 < i < n - 2$:

$$E_{i,j}^N = E_{i,j} + \tau \cdot \left[v_j \cdot \frac{(E_{i+1,j} - E_{i-1,j})}{2 \cdot h_z} + \lambda \cdot \left(\frac{1}{r_j} \cdot \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2 \cdot h_r} \right) + \left(\frac{T_{i,j+1} - 2 \cdot T_{i,j} + T_{i,j-1}}{h_r} \right) \cdot \frac{1}{h_r} + \left(\frac{T_{i+1,j} - 2 \cdot T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h_z} \right) \cdot \frac{1}{h_z} \right]$$

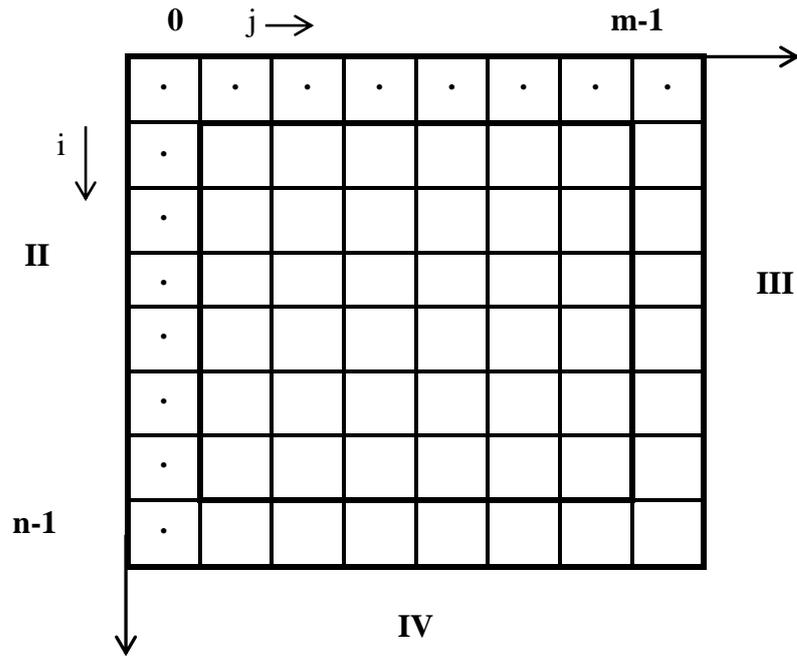


Рисунок 7. Равномерная пространственная сетка

E_N и E – тепловые составляющие внутренней энергии на старом и новом слоях по времени соответственно.

Для учета потока на облучаемой поверхности вводим виртуальную ячейку:

$$\lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial z} = -q_{beam}(r,t) + \varepsilon_p T^4 + q_{ucn} = F$$

$$\lambda \frac{T_0 - T_{-1}}{h_z} = F; \quad \frac{E_0 - E_{-1}}{h_z} = \frac{c \cdot \rho \cdot F}{\lambda}; \quad E_{-1} = E_0 - \frac{c \cdot \rho \cdot F}{\lambda} \cdot h_z$$

На поверхности $z = 0$ реализуются граничные условия II рода. Для области при $i=0$, $1 < j < m - 1$ запишем:

$$E_{0,j}^N = E_{0,j} + \tau \cdot \left[v_j \cdot \frac{(E_{1,j} - E_{0,j} + c \cdot \rho \cdot F_j^s \cdot h_z)}{2 \cdot h_z} + \lambda \cdot \left(\frac{1}{r_j} \cdot \frac{T_{0,j+1} - T_{0,j-1}}{2 \cdot h_r} \right) + \left(\frac{T_{0,j+1} - 2 \cdot T_{0,j} + T_{0,j-1}}{h_r^2} \right) + \left(\frac{T_{1,j} - T_{0,j} - F_j^s}{h_z} \right) \cdot \frac{1}{h_z} \right]$$

При $i=0$, $j=m-1$ записываем предыдущее уравнение, но с учетом излучения на смежной границе III.

Рассуждая аналогичным образом, решаем уравнения при других краевых условиях. Расчет скорости испарения производили по уравнению Герца-Кнудсена. При этом принимали во внимание величину давления паров вещества мишени на поверхность, то есть задавали соответствующие газодинамические условия.

Результатом расчета построенной модели является распределение температурного поля в объеме образца, зависящее от двух координат: радиуса, глубины проплавления.

На рисунках 8, 9 приведен пример температурного поля алюминиевого образца при следующих технологических параметрах облучения: ускоряющее напряжение - 28 кВ, диаметр пучка - 300 мкм, скорость сканирования - 30 мм/с, распределение плотности мощности тока изменяется по нормальному закону.

Для оценки динамики процесса плавления рассмотрим профиль распределения температуры по осям r и z .

Под следом пучка мы понимаем область радиусом r , на поверхности обрабатываемого материала, которая подверглась облучению.

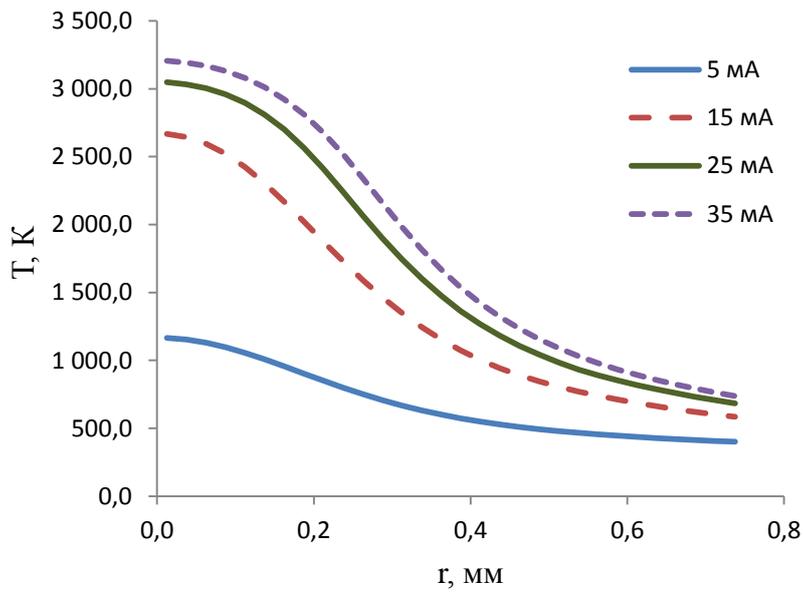


Рисунок 8. Температура на поверхности образца по радиусу в момент прекращения действия пучка

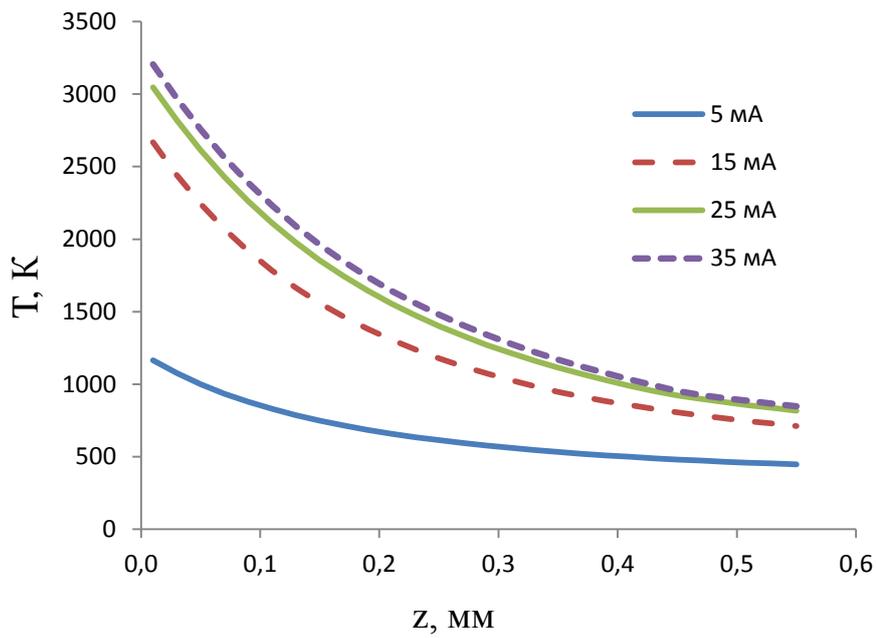


Рисунок 9. Температура по глубине образца в момент прекращения действия пучка

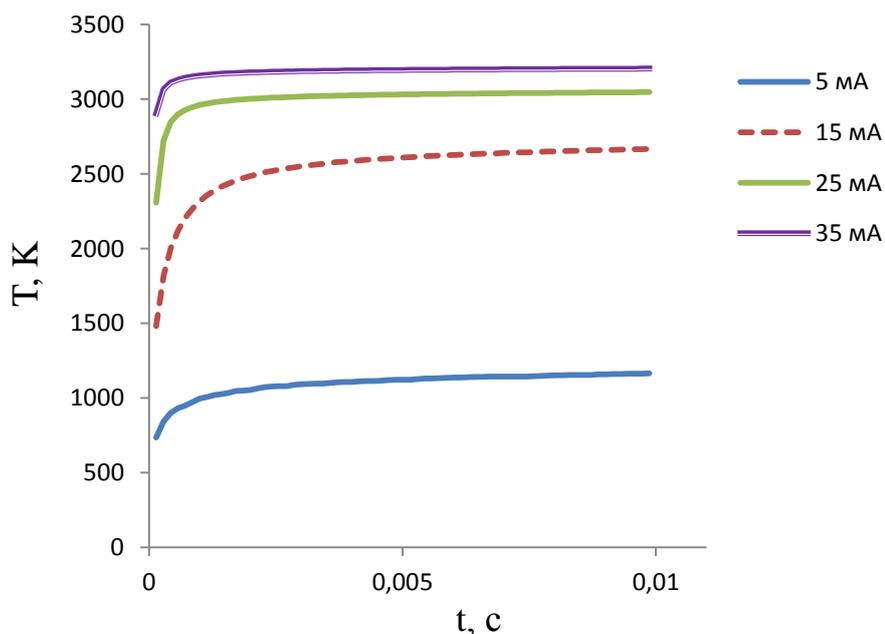


Рисунок 10 Эволюция температуры на поверхности образца в центре следа пучка

Рассмотрим, как влияет испарение на эволюцию температуры. Рассмотрим рисунок 11. Из-за потерь тепла на испарение температура на поверхности образца значительно ниже, чем при отсутствии испарения. Также видно, что до некоторого момента времени испарение практически отсутствует, хотя температура превышает температуру плавления, следовательно, плавление начинается раньше.

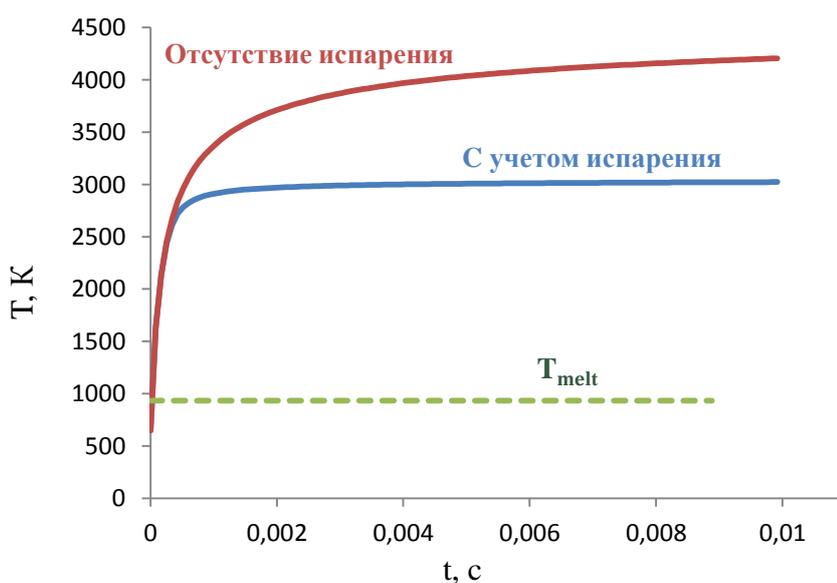


Рисунок 11. Эволюция температуры на поверхности образца в центре следа пучка при силе тока 25 мА

Расчеты показывают, что за время действия пучка потери на тепловое излучение (учитываемое по закону Стефана – Больцмана) пренебрежимо малы. Полученные температурные поля позволяют рассчитать скорость испарения расплавленного вещества с поверхности.

