

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедение
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Структура и свойства титанового сплава, формируемого электронно-лучевом сплавлением проволоки, при изменении термических режимов процесса.

УДК: 669.295.5:621.7.048.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Багинский Андрей Геннадьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Стрелкова И.Л..	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП ТПУ	Гасанов М.А.	д.э.н., профессор		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООТД ШБИП ТПУ	Антоневич О.А..	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Буякова С.П.	д.т.н., профессор		

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-3	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
ОПК(У)-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен обоснованно (осмысленно) использовать знания основных типов металлических, неметаллических и композиционных материалов различного назначения, в том

	числе наноматериалов для решения профессиональных задач.
ПК(У)-2	Способен осуществлять рациональный выбор материалов и оптимизировать их расходование на основе анализа заданных условий эксплуатации материалов, оценки их надежности, экономичности и экологических последствий применения
ПК(У)-3	Способен осуществлять анализ новых технологий производства материалов и разрабатывать рекомендации по составу и способам обработки конструкционных, инструментальных, композиционных и иных материалов с целью повышения их конкурентоспособности
ПК(У)-4	Способен планировать и осуществлять экспериментальные исследования, анализировать и обрабатывать их результаты, делать выводы, составлять и оформлять отчеты по проведенным исследованиям
ПК(У)-5	Способен выполнять перевод технической литературы на иностранном языке, связанной с профессиональной деятельностью в области материаловедения
ПК(У)-6	Способен решать задачи, относящиеся к производству, обработке и модификации материалов и покрытий, деталей и изделий
ПК(У)-7	Способен организовать проведение анализа и анализировать структуру новых материалов, адаптировать методики исследования свойств материалов к потребностям производства и разрабатывать специальные методики
ПК(У)-8	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) С.П. Буякова
 (Ф.И.О.)

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)		
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)		
Раздел	Консультант	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов М.А., д.э.н., профессор ОСГН ШБИП ТПУ	
Социальная ответственность	Антоневич О.А. к.б.н., доцент ООТД ШБИП ТПУ	
Разделы, выполненные на иностранном языке	Демьяненко Н.В., ст. преподаватель ОИЯ ШБИП ТПУ	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:		

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Стрелкова И.Л.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Багинский Андрей Геннадьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ01	Багинскому Андрею Геннадьевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технология материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материалов и оборудования; Квалификация исполнителей; Трудоемкость работы.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации; Размер минимальной оплаты труда.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления в социальные фонды.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка готовности полученного результата к выводу на целевые рынки, краткая характеристика этих рынков
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Построение плана-графика выполнения диссертации, составление соответствующей сметы затрат, расчет величины НДС и цены результата
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Качественная и количественная характеристика экономического и др. видов эффекта от внедрения результата, определение эффективности внедрения
Перечень графического материала	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Бюджет научного исследования 4. Расчет заработной платы 5. График проведения и бюджет НИ 6. Оценка экономической эффективности проекта	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП ТПУ	Гасанов Магермам Али оглы	д.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Багинский Андрей Геннадьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ01	Багинскому Андрею Геннадьевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Структура и свойства титанового сплава, формируемого электронно-лучевым сплавлением проволоки, при изменении термических режимов процесса.	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является электронная-лучевая установка. Основные области применения: медицина, авиастроение и машиностроение.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. 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.	– В санитарных нормах СанПиН 2.2.4-548-96 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия для работы; – ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация; – СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95; – СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение; – ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению вредного воздействия	При проведении исследования возможны проявления следующих факторов: – Шумовой фактор; – Микроклимат;

	– Освещенность рабочей зоны; – Электробезопасность; – Пожар взрывоопасность.
3. Экологическая безопасность:	Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду: – Утилизация люминесцентных ламп; – Переработка бытового мусора.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– При проведении исследований, в лаборатории может возникнуть короткое замыкание токоведущих частей 3D-принтера, также перегрузки электросети, больших переходных сопротивлений. – При проведении исследований существует вероятность появления пожара.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Антоневич О.А..	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Багинский Андрей Геннадьевич		

РЕФЕРАТ

Работа включает в себя 119 страниц, 24 таблиц, 21 рисунок, 4 главы, приложение А (на английском языке), приложение Б, 51 литературный источник.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, 3Д-печать, электронно-лучевая наплавка, макроструктура, микроструктура, титановые сплавы, предел прочности, относительное удлинение, механические свойства

Задачи исследования:

- изучить влияние режимов наплавки на структуру и свойства материала, полученных методом электронно-лучевого производства;
- исследовать влияние режимов наплавки на механические свойства изделия, полученных методом электронно-лучевого производства.

Цель диссертационной работы: установить влияние температурных условий, при электронно-лучевом сплавлении проволоки из титанового сплава ВТ6, на формирование структуры и свойств и на основе полученных данных дать рекомендации по совершенствованию процесса печати и выработки технологической стратегии наплавки.

В ходе исследования рассматривались такие методики как:

Изготовление наплавленных образцов для исследования с помощью электронно-лучевой установки, подготовка образцов для исследования:

- отрезка
- вырезка
- шлифовка
- полирование
- травление.

Металлографический анализ, измерение микротвёрдости (при нагрузке 100гр, время приложения 10 сек), механические испытания.

Обозначения, сокращения, нормативные ссылки

АП – Аддитивное производство;

FDM – Моделирование методом послойного наплавления;

SLS – Выборочное лазерное спекание;

EBM – Электронно-лучевая наплавка;

DMLS – Прямое лазерное спекание металлов;

SLM – Селективное лазерное плавление;

LMD – Лазерное осаждение металла;

WAAM – Аддитивное производство проволоочной дуги;

WLAM – Проволочное и лазерное аддитивное производство;

MIG - Полуавтоматическая сварка

TIG – Аргонотруговая сварка

EBF – Изготовление электронно-лучевой формы произвольной формы;

LENS – Лазерное проектирование сетки;

НИР – Научно-исследовательская работа;

ЭВМ – Электронно-вычислительная машина;

САПР – Система автоматизированного проектирования;

ЧПУ – Числовое программное управление;

МО – Месячный оклад;

ЕСН – Единый социальный налог;

БЖД – Безопасность жизнедеятельности.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	15
Глава 1. Обзор литературы.....	17
1.1 Особенности процесса электронно-лучевой наплавки	17
1.2 Микроструктура и свойства деталей полученных электронно-лучевой плавкой	20