Рисунок 12 иллюстрирует изменение интенсивности испарения по радиусу пучка в зависимости от выбранных параметров силы тока.

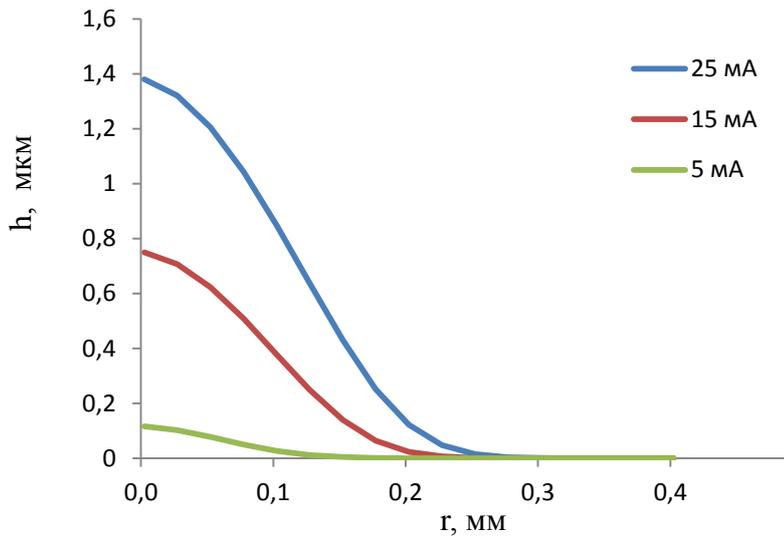


Рисунок 12. Толщина испаренного слоя в момент прекращения действия пучка

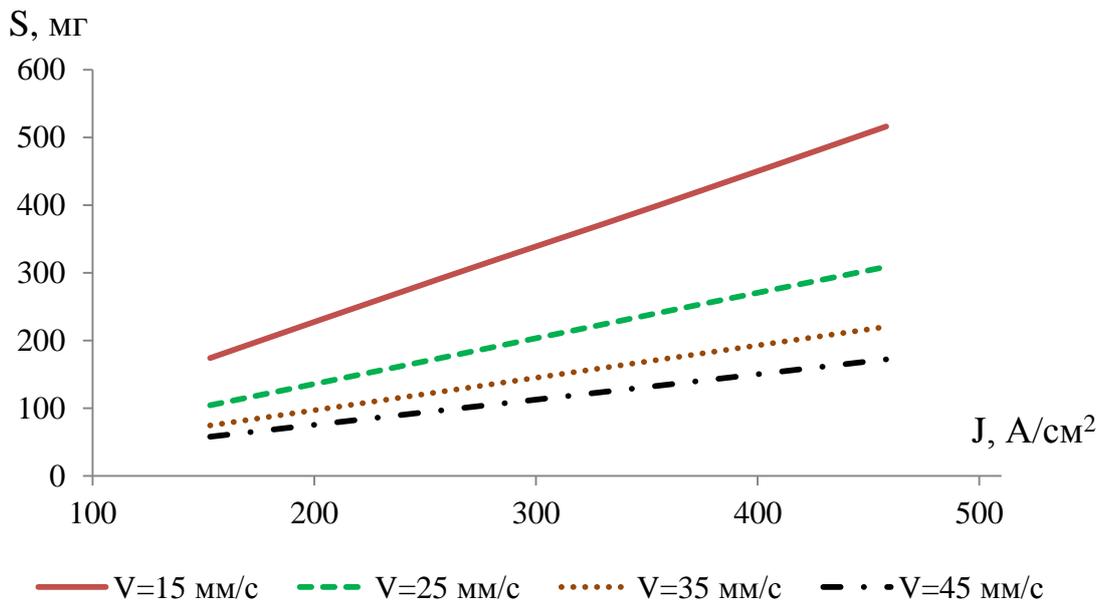


Рисунок 13. Количество испарившегося вещества на 1 метр шва

Рассчитаны и построены поля температур на поверхности вдоль траектории движения электронного пучка со скоростью $V=25$ мм/с, ускоряющем напряжением 28 кВ и радиусом 125 мкм, полученное при мощности пучка 140, 700, 980 Вт на момент установления поля температур.

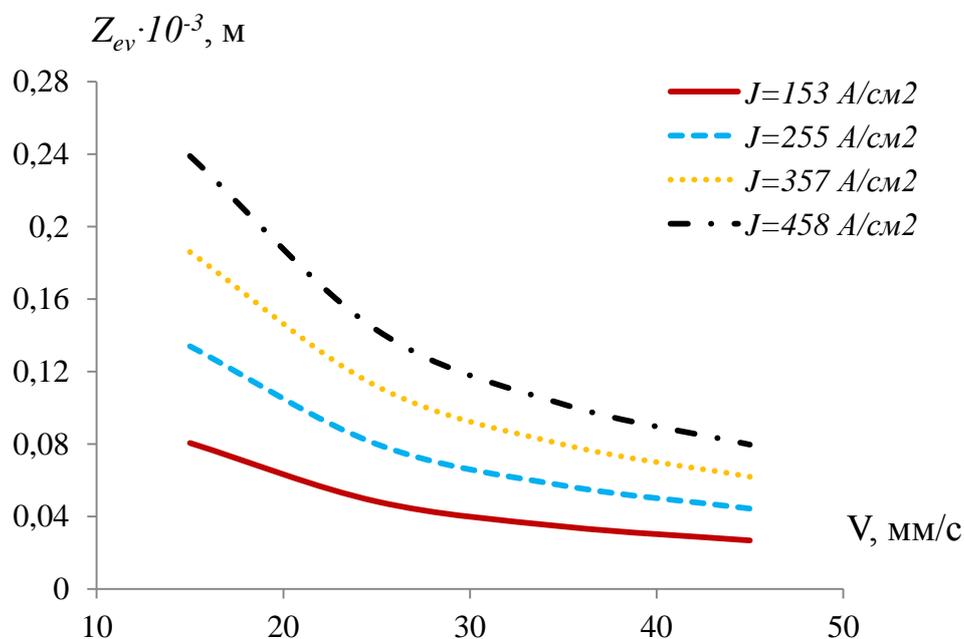


Рисунок 14. Толщина испарившегося слоя в зависимости от скорости пучка

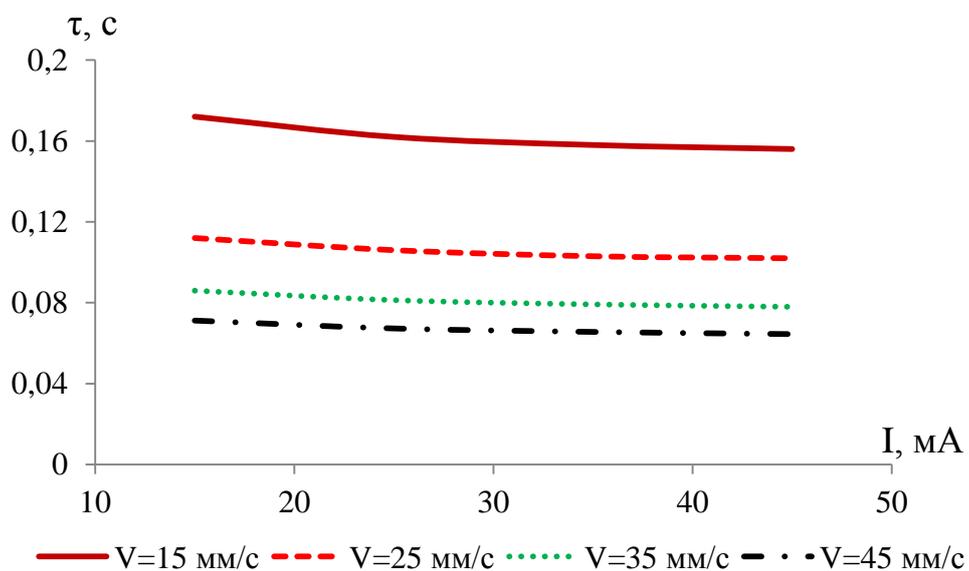


Рисунок 15. Зависимость времени существования жидкой фазы от скорости пучка

Выводы

В работе представлен метод численного решения однофазной задачи Стефана (испарение металла) для образца, облучаемого источником электронов. Проведено компьютерное моделирование влияния условий облучения на процессы испарения, происходящие в образце. Численное исследование показало: при небольших интенсивностях источника испарение образца не имеет существенного влияния на профиль температуры и динамику ее изменения в глубине образца. При больших значениях интенсивности источника испарением образца пренебрегать нельзя, так как значительная часть энергии источника расходуется на испарение образца.

Рассчитаны и построены поля температур на поверхности вдоль траектории движения электронного пучка со скоростью $V=25$ мм/с, ускоряющем напряжением 28 кВ и радиусом 125 мкм.

Полученные данные использованы при расчете удельной массы испарившегося вещества за проход электронного пучка одного на расстояние 1 м сварного шва. Удельная масса испарившегося вещества линейно увеличивается с ростом плотности тока сварки и уменьшается с увеличением скорости сканирования электронного пучка. Эта зависимость позволяет определить потери массы изделия при электронно-лучевой сварке. Для проверки расчетных данных были проведены эксперименты на электронной пушке с плазменным катодом. Полученные в расчетах размеры расплавленной области не противоречат экспериментальным.

4. Результаты исследования образцов сплава 1370

4.1. Исследование механических характеристик

Изменение механических свойств при обработке электронным пучком может привести к серьезным последствиям. В процессе эксплуатации изделие способно выйти из строя, вследствие ухудшения структуры (образование дефектов: трещин, пор) и механических свойств.

Поверхности шва, его форма и размеры приведены на рисунке 16.

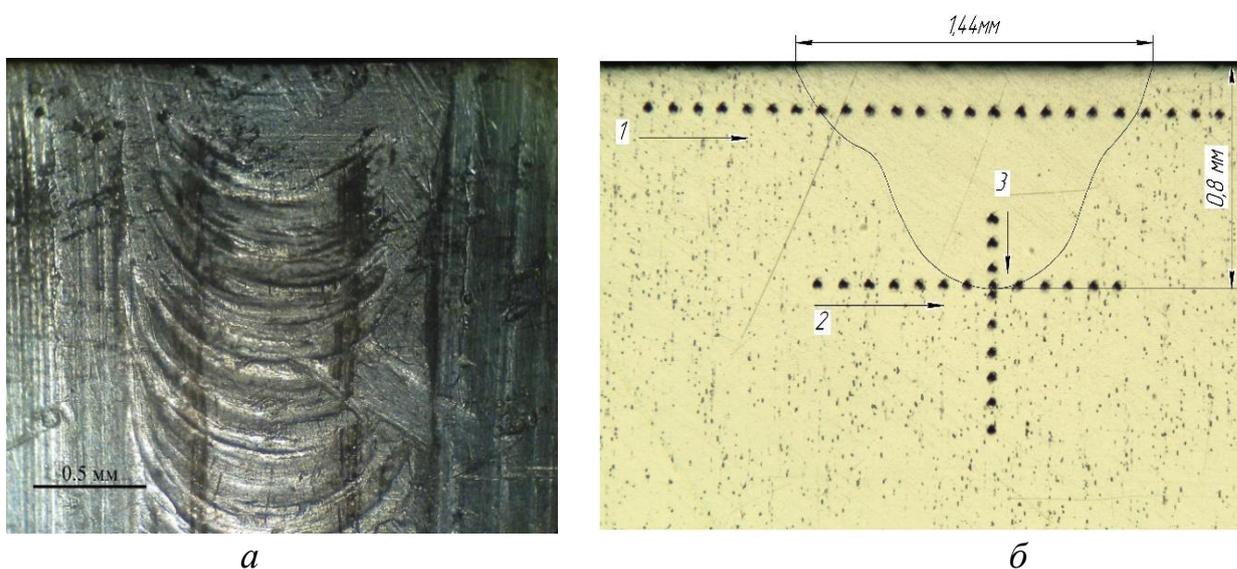


Рисунок 16. Внешний вид поверхности шва (а), его форма и размеры (б)
Твердость измерялась по методу Виккерса при нагрузке 1 кг.

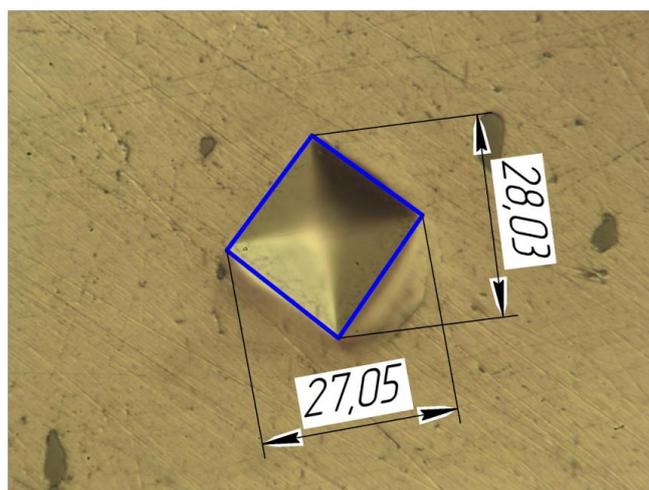


Рисунок 17. Отпечаток индентора твердомера по методу Виккерса

Результаты исследования представлены на рисунке 18.

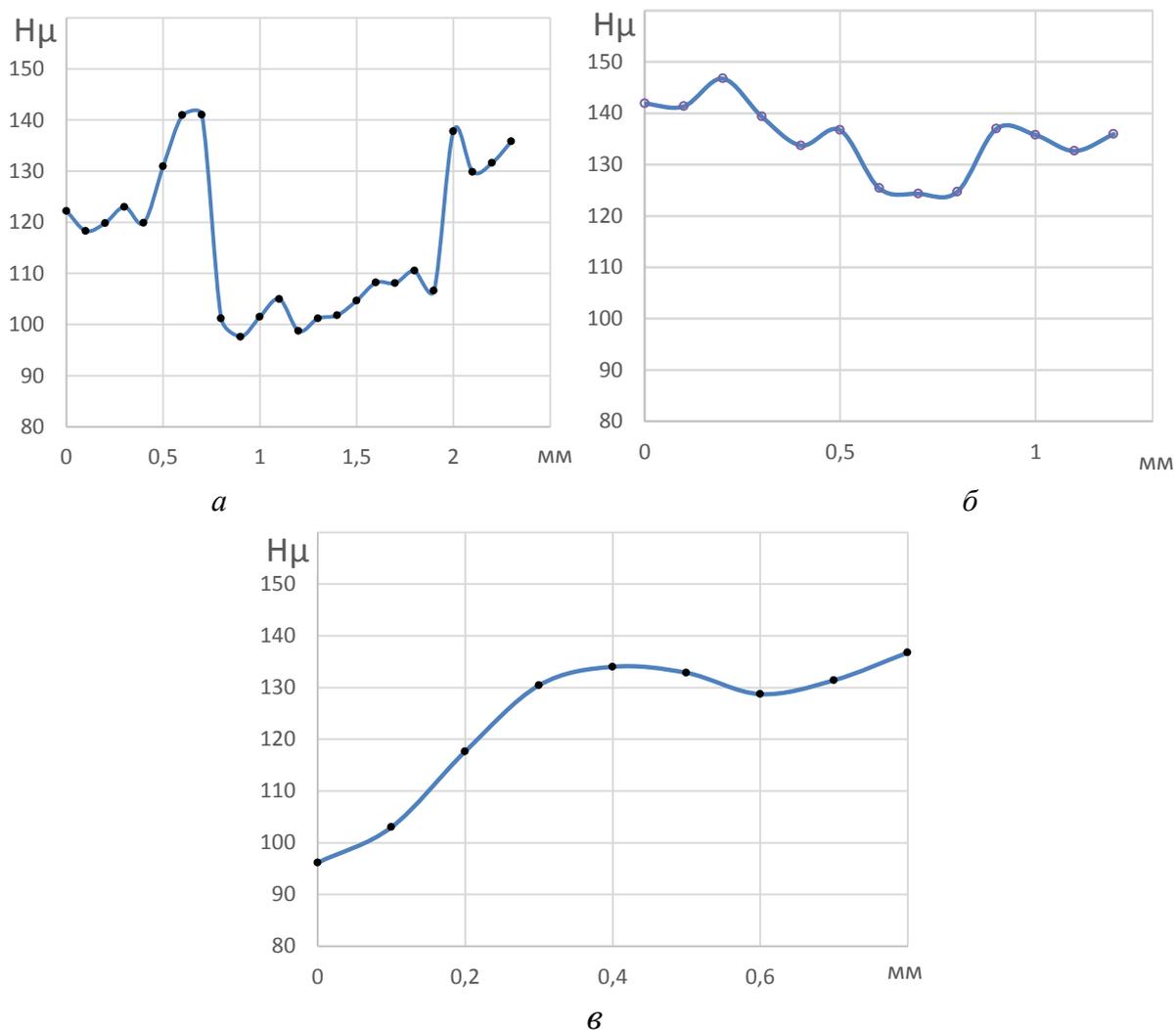


Рисунок 18. Изменение твёрдости шва и ЗТВ по направлениям 1 (а), 2 (б), 3 (в)

В зоне термического влияния наблюдается снижение твердости. Обработка электронным пучком приводит к изменению свойств шва, делая его менее прочным.

4.2. Результаты металлографического исследования

След от пучка представляет собой клиновидное подобие тигля. В процессе облучения металл нагревается и испаряется, затем происходит затвердевание. Охлаждение происходит с разными скоростями, поэтому кристаллизованный материал имеет разную структуру. Скорость

охлаждения уменьшается от стенки формы к центральной ее части, при этом меняется и направление теплоотвода в местах роста кристаллов [27].

Кристаллизация начинается у стенок формы, так как скорость охлаждения в данной области очень большая, поэтому образуются мелкие кристаллы. Первую зону, расположенную у поверхности, называют зоной мелких, по-разному ориентированных кристаллов [28].

Чем дальше от стенок формы продвигается фронт кристаллизации, тем меньше скорость охлаждения, следовательно, увеличивается размер образующихся кристаллов. Во второй зоне растут кристаллы, вытянутые в направлении, обратном теплоотводу – зона столбчатых кристаллов. В центральной части слитка, в данном случае в непосредственном направлении электронного луча, образуется зона крупных, по-разному ориентированных кристаллов. У них нет преимущественного направления роста, так как отвод тепла осуществляется с примерно одинаковой скоростью во все стороны. В верхней части слитка за счет усадки возникает крупная пустота – усадочная раковина.

После окончания эксперимента была выделена серия образцов, на которых были получены кратеры при следующих параметрах: $d=0,250$ мм, $I=15-35$ мА, скорость сканирования 25 мм/с. На полученных результатах исследования макроструктуры видно, что след внутри образца имеет различную структуру, что соответствует ранее описанной модели.

Заключение

На основе расчетной модели, представленной в работе, проанализированы тепловые и эрозийные процессы, протекающие при взаимодействии остросфокусированных электронных пучков с веществом. Специфика облучения потоками электронов состоит в следующем: в исследуемом диапазоне мощности излучения (10^4 - 10^5 Вт/см²) вещество может испытывать фазовые превращения (плавление и испарение), при этом возникают большие градиенты температур, достигаются высокие скорости нагрева и охлаждения. Установлено, что время существования жидкой фазы в сварном шве составляет 0,01 секунды, а скорость охлаждения лежит в интервале 10^5 - 10^6 К/с.

Для проверки расчетных данных были проведены эксперименты на электронной пушке с плазменным катодом. Доказано, что испарение приводит к изменению механических характеристик и элементного состава шва. Зона шва обедняется легкоиспаряющимися элементами цинком и магнием. Потеря массы при испарении на единицу длины составляет 170 мг/м.

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

На сегодняшний день оценка коммерческой ценности разработки является обязательным условием поиска источников финансирования научного исследования и коммерциализации его результатов. Для разработчиков эта часть имеет большое значение, так как они должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Работа посвящена исследованию процессов испарения и переноса атомов на границе раздела фаз при воздействии на материал электронных пучков. Результаты работы актуальны для определения потери массы легкоиспаряющихся металлических материалов и прогнозирования химического состава сварных соединений.

Предполагаемый конечный продукт: технология сварки корпуса гироскопа электронным лучом.

Целевой рынок: университеты, научные центры, лаборатории, предприятия космической отрасли.

В данной главе рассчитаны все финансовые затраты для реализации проекта. Также исследован уровень коммерциализации и описаны пути его осуществления.

5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

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

где K - конкурентоспособность научной разработки;

V_i - вес показателя (в долях единицы);

B_i - балл i -го показателя.

Для сравнения конкурентных технических решений по пяти бальной шкале составим оценочную карту, где B_{ϕ} – электронно-лучевая сварка, B_{k1} – лазерная сварка, B_{k2} – дуговая микросварка.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Энергоэкономичность	0,12	5	3	3	0,6	0,36	0,36
3. Качество сварного шва	0,22	5	4	3	1,1	0,88	0,66
4. Экологичность технологии	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Безопасность	0,09	5	4	4	0,45	0,36	0,36
6. Глубина проплавления	0,06	4	3	5	0,24	0,18	0,3
7. Ремонтопригодность приборов	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,36
8. Потребность в материальных ресурсах	0,09	5	4	4	0,45	0,36	0,36
9. Стоимость установки для исследования	0,07	4	3	5	0,28	0,21	0,35
10. Затраты времени на технологический процесс	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
Итого	1	47	38	39	4,82	3,8	3,65

По итогам анализа, представленном в карте сравнения оценок конкурентных разработок технических решений, можно сделать вывод, что метод электронно-лучевой сварки опережает своих конкурентов по многим показателям. А именно энергоэкономичность, качество сварного шва, экологичность процесса, безопасность, простота в эксплуатации.

5.2. SWOT-анализ

Прежде чем приступить к оценке коммерциализации проекта, а также расчету бюджет необходимо провести 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.

Результаты данного анализа представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 –SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Высокая эффективность технологии</p> <p>С2. Экологичность технологии</p> <p>С3. Низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями</p> <p>С4. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал</p> <p>С6. Более высокое качество продукции, отсутствие разбрызгивание материала</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Требование дорогостоящего оборудования.</p> <p>Сл2. Перенастройка оборудования</p> <p>Сл3. Значительный срок поставок материалов и комплектующих для проведения научного исследования</p> <p>Сл4. Длительный технологический процесс</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Проявление интереса к подобным исследованиям со стороны иностранных партнеров.</p> <p>В2. Возможность использовать достижения ТПУ в научно-исследовательской области</p> <p>В3. Рынок товаров конкурентов является стабильным в плане цен.</p> <p>В4. Применение технологии в различных областях (космос, автомобилестроение).</p>	<p>СиВ:</p> <p>1. Заинтересованность со стороны государственного сектора, следовательно, наличие финансирования.</p> <p>2. Универсальность технологии позволяет использовать его в различных областях науки и техники, реализовать процесс в промышленном масштабе.</p>	<p>СлиВ:</p> <p>1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ для тестирования технологии в реальных рабочих условиях</p> <p>2. Приобретение необходимого оборудования для проведения испытаний опытного образца</p> <p>3. Сокращение срока тестирования опытного образца</p> <p>4. Детальная проработка эксперимента, с целью более эффективного использования оборудования и расходных материалов для снижения финансовых затрат</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые производственные технологии.</p> <p>У2. Длительный срок окупаемости</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p>	<p>СВиУ:</p> <p>1. Продвижение технологии с целью создания спроса</p> <p>2. Создание конкурентных преимуществ готовой технологии</p> <p>3. Сертификация и стандартизация технологии</p>	<p>СлиУ:</p> <p>1. В настоящее время уже имеются подобные методы сварки, по сравнению с которым, разрабатываемый в данной работе метод может быть более энергозатратным.</p> <p>2. Наличие дорогостоящего оборудования может привести медленному темпу окупаемости проекта.</p> <p>3. Расширение области применения за счет развития новых технологий.</p>

Использование интерактивной матрицы помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей SWOT. Интерактивные матрицы проекта представлена в таблицах 5.3-5.6.

Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица проекта.

Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	+	-	-	+	+
	B2	0	+	0	-	+	+
	B3	+	+	+	+	0	+
	B4	+	+	+	+	+	+

Таблица 5.4 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	0	+	-	-
	B2	0	+	+	+
	B3	+	+	+	+
	B4	+	+	+	+

Таблица 5.5 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта							
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	+	+	+	-	-	-
	У2	-	-	0	+	+	+
	У3	+	-	0	-	-	-

Таблица 5.6 – Интерактивная матрица проекта

Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	-	-	0	+
	У2	+	+	+	+
	У3	-	+	0	+

Проведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом, если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

После выполнения SWOT-анализа можно сделать вывод о том, что преимущества используемого метода преобладают над его недостатками. Сильные стороны позволяют в большой степени устранить угрозы.

5.3. Планирование научно-исследовательских работ

Таблица 5.7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Выдача задания	1	Разработка и утверждение темы проекта	руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение теоретического материала по теме исследования	инженер
	3	Выбор направления исследования	инженер
Теоретические исследования	4	Расчет математической модели	инженер
Практические вопросы	5	Планирование проверки разработанной методики	руководитель, инженер
Экспериментальные исследования	6	Подготовка образцов к исследованию	инженер
	7	Изучение оборудования, техника безопасности	инженер
	8	Проведение эксперимента	
	9	Исследование механических свойств	инженер
Обсуждение результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	руководитель, инженер
	11	Определение целесообразности проведения НИР	руководитель инженер
Написание отчета	12	Оформление пояснительной записки	инженер
Защита отчета	13	Подготовка к защите ВКР	инженер

5.3.1. Разработка графика проведения научного исследования

Для выполнения научных исследований была сформирована рабочая группа, в состав которой входили преподаватель и инженер (магистр). По каждому виду работу устанавливалась соответствующая должность исполнителя.

Важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Ожидаемое значение трудоемкости:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min} + 2t_{maxі}}{5}, \quad (5.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы;

t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы;

$t_{maxі}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы.

Для обоснованного расчета заработной платы необходима продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i}, \quad (5.2)$$

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

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Для планирования НТИ была выбрана диаграмма Ганта. Она представляет собой тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (5.3)$$

Коэффициент календарности:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 105 - 13} = 1,48$$

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.

Все рассчитанные значения представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Временные показатели проведения научного исследования

Название	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{\min} , чел-дни	$t_{\max i}$	$t_{\text{ож } i}$			
1	1	2	1,4	Руководитель	1,4	2
2	12	20	15,2	инженер	15,2	23
3	2	5	3,2	инженер	3,2	5
4	4	7	5,2	инженер	5,2	8
5	4	7	5,2	Руководитель, инженер	2,6	4
6	5	8	6,2	инженер	6,2	10
7	7	12	9	инженер	9	14
8	6	11	8	инженер	8	13
9	12	18	14,4	инженер	14,4	25
10	1	2	1,4	Руководитель, инженер	0,7	1
11	3	5	3,8	Руководитель инженер	1,9	3
12	7	12	9	инженер	9	14
13	7	12	9	инженер	9	14

График строится в виде таблицы 5.9 с разбивкой по месяцам за период времени полтора года выполнения научного проекта. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

5.4. Бюджет научного исследования

Сырье, материалы, покупные изделия (за вычетом отходов) приведены в таблице 4.10.

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

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага для печати	упаковка	2	365	730
Картридж для принтера	Samsung SCX	1	2000	2000
Абразивная бумага	диаметр 300 мм	10	100	1000
100 мл (90 %)	2	45	90	100 мл (90 %)
Всего за материалы				2555
Транспортно-заготовительные расходы (5 %)				127,75
Итого по статье С _м				2682,75

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В ходе выполнения НТИ никакое дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью кафедры. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления использованных оборудования.

Амортизационные отчисления рассчитываются по формуле:

$$A = \frac{C_{\text{перв}} \times N_a}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}} \cdot 100} \cdot T_{\text{раб-обор}}, \quad (5.4)$$

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

N_a – норма амортизационных отчислений (в процентах);

$T_{\text{раб-обор}}$ – количество рабочих дней использования оборудования.

В этапе 8 научной работы была использована установка для электронно – лучевой сварки. Из таблицы 9 получено: $T_{\text{раб-обор}} = 9$

$$A = \frac{15000000 \times 10 \%}{365 - 105 - 13 \cdot 100} \cdot 9 = 546,55 \text{ руб}$$

На этапе 6 научной работы был использован шлифовальный станок. Из таблицы 9 получено:

$$T_{\text{раб-обор}} = 6,2$$

$$A = \frac{150000 \times 10\%}{365 - 105 - 13 \cdot 100} \cdot 6,2 = 376,52 \text{ руб}$$

Амортизационные отчисления оборудования приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Амортизационные отчисления на оборудование

№	Наименование	Начальная цена $C_{\text{перв}}$, руб.	Норма амортизаци онных отчислений H_a , %	Количество рабочих дней использования оборудования $T_{\text{раб-обор}}$	Амортизационные отчисления, руб
1	Установка для электронно – лучевой сварки	15 000 000	10	9	546,55
2	Шлифовальный станок	1 500 000	10	6,2	376,52
Итого					923,07

Основная заработная плата

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

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (5.5)$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (5.6)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (5.7)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 рабочих дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 5.12).

Таблица 5.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	53	105
- праздничные дни	13	13
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	24
- невыходы по болезни	—	—
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p, \quad (5.8)$$

где $Z_{ок}$ – заработная плата по окладу, руб.;

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

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью профессора и ученой степенью доктор технических наук, заработная плата по окладу которого составляет 36800 рублей.

$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p = 36\,800 \cdot 1,3 = 47\,840 \text{ руб.}$$

Следовательно, можно получить среднедневную заработную плату научного руководителя:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{47840 \cdot 10,4}{251} = 1982 \text{ руб.}$$

А основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} = 1982 \cdot 6,6 = 13081 \text{ руб.}$$

Инженер получает оклад, равный 9489 руб./месяц. Среднедневная зарплата составляет: $Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{9489 \cdot 1,3 \cdot 11,2}{223} = 619,55$ руб.

Основной заработок инженера, за время преддипломной практики, равен: $Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} = 619,55 \cdot 75,6 = 46837,98$ руб.

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

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (5.9)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$K_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

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

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,12 \cdot 13081 = 1569,72 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата инженера:

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,12 \cdot 46837,98 = 5620,56 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды.

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды:

$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$, где $k_{\text{внеб}} = 27,1$ % коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования).

Таблица 4.13 – Отчисления на социальные нужды

	Руководитель	Инженер
Зарплата	14650,72	52458,54
Отчисления на социальные нужды	3970,34	14216,26

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. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.10)$$

где $K_{\text{накл}}$ – Накладные расходы в ТПУ составляют 16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Для научного руководителя накладные расходы:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,16 \cdot (13081 + 1569,72) = 2344,11 \text{ руб.}$$

Для инженера накладные расходы:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,16 \cdot (46837,98 + 5620,56) = 8393,36 \text{ руб.}$$

Полученный расчет бюджета затрат представлен в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Научный руководитель руб.	Инженер руб.	Итого руб.
Материальные затраты	-	2682,75	2682,75
Амортизационные отчисления оборудования	-	923,07	923,07
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	13081	46837,98	59918,98
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	1569,72	5620,56	7190,28
Отчисления на социальные нужды	3970,34	14216,26	18186,60
Накладные расходы	2344,11	8393,36	10737,47
Бюджет затрат	20970,17	78677,98	99643,15

5.5. Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный

руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель).

5.6. Матрица ответственности

Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 5.15.

Таблица 5.15– Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	Консультант по языковому разделу	Магистр
Разработка и утверждение темы проекта	О				
Подбор и изучение теории и материалов по теме исследования	С				И
Выбор направления исследования	О				
Расчет математической модели					И
Планирование проверки разработанной методики					И
Проведение эксперимента					И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Оценка эффективности полученных результатов	С				И
Определение целесообразности проведения НИР	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Подготовка защиты ВКР	О				И

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности.

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

1) ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;

2) исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта.

3) Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);

4) согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

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

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования.

Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле 5.11.

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (5.11)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max}} = \frac{99643,15}{120593,78} = 0,83$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{120593,78}{120593,78} = 1$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{a2}}{\Phi_{max}} = \frac{103681,89}{120593,78} = 0,86$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля). Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p, \quad (5.12)$$

где I_m^a – интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога;

I_m^p – интегральный показатель ресурсоэффективности для разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки,

устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

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

Таблица 5.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Длительность технологического процесса	0,28	4	5	3
2. Экологичность	0,1	5	4	3
3. Качество сварного шва	0,22	5	4	3
4. Стоимость обрудования для исследования	0,3	5	3	4
5. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	4
ИТОГО	1	24	20	17

$$I_m^p = 4 * 0,28 + 5 * 0,1 + 0,22 * 5 + 0,3 * 5 + 0,1 * 5 = 4,72$$

$$I_1^A = 5 * 0,28 + 4 * 0,1 + 0,22 * 4 + 0,3 * 3 + 0,1 * 4 = 3,98$$

$$I_2^A = 3 * 0,28 + 3 * 0,1 + 0,22 * 3 + 0,3 * 4 + 0,1 * 4 = 3,4$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{финр}^p$) и аналога ($I_{фин}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле 5.13.

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} \cdot I_{фин}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a}, \quad (5.13)$$

В результате получим:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,72}{0,82} = 5,76$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\phi}^{a1}} = \frac{3,98}{1} = 3,98$$

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^{a2}}{I_{\phi}^{a2}} = \frac{3,4}{0,86} = 3,95$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле 5.14.

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^P}{I_{\text{фина}}^a}, \quad (5.14)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта; $I_{\text{финр}}^P$ – интегральный показатель разработки; $I_{\text{фина}}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога. Таким образом получим:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^P}{I_{\text{финр}}^{a1}} = \frac{5,76}{3,98} = 1,45$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^P}{I_{\text{финр}}^{a2}} = \frac{5,76}{3,95} = 1,46$$

В таблице 5.17 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 5.17 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,86	0,83
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,98	3,4	4,72
3	Интегральный показатель эффективности	3,98	3,95	5,76
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,45	1,46	1

Выводы

В данной главе был проведен расчет затрат на выполнение научно-исследовательской работы. Приведена группировка затрат по статьям. Итоговый бюджет разработки составил 99643 рублей.

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разрабатываемая нами технология, является наиболее ресурсоэффективной по сравнению с аналогами.

6. Социальная ответственность

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

В данной главе рассмотрены правила безопасной работы с электронно-лучевой установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях функционально взаимосвязанных средств производства (оборудования, оснастки, предметов труда), 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. Так же, в связи с беспокойной ситуацией в мире, одной из возможных ЧС может быть диверсия.

6.1 Анализ вредных факторов производственной среды

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые в свою очередь классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Работа инженера на установке электронно-лучевой сварки связана с воздействием следующих факторов:

- производственный шум;
- микроклимат;
- освещенность;
- ионизирующее излучение в рабочей зоне.

На предприятии шум может создаваться работающим вакуумным оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами, а также проникать извне.

Шум ухудшает условия работы, оказывает вредное воздействие на организм человека. В условиях длительного воздействия шума появляются раздражительность, головные боли, потеря памяти, повышенная усталость.

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на

рабочих местах не должно превышать 80 дБА. В нашем случае этот параметр соответствовал значению 75 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной и индивидуальной защиты.

К средствам коллективной защиты можно отнести следующие:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения;
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

Средства индивидуальной защиты включают в себя применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

6.1.1. Микроклимат

Микроклимат в производственных условиях определяется следующими параметрами:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха.

Необходимость учета этих параметров может быть объяснена на основании рассмотрения теплового баланса в организме человека.

При высокой температуре воздуха в помещении кровеносные сосуды кожи расширяются, происходит повышенный приток крови к поверхности тела, и выделение тепла в окружающую среду значительно увеличивается.

При низкой температуре окружающего воздуха реакция человеческого организма иная: кровеносные сосуды кожи сужаются, приток крови к

поверхности тела замедляется, и теплоотдача конвекцией и излучением уменьшается. Таким образом, для теплового самочувствия человека важно определенное сочетание температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне.

Повышенная влажность воздуха ($\varphi > 85\%$) затрудняет терморегуляцию организма, т.к. происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность ($\varphi < 20\%$) вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

Работа, относящаяся к инженерам – разработчикам можно отнести к категории легких работ класса I б. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, приведенным в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [39]

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
холодный	19–22	40–65	$\leq 0,1$

Таблица 6.2 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
холодный	15–28	20–80	$\leq 0,5$

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

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность - 40%, скорость движения воздуха - 0,1 м/с, температура летом - 20-25 °С, зимой - 15- 23 °С.

6.1.2. Расчет искусственной освещенности рабочего места

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

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

При учете особенностей процесса работ с установкой допускается применение системы общего равномерного освещения.

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

Выбираем лампу дневного света ЛХБ, световой поток которой равен $\Phi_{\text{лд}} = 3100$ Лм при мощности 40 Вт.

Выбираем двухламповые люминесцентными светильники, мощность каждой лампы - 40 Вт, длина светильника - 1230 мм, ширина – 266 мм.

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

Высота помещения: $H = 3600$ мм.

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

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3600 - 400 = 3200 \text{ мм}$$

Высота рабочей поверхности над полом: $h_{\text{рп}} = 1000$ мм.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{\text{рп}} = 3200 - 1000 = 2200 \text{ мм}$$

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

Определяем расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,2 = 2,42 \text{ м} \quad (6.1)$$

Число рядов светильников в помещении (6.2):

$$N_b = B/L = 4,2/2,42 = 1,7 \approx 2 \quad (6.2)$$

Количество рядов светильников определим по формуле (6.3):

$$N_a = A/L = 6/2,42 = 2,5 \approx 3 \quad (6.3)$$

Общее число светильников:

$$N = N_a \cdot N_b = 3 \cdot 2 = 6 \quad (6.4)$$

Расстояние от крайних светильников до стены определяется по формуле:

$$l = L/3 = 2,42/3 = 0,8 \text{ м} \quad (6.5)$$

Число ламп в помещении:

$$N = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{ЛД} \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 25,2 \cdot 1,8 \cdot 1,1}{3100 \cdot 0,42} = 11,50 \approx 12 \quad (6.6)$$

Расчет искусственного освещения показал, что необходимо 12 ламп мощностью 40 Вт, или 6 светильников.

Расчёт общего равномерного освещения. Для произведения расчёта общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности используется метод коэффициента светового потока, который учитывает световой поток, отражённый от потолка и стен. Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 25,2 \cdot 1,8 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,42} = 2970 \text{ Лм} \quad (6.7)$$

где E_H – нормируемая минимальная освещенность (лк); S – площадь освещаемого помещения (м^2); K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника; для помещения с малым выделением пыли принимаем равным 1,5; z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{\text{ср}}/E_{\text{min}}$ для люминесцентных ламп при расчётах принимаем равным 1,1; N – число ламп в светильнике (шт); η – коэффициент использования светового потока (%).

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения, типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_{Π} .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{6 \cdot 4,2}{2,2 \cdot (6 + 4,2)} = 1,1 \quad (6.8)$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения: $\rho_c = 50 \%$ и потолка $\rho_{\text{п}} = 30 \%$. Значения коэффициента использования светового потока светильников с люминесцентными лампами примем равным 53% .

Проверим выполняется ли условие:

$$-10 \% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \leq 20 \%$$

$$\frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100 \% = \frac{3100 - 2970}{3100} \cdot 100 \% = 4,2 \%$$

Таким образом: $-10 \% \leq 4,2 \% \leq 20 \%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Рассчитаем расстояние между светильниками и расстояние от светильника до края помещения. Расстояние между светильниками по длине помещения L_a определяется по формуле:

$$\frac{2 \cdot L_a + 3 \cdot 266 + 2 \cdot L_a}{3} = 6000 \text{ мм}$$

Получено $L_a = 1950,75 \text{ мм}$, и $L_a/3 = 650,25 \text{ мм}$. Видно, что значение L_a меньше оптимального расстояния между светильниками L .

Аналогично расстояние между светильниками по ширине помещения $L_b = 1044 \text{ мм}$, и $L_b/3 = 348 \text{ мм}$. Схема расположения светильников представлена на рисунке 19.

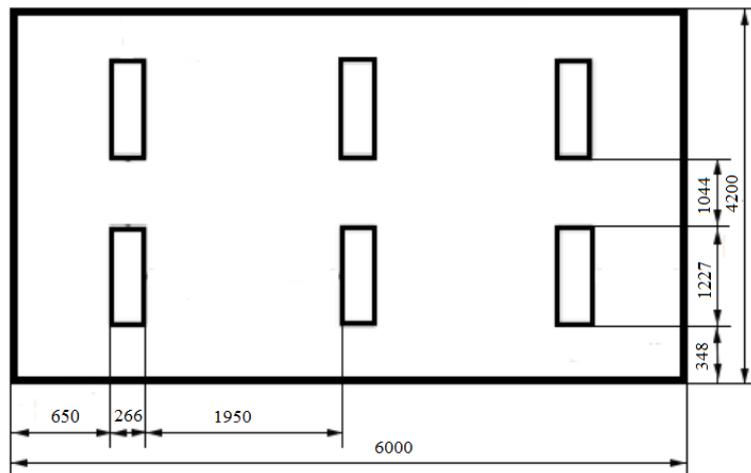


Рисунок 19 – Схема размещения светильников в помещении

6.1.3 Ионизирующее излучение в рабочей зоне

При работе с электронно-лучевым оборудованием работник может быть подвергнут воздействию ионизирующего излучения, в частности рентгеновского. Оно воздействует на ткани живых организмов и может быть причиной лучевой болезни, лучевых ожогов и злокачественных опухолей. Безопасность труда в условия воздействия рентгеновского излучения должна обеспечиваться выполнением требований [28] и норм радиационной безопасности [29]. При работе с рентгеновским излучением необходимо соблюдать меры защиты.

Считается, что поражение прямо пропорционально поглощенной дозе излучения. Предельно допустимая мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения на расстоянии 5 см от защитного экрана 0,07 мкР/с - при 40 часовой неделе, 0,08 мкР/с - при 36 часовой рабочей неделе.

В тех случаях, когда при дозиметрическом контроле обнаружено превышение предельно допустимых мощностей доз рентгеновского излучения, работа на электронно - лучевой установке должна быть прекращена. Работа на установке может быть возобновлена после устранения дефектов в защите и повторного дозиметрического контроля.

Конструкция электронно - лучевых установок должна исключать возможность проникновения рентгеновского излучения во внешнюю среду в местах стыков отдельных частей установки, различных вводов и выводов в корпусе пушки и камеры.

Для защиты от рентгеновского излучения необходимо в камере установить защитные экраны, либо увеличить толщину стенок камеры. Смотровые окна для наблюдения за процессами ЭЛУ должны быть снабжены рентгенозащитными стеклами.

Повышенный уровень рентгеновского излучения может иметь место при нарушении защитных экранов или недостаточной толщины стенок камеры. Измерения рентгеновского излучения должны проводиться не реже

одного раза в год на рабочих местах, где реализуется эксплуатация ЭЛУ.

Допустимые уровни ионизирующего облучения регламентируются «Нормами радиационной безопасности» НРБ 76/87, «Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующего излучения» ОСП 72/87.

Предельно допустимая доза ПДД - годовой уровень облучения персонала, не вызывающий при равномерном накоплении дозы в течение 50 лет обнаруживаемых современными методами неблагоприятных изменений в состоянии здоровья самого облучаемого и его потомства.

Предельно допустимые дозы ПДД облучения устанавливаются для четырех групп критических органов или тканей: I - все тело, красный костный мозг; II - мышцы, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза и другие органы, за исключением тех, которые относятся к группам I, III, IV; III - костная ткань, щитовидная железа и кожный покров (кроме кожи кистей, предплечий, лодыжек и стоп); IV - кисти, предплечья, лодыжки и стопы.

Предельно допустимые дозы облучения приведены в таблице 6.3

Таблица 6.3 Предельно допустимые дозы облучения

Категория облучения	ПДД, бэр/год			
	Группа критических органов			
	I	II	III	IV
А - персонал	5	15	30	75
Б - отдельные лица из населения	0,5	1,5	3	7,5

Используют принципы коллективной защиты:

- источники минимальных ионизирующих излучений, менее активные;
- сокращение времени работы с источником ионизирующего излучения;

- отделение рабочего места от источника ионизирующего излучения;
- экранирование.
- дистанционное управление;
- использование манипуляторов;

Средства индивидуальной защиты;

- халаты и шапочки из хлопковой ткани, комбинезоны;
- резиновые перчатки, сапоги;
- щитки.

6.2 Анализ выявленных вредных факторов производственной среды

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности. При выполнении работы возможно воздействие следующих опасных производственных факторов:

- электрическое напряжение;
- пожаровзрывоопасность.

6.2.1. Электробезопасность

При работе на электронно-лучевой установке работник может быть подвержен действию повышенного значения напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело работника. Опасное напряжение электрической цепи может возникнуть при нарушении изоляции блокированных систем, заземления, источников питания или остаточного заряда на деталях электронной пучки.

Электропитание к электронно-лучевой установке от высоковольтного источника питания должно подаваться по специальному высоковольтному

кабелю, который должен соответствовать техническим условиям и типу электронно-лучевой установки.

Наружная оплетка питающего кабеля должна быть заземлена. Блоки высоковольтного питания электронно-лучевой установки должны быть закрытого исполнения. Все металлические части электроннолучевой установки, которые могут оказаться под напряжением, должны быть заземлены или занулены.

Для обеспечения электробезопасности на постах должны выполняться требования согласно [30]. На рабочем месте должен быть диэлектрический коврик [31]. Перед началом работник должен проверить наличие и исправность токоведущих частей электронно-лучевой установки (пускателей, трансформаторов, кнопок и других частей), заземляющих частей, защитных блокировок.

Перед техническим обслуживанием электронно-лучевой установки убедиться в отсутствии напряжения на ней. При обнаружении неисправностей в работе оборудования отключить установку и доложить о случившемся руководителю подразделения. По окончании работы необходимо выключить установку согласно инструкции и отключить от электросети.

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

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

электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Помещения разделяются на три класса опасности. Используемое помещение относится к классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования с другой стороны.

В лаборатории находятся электрические установки с классами напряжения до 1000 В, в которых, согласно ГОСТ12.1.038-82 ССБТ, предельно допустимые безопасные значения тока, напряжения и сопротивления не должны превышать значений $I < 0.1$ А, $U < 36$ В и $R_{\text{заземл.}} < 4$ Ом соответственно.

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

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

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

- изоляция токоведущих частей;
- малое напряжение в электрических цепях;
- защитное заземление, зануление, защитное отключение;
- применение разделяющих трансформаторов;
- использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;

Индивидуальные защитные средства подразделяются на основные и дополнительные. К основным защитным изолирующим средствам в установке до 1000 В относятся изолирующие штанги, клещи изолирующие и электроизмерительные указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками.

К дополнительным изолирующим защитным средствам относятся средства, которые дополняют основные средства защиты, а также могут служить для защиты от напряжения прикосновения и шагового напряжения. Дополнительными защитными средствами в установках до 1000 В служат диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки.

6.2.2 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [32], по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1- В4, Г и Д. Категории помещений и зданий определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов.

Помещение, в котором выполняется данная работа, по степени пожаровзрывоопасности относится к категории Г (умеренная пожароопасность), то есть включает в себя негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени, и (или) горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

Возможные причины возгорания:

- неисправность токоведущих частей установок;

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

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

На предприятии используется пожарная сигнализация фирмы COBRA, включающая 10 автоматических тепловых и дымовых пожарных извещателей, установленных под покрытием (перекрытием) потолка, а также 3 ручных пожарных оповещателя, использующихся для подачи сигнала о пожаре с территории предприятия.

При возникновении несанкционированного горения или обнаружении пожара немедленно вызывают пожарную охрану. Это делается даже в том случае, если загорание ликвидировано собственными силами, так как огонь может остаться незамеченным в скрытых местах и впоследствии горение может возобновиться.

На предприятии используются углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов, также имеется система автоматической пожарной сигнализации (АПС) фирмы COBRA.

План эвакуации производится в соответствии со схемой на рисунке 20.

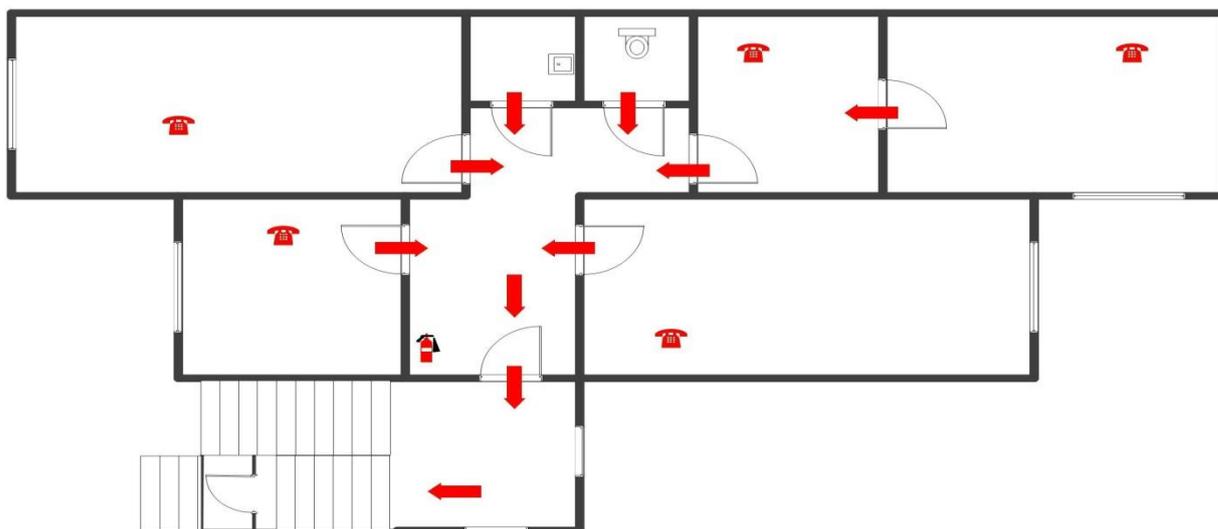


Рисунок 20 – План эвакуации при пожаре

Молниезащита (громозащита, грозозащита) - это группа приспособлений для обеспечения безопасности здания и людей при прямом ударе молнии в дом, за счет ее перехвата и отвода молниевых токов в землю через заземление.

Молниеприемник (молниеотвод, громоотвод) - служит для приёма разряда молнии и располагается в зоне возможного контакта с каналом молнии. В зависимости от защищаемого объекта молниеприемник может представлять собой: металлический штырь, сеть из проводящего материала, металлический трос, натянутый над защищаемым домом. В данном случае на крыше здания расположено два громоотвода в виде металлических штырей.

6.3. Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды - это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения - это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

Необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

6.4. Защита в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы), в данном городе отсутствуют. Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приведет к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям и даже жертвам среди населения. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. Зачастую такие угрозы оказываются ложными. Но случаются взрывы и в действительности.

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 оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

6.5. Правовые вопросы обеспечения безопасности

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

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

Выводы

В данной главе рассмотрены условия работы с установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также средства и методы

защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы. Проведен расчет освещенности помещения, который удовлетворяет требуемым нормам общего равномерного освещения.

Охрана и обеспечение безопасности условий труда для работников, а также ликвидация заболеваний, возникших в ходе профессиональной деятельности, является неотъемлемым условием организации рабочего процесса в современном обществе. Следовательно, одним из основных направлений государственной политики в области охраны труда является обеспечение снижения уровня производственного травматизма и профессиональной заболеваемости путем реализации системы мер, направленных на улучшение условий и охраны труда.

Список литературы

1. Особенности и преимущества электронно-лучевой сварки. А. А. Трошин и др. //Актуальные проблемы авиации и космонавтики, технические науки, Т. 1, № 9, 2013.
2. Кривобоков В.П. Радиационные и плазменные технологии: терминологический справочник / В. П. Кривобоков. – Новосибирск: Наука, 2010, 334с.
3. Тепловые процессы при обработке поверхности металлов сильноточными наносекундными пучками ионов // О. Х. Асаинов и др. //Физика и химия обработки материалов. – 1987. - №2.- С. 53 – 59.
4. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пашенко О.В. Массоперенос в твердом теле под действием мощных пучков заряженных частиц. – Новосибирск: Наука, 1999. – 176 с.
5. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 2014. 248 с.
6. Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии. / И.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов. – М.: Высшая школа, 1984. - 320 с.
7. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ (под редакцией Гоулдстейна Дж. и др.). М.: Мир, 1984, т. 1, гл. 3
8. Средняя температура металла ванны при дуговой сварке алюминиевых сплавов в инертных газах / Ищенко А.Я., Машин В.С., Довбищенко И. лазерным лучом и контроля осевой нагрузки на главные опоры силовых гироскопов по собственной частоте колебаний ротора // ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ ТМКБ.9.26.225.00.00.000 ЭП. № 922-К457/14/102
- 9.
10. ТУ 1-804-398-2002 Листы из алюминиевого сплава марки 1370.

1. Средняя температура металла электродных капель при сварке алюминиевых сплавов в инертных газах / Ищенко А.Я., Машин В.С., Довбищенко И.В. и др. // Автомат. сварка. – 1994. – №1. – С. 48-49. 13.
2. Торопова Л.С. Пересыщенные твердые растворы некоторых переходных металлов в алюминии // Цвет. металлургия. 1987. - № 12. - с. 17.
3. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия. 1978. – 647 с
4. Беляев А.И., Бочвар О.С. Металловедение алюминия и его сплавов: Справочник. - М.: Металлургия. 1983. - 280 с.
5. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. // Nucl. Instrum. Meth. B. 2012. Vol. 292. P. 34–39.
6. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Третьяков Р.С. // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 11/2. С. 148–153.
7. Surpi A., Kubart T., Giordani D., Tosello M., Mattei G., Colasuonno M., Patelli A. // Surf. Coat. Tech. 2013. Vol. 235. P. 714–719.
8. Lewin E., Loch D., Montagne A., Ehiasarian A.P., Patscheider J. // Surf. Coat. Tech. 2013. Vol. 232. P. 680–689. [9] Оскомов К.В., Соловьёв А.А., Работкин С.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 73–76.
9. Sigmund P. // Nucl. Instrum. Meth. B. 1987. Vol. 27. N 1–2. P. 1–20.
10. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Третьяков Р.С., Юрьева А.В. // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 11/2. С. 180–185.
11. Блейхер Г.А., Степанова О.М., Юрьева А.В., Юрьев Ю.Н. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3/3. С. 283–287.
12. Араманович, И.Г. Уравнения математической физики / И.Г. Араманович, В.И. Левин. – М. : Наука, 2004. – 287 с.
13. Годунов, С.К. Уравнения математической физики / С.К. Годунов. – М. : Наука, 2001. – 416 с.
14. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М. : Наука, 2000. – 735 с.
15. Арсенин, В.Я. Методы математической физики и специальные функции / В.Я. Арсенин. – М. : Наука, 1984. – 384 с.

16. Данко, П.Е. Учебное пособие для вузов / П.Е. Данко, А.Г. Попов, Т.Я. Кожевникова. – М. : Высшая школа, 1996. – 416 с.
17. Лабораторные весы OHAUS Pioneer PA413. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ohaus-cis.ru/laboratory/precision-balances/pioneer/>
18. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Платонов М.А. Влияние параметров облучения на эрозию поверхности металлов импульсными ионными пучками // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. - № 8. – С. 49-54.
19. Смирнов, М.М. Задачи по уравнениям математической физики / М.М. Смирнов. – М.: Физматгиз, 1975.
20. Думанский И.О., Александров В.М., Сытин В.Л. Измерение твердости металлов и сплавов: Методические указания к выполнению лабораторной работы по материаловедению. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://narfu.ru/upload/medialibrary/726/izmerenie-tvedrosti-metallov-i-splavov.pdf>
21. А.А. Самарский. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983, с.258-276.
22. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Параметры импульсных ионных пучков для обеспечения максимальных коэффициентов эрозии поверхности металлов // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. - № 5. – С. 31-36.
23. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Эрозия металлов при облучении мощными импульсными ионными пучками // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. - № 10/3. – С. 55-59.
24. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. Model of Metal Surface Erosion under Irradiation by High-Power Pulsed Ion Beams // Journal of Engineering Thermophysics. – 2008. – V. 17. – No. 1. – P. 24-29.
25. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П. Технологические возможности мощных импульсных ионных пучков для эрозионной обработки поверхности

металлов // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2008. - № 1. - С. 23-29.

26. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. Technological Possibilities of High-Power Pulsed Ion Beams for the Erosion Treatment of Metal Surface // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2008. – V. 49. – No. 4. – P. 297-302.

27. Bleykher G.A., Krivobokov V.P., Stepanova O.M. On Evaporation Smoothing Mechanism of Metal Surface under the Irradiation by Submicrosecond Ion Beams // Proceedings of the 9th International Conference on Modification of Materials with Particles Beams and Plasma Flows. – Tomsk, Sept. 21-26, 2008. – P. 230-233.

28. Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А., Степанов Б.П. Эрозия кварца под действием мощных наносекундных ионных пучков // Физика и химия обработки материалов. – 1991. - № 6. – С. 25-32.

29. Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А. Компьютерное моделирование эрозии и термомеханических процессов в твердом теле, облучаемом мощными наносекундными пучками заряженных частиц // Известия ВУЗов. Физика. – 1993. - № 12. – С. 37-41.

30. Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А. Исследование механизмов интенсивного переноса атомов в веществе, облучаемом мощными наносекундными пучками заряженных частиц // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64. – Вып. 5. – С. 37 - 42.

31. Ананьин П.С., Куликов В.Д., Кривобоков В.П., Пащенко О.В., Сапульская (Блейхер) Г.А. Регистрация акустических волн в твердом теле при мощном импульсном электронном облучении // Известия ВУЗов. Физика. – 1994. - № 4. – С. 120-124.

32. И.В.Амирханов, Е.В.Земляная, И.В.Пузынин, Т.П.Пузынина, И.Сархадов. Сообщение ОИЯИ P11-2000-263, Дубна, 2000; Сообщение ОИЯИ P11-2002-24, Дубна, 2002; I.V.Amirkhanov, E.V.Zemlyanaya, I.V.Puzynin, T.P.Puzynina, I.Sarhadov. JCMSE, Vol.2, №1s-2s, 2002, p. 213-224.

33. Климова О.Г. Особенности структуры металла сварных соединений при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / О.Г. Климова, Г.А. Туричин, В.А. Лопота, А.И. Шамшурин, И.А. Сизова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 2. – С. 125.
34. Судник В.А. Численная модель процесса электронно-лучевой сварки с экспериментальной проверкой / В.А. Судник, В.А. Ерофеев, К.Г. Рихтер, К.У. Хайнс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 233-243.
35. Терентьев Е.В. Влияние скорости сварки на формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением / Е.В. Терентьев, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.В. Щербаков // Сварочное производство. – 2014. – № 2. – С. 25-29.
36. Драгунов В.К. Прогнозирование режимов ЭЛС при изготовлении многошовных конструкций / В.К. Драгунов, М.С. Грибков, В.Н. Мартынов, А.Г. Сысоев // Сварочное производство. – 2015. – № 1. – С. 20-22.
37. Бондарев А.А. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов / А.А. Бондарев, Д.М. Рабкин // Автоматическая сварка. – 1974. – № 3. – С. 13-16.
38. Беленький В.Я. Особенности получения качественных сварных швов при электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей большой толщины / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Г.М. Младенов, Т.В. Ольшанская // Автоматическая сварка. – 2012. – № 2 (706). – С. 47-50.
39. Младенов Г.М. Электронно-лучевая сварка: монография / Г.М. Младенов, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Е.Г. Колева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 374 с.
40. Судник В.А. Раздел «Основы сварочного моделирования» в справочнике издательства ASM International (США) // В.А. Судник // Сварочное производство. – 2015. – № 1. – С. 23-26.
41. Глазов В.М., Павлова Л.М. Химическая термодинамика и фазовые равновесия. - М.: Металлургия, 1988.

42. Нечаев В.В. Компьютерное формирование уравнений материального баланса при моделировании процессов получения материалов с заданными свойствами. Сб. трудов - М.: научная сессия МИФИ, 2002, с. 97.
43. Глазов В.М., Павлова Л.М. Химическая термодинамика и фазовые равновесия. - М.: Metallurgy, 1988.
44. Нисельсон Л.А., Ярошевский А.Г. Коэффициенты разделения (распределения) кристаллизационных методов очистки. - Препринт. Академия наук СССР: Черноголовка.: 1985, с. 10-28.
45. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации.-Рига: Зинатне, 1980.
46. Парр Н. Зонная очистка и ее техника. Перевод с англ. - М.: Metallurgizdat, 1963.
47. Вигдорович В.Н. Зонная плавка. Сборник статей. - М.: Metallurgy, 1966.
48. Вигдорович В.Н. Совершенствование зонной перекристаллизации. М.: Metallurgy, 1974.
49. Зо У. Моделирование процессов рафинировочной плавки металлов с учетом испарения примесей с химическим взаимодействием, диссертация кандидата физико-математических наук - Москва: 2007.
50. СанПиН 2.6.1.2748-10. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при работе с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения. Введен 30.03.1999.
51. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Введен 09.01.96.
52. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. Введен 17.07.79.
53. ГОСТ 4997-76. Ковры диэлектрические резиновые. Технические требования. Введен 01.01.02.
54. ГОСТ 312.1.004-86. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Введен 01.01.96.

55. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
56. ГОСТ 12.0.004-90. ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.
57. НПБ 105-96. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.
58. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений. М.: Гострой России, 1997.
59. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. – М.: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2003.
60. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
61. Саломатова Е.С. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке с динамическим позиционированием электронного пучка / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – Выпуск 6. – Ч. 2. – С. 124-134.
62. Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М., Колева Е.Г. Построение тепловых моделей при электронно-лучевой сварке методом функций Грина. Вестник ПНИПУ.-2017. -Т.19, №3. - С. 49-71.
63. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. – М.: Энергоатомизад, 1987. – 184 с.

Приложение А

EXPERIMENTAL EQUIPMENT DESCRIPTION

Студентка

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Байдикова Наталья Владимировна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
руководитель НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Кривобоков Валерий Павлович	д.ф.-м.н., профессор		

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Кабрышева О.П.			

Introduction.....	106
A1. Material <i>for researching</i>	106
A2. Electron beam gun with a plasma cathode assembly and concept of operation.....	107
A3. The dependence of the electron beam output parameters from different conditions. Possibility to control the electron beam parameters.....	110
A4. Equipment for investigation of the working surface structure	111
A4.1. Microscope TRIO -1044	111
A4.2. KB 30S Pruftechnik GmbH Hardness tester	112
A5. Equipment for measuring of removal material	114
A6. Method of energy dispersive x-ray spectroscopy	115
References	117

Introduction

Electron-beam evaporation was carried out on EBU - 0,5 - 6 electron-beam unit with plasma cathode. After each evaporation process the samples were weighed on an analytical weighing scale to determine the amount of the removed substance. The quality of the electron beam can be evaluated by a set of physical parameters such as accelerating voltage, beam current, emittance, brightness and so on.

At the end of the experiment the set of samples with craters formed at different radiation processing modes was prepared. Then, samples cross sections were obtained, and etching process of these samples was realized in NaOH. This was carried out in order to observe clearly boundary passage of beam into the samples, which were further investigated by the TRIO - 1044 optical microscope. Experimental equipment description is given below.

Al. Material for researching

All calculations and experiments are performed on the example of high-tech thermally hardened aluminum alloy 1370 (AD37) system Al-Mg-Si-Cu, developed by the all-Russian research Institute of aviation materials (FSUE VIAM, Moscow).

The chemical composition of the alloy determined by the energy dispersion analysis method is presented in table 1.

Table 1. The chemical composition of the alloy brand 1370

elements	Al	Mg	Si	Mn	Cu	Zn
content, %	93,1	1,74	1,11	0,95	1,9	1,19

As one of the most promising structural materials for aviation and aerospace engineering, it is used for the manufacture of parts of complex configuration,

including those working under the influence of operational heating: sheathing and internal set of fuselages of seaplanes and deck aircraft, wings and stabilizers, in the form of forgings and pressed semi - finished products-for naval aircraft.

Recently, it has become widespread due to the fact that it has a good technological plasticity for hot and cold deformation, significant strength, high resistance to multi-cycle fatigue.

The alloy is the basic structural material of modern and advanced aircraft technology due to the ease, optimal complex of required performance, good adaptability and mastery in the metallurgical and aviation industries.

A2. Electron beam gun with a plasma cathode assembly and concept of operation

Given work was performed by the EBU 0.5-6 electron beam unit based on plasma cathode gun. This unit is fitted out by a two-lens focusing system; the physical configuration of the electron gun is presented in Figure A1.



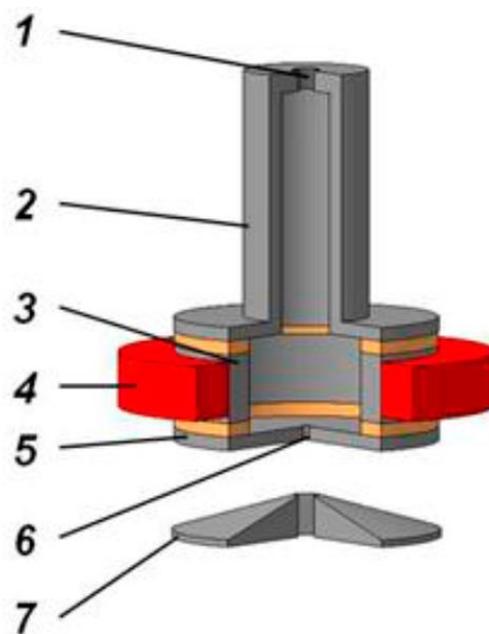
Figure A1 – Electron gun with a two-lens focusing system [1]

The main part of the electron beam apparatus is an electron gun, which is a device that generates continuously focused beam in vacuum. Earlier, electron beam

technology was based on a thermionic cathode electron gun, but recently more and more attention is paid to plasma electronic sources (plasma cathode). Plasma cathodes have a number of fundamental advantages over traditional solid state thermionic cathodes, which are widely used. Primarily this is a higher density of emission current, the possibility of pulsed emission, the ability to work in a high pressure gas up to a pre-vacuum range, non-criticality to the presence of aggressive media in the residual gas atmosphere.

In systems with plasma cathode it is much easier to obtain large cross-section beams; electron sources with plasma cathode are more reliable, because their parameters can be easily and quickly controlled. One of the main features of the plasma cathode is the possibility to select all the electrons, which were generated in the disruptive distance. That provides high efficiency of such type of electron emitter [2].

The electron gun concept of operation is based on the electrons emission from the discharge plasma, which was produced in a special electrode system under the influence of an electric field (Fig. A2).



*1 - the channel; 2 - a hollow cathode; 3 - an anode; 4 - a permanent magnet;
5 - an emitter cathode; 6 - the emission channel; 7 - an extractor.*

Figure A2 – The electrode system of plasma cathode gun [3]

The area in which the discharge is initiated is formed by three electrodes: a hollow cathode - an anode - an emitter cathode. Hollow cathode is a hollow cylinder, the inner surface of which is working area for the discharge. Additional cathode is flat; it localizes opposite the first cathode [3].

There is a hole (channel) of a specific shape in an additional cathode, through which the electrons liberate in a vacuum. The cylindrical anode is located between two cathodes. High voltage, which accelerates the electrons, must be applied to obtain the emission current between the emitter cathode and the accelerating electrode. The discharge chamber is located in a dilatational magnetic field with induction $\sim 0.06 - 0,1\text{T}$, which creates an annular magnet (Sm-Co) [4].

Hollow and emitter cathodes are made of magnetic steel, for this reason they are the final magnet poles. They close the magnetic flux and screen the penetration of the stray magnetic field both in the cathode chamber and an accelerating gap [2]. Emission electron gun system is needed to extract electrons from the gas-discharge plasma and after that to accelerate them to primary focus requirement energy. Emission cathode and accelerating electrode form an emission system. Negative potential, with the respect to the grounded accelerating electrode, is supplied on the cathode.

The electrons, which were emitted from the plasma through the emission surface, enter the high-voltage electric field of the accelerating electrode. They are formed in the beam which is further focused by a magnetic lens. A hole designed for the accelerated electrons output into the drift region is located in the accelerating electrode [4]. Electrons passed HV interval (cathode - accelerating electrode) and accelerated to full energy enter the focusing system magnetic field. Low-voltage reflective discharge of low-pressure is initiated in the discharge chamber, which is presented above.

In order to ignite the discharge, and then ensure that combustion is stable, the pressure in chamber must be $\sim 3 - 10\text{ Pa}$. This parameter value is achieved by constant letting-to-air in to the hollow cathode and pumping through the emission channel [3]. This channel has a small diameter, which allows to obtain a pressure

drop from 3^{-10} Pa to 0.01 Pa in acceleration interval). This is necessary to avoid electrical breakdown in a gas-discharge chamber. The discharge in chamber has non-uniform plasma density distribution with a maximum at the axis.

When voltage is applied to the electrodes of the discharge chamber reflective discharge and plasma are initiated. At relatively small values of the discharge current plasma reaches such concentration n_e that the length of the cathode layer $l_{k,p}$ is much greater than the hole radius r_p in the cavity. The plasma is formed only in the area between the hollow cathode and the emitter.

When I_{cr} discharge current (plasma density) reaches threshold value the $l_{k,n}$ is compared with r_b ; after that splitting of layer arises near the cathode hole. Plasma penetrates the hole, where initiates emission and ionization processes. Because of the multiple electrons oscillations inside the hole, efficient generation of plasma is provided. Developed hollow cathode effect drastically changes the character of the volt-ampere characteristic and increases the maximum of heterogeneity n_e on the system axis. Steady radial plasma density distribution near the emission hole in emitter cathode is caused by the mutual influence of both the cathode chamber and region of the reflective discharge combustion.

A3. The dependence of the electron beam output parameters from different conditions. Possibility to control the electron beam parameters

As mentioned above, the electrodes system generates beam; while the potentials, which are supplied to them, define the shape, size and spatial location of the emitting surface (it depends on the electric field in the accelerating gap).

Electron-beam unit, which was used at given work, has two-lens focusing system. This system gives an opportunity to reduce the beam divergence angle. The maximum diameter of the beam can reach 0.8 mm, considering that the distance between the focusing system and the sample can be ~ 0.5 m. Such system allows to produce a beam diameter of less than 300 microns [3].

Present work was performed on the EBU 0.5-6 electron-beam unit. The main characteristics of this equipment are presented in Table 2.

Table A2 – EBU-0,5 - 6 characteristics [4]

Parameter	Value
Supply voltage, V	380±5%
Cooling water consumption, m ³ / hour	0,5
<i>Limit residual pressure, PA</i>	2·10 ⁻³
Beam diameter, mm	0,25 – 0,8
Accelerating voltage, kV	Up to 30
The adjustment range of the beam current, mA	1-200
Vacuum chamber dimensions: length, width, height, mm	800, 800, 800
Unit weight, kg	932

The acceleration voltage was 28 kV during the during the experiment. This value is slightly different from the maximum. But this value was set to avoid the wear-out of the cathode. Despite the fact that the table 1 presents a wide adjustment range of the beam current, in this study was selected interval from 5 mA to 45 mA. When current is increasing, the undesirable effects appear.

A4. Equipment for investigation of the working surface structure

A4.1. Microscope TRIO - 1044

TRIO 1044 is full service bin-ocular microscope, which allows us to obtain two-dimensional image on a computer through the camcorder or camera (Fig. A3). It is possible because microscope has an integrated optical channel [6].

The optical characteristics of this model of the microscope are suitable for the micro components observation in different research tasks. TRIO – 1044 has variety of advantages such as wide field of view, considerable working distance

(i.e. free distance between the object and the lower lens rim), the variable lens magnification range. Shadowless accent lighting is part of this device, because, depending on the task both shadow - free and directed lighting should be used for volume rendering of the object.



Figure A3 – Microscope TRIO -1044 [6]

Technical features:

- 1) model: TRIO–1044;
- 2) amplification: oculars from 10x to 44x;
- 3) visibility / field of view: from 23 mm (at 10x) to 5,2 mm (at 44x);
- 4) working distance: 90 mm;
- 5) lens (ratio / focus): 1.0x - 4.4x;
- 6) ocular (ratio / focus): DSW10 (10x / 23 mm);
- 7) inclination of oculars: 45° relative of vertical centerline;
- 8) interpillary distance: from 52 mm to 75 mm, stepless control;
- 9) base height: 303 mm [6].

A4.2. KB 30S Pruftechnik GmbH Hardness tester

Hardness testing is often used for material assessment, in research and development work, and in quality control of production processes. It indicates the properties of a material such as wear resistance, ductility, and strength.

KB 30S Pruftechnik GmbH Hardness tester scheme is represented in the figure A4. Hardness tester is operated by computer with special software. A sample should be placed on the table and then raised to the desired height by means of special control buttons; after that the hardness value can be measured. Then it is necessary to set the focus of 20X lens. When the surface is determined, a specific load should be applied.

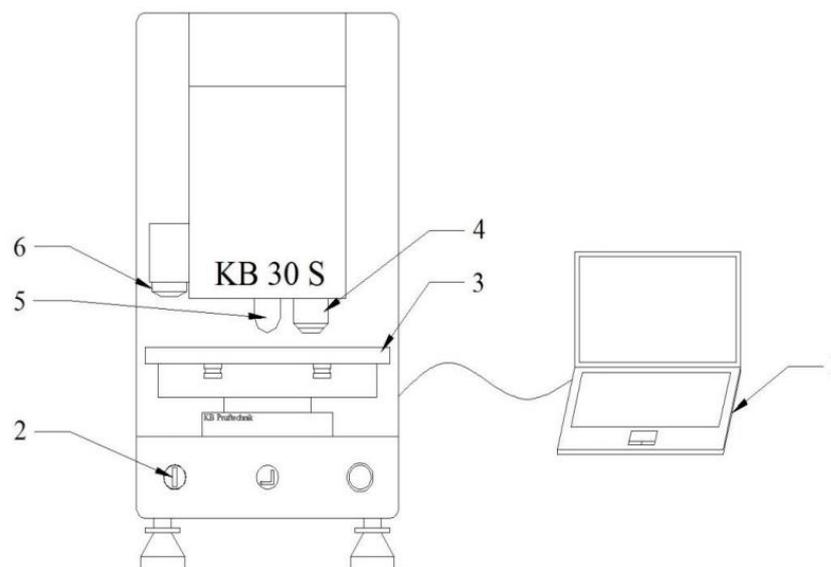


Figure A4 – Hardness tester KB 30S Pruftechnik GmbH scheme [7]

1 – a computer with special software; 2 - button to set the power; 3 - table; 4 - 20X lens; 5 - indenter (diamond pyramid); 6 - the review camera.

After all these operations the surface indentation can be performed with the diamond pyramid. Following the indentation the diagonals length of impression are automatically measured and the hardness value is determined according to the

formula. The Figure A5 shows the hardness measurement scheme (method Vickers).

Also, using the hardness tester metallographic research of the sample surface can be carried out, but the surface should be polished and etched. This hardness tester allows measuring the hardness by both Brinell and Vickers methods. To do the measurement a diamond pyramid with 136° an apex angle between the opposite faces is put in the sample [7].

This method is one of the most common in laboratory practice, because it allows obtaining values with high accuracy. The main advantage of this method is possibility to study particularly thin samples at low loads [8].

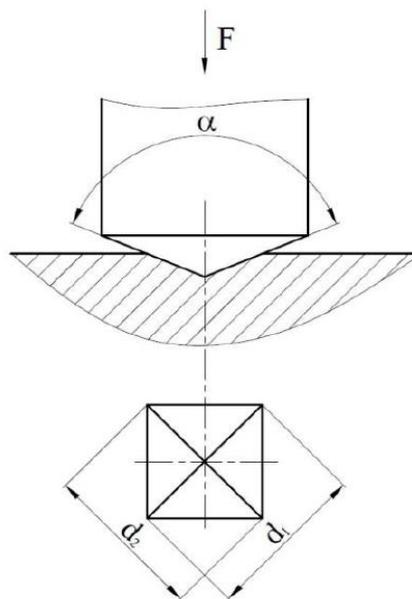


Figure A5 – Hardness measurement scheme (Vickers method)[8]

However, this method requires careful surface preparation such as polish-grinding. Vickers method can be used to measure the macro granular and heterogeneous structure.

A5. Equipment for measuring of removal material

The amount of removed material was measured on PA413 laboratory analytical weighing scales OHAUS Pioneer. This weighing scales can be used for

high accuracy mass measuring [9]. Therefore, they are used both in industry and in the scientific, educational and medical institutions. Using the counting mode of this weighing scales the number of small mass parts can be determined. Also this weighing scales can be applied for the weighing of jewelry, precious metals and stones, light objects. OHAUS Pioneer (PA) weighing scales combines the simplicity of design, usability and optimal combination of features.

Technical features:

- 1) type: laboratorial;
- 2) weighing scales overall size: 196×92×320 mm;
- 3) maximum weight: 420 g;
- 4) discretisation: 1 mg;
- 5) time of response: 3-5 s [9].



Figure A6 – Weighing scales physical configuration OHAUS Pioneer PA413 [9]

A.6 Method of energy dispersive x-ray spectroscopy

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS or EDX) is a chemical microanalysis technique used in conjunction with scanning electron microscopy (SEM). The EDS technique detects x-rays emitted from the sample during

bombardment by an electron beam to characterize the elemental composition of the analyzed volume. Features or phases as small as 1 μm or less can be analyzed.

When the sample is bombarded by the SEM's electron beam, electrons are ejected from the atoms comprising the sample's surface. The resulting electron vacancies are filled by electrons from a higher state, and an x-ray is emitted to balance the energy difference between the two electrons' states. The x-ray energy is characteristic of the element from which it was emitted.

The EDS x-ray detector measures the relative abundance of emitted x-rays versus their energy. The detector is typically a lithium-drifted silicon, solid-state device. When an incident x-ray strikes the detector, it creates a charge pulse that is proportional to the energy of the x-ray. The charge pulse is converted to a voltage pulse (which remains proportional to the x-ray energy) by a charge-sensitive preamplifier.

The signal is then sent to a multichannel analyzer where the pulses are sorted by voltage. The energy, as determined from the voltage measurement, for each incident x-ray is sent to a computer for display and further data evaluation. The spectrum of x-ray energy versus counts is evaluated to determine the elemental composition of the sampled volume.

The Quanta 200 3D is a scanning electron microscope with a thermionic cathode and a focused ion beam, allowing the materials to be accurately applied and removed. The device is equipped with a system of energy dispersive analysis (EDS) and analysis of the structures and textures of crystalline materials by diffraction of reflected electrons. The prefix allows qualitative and quantitative microanalysis in EDS in the range of elements from Be to U.

Technical characteristics of ion optics:

- accelerating voltage 0.5-30 kV;
- 10.0 nm resolution at 30 kV.

References

1. Kornilov S.Yu., Osipov I.V., Rempe N.G. Production of fine-focused beams in electron-beam gun with plasma cathode // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – P. 104 –109.
2. Oks E.M. Electrons sources with plasma cathode: physics, techniques, application // TUSUR. – Tomsk: NTL Press. - 2005. – 212 p.
3. Belyuk S.I., Osipov I.V., Rempe N.G. Industry application of Electrons sources with plasma emitter //Russian Physics Journal. – 200. – P. 77 – 84.
4. Electron-beam unit with plasma cathode electron-beam gun. // Service manual. -.2011.- 49 p.
5. Kornilov S.Yu. Generation and focusing of dense electron beams in electron-optical system with plasma emitter: author's abstract in candidacy dor a degree of PhD in engineering science /TUSUR. - Tomsk. - 16 p.
6. Trinocular stereomicroscope with vision channel TRIO 1044 and TRIO 2070. URL: http://micrus.ru/pdf/TRIO_video.pdf
7. Malkov O.V., Litvinenko A.V. Measuring of the metals hardness: Technical tips. URL: http://wwwcdl.bmstu.ru/mt2/malkov1/izmerenie_tverdosti_metallov.pdf
8. Dumanskiy I.O., Alexandrov V.M., Sytin V.L. Measuring of the metals and alloys hardness: Methodical instructions to laboratory work on materials. URL: <http://narfu.ru/upload/medialibrary/726/izmerenie-tvedrosti-metallov-i-splavov.pdf>
9. Weighing scales OHAUS Pioneer PA413. URL: <http://www.ohaus-cis.ru/laboratory/precision-balances/pioneer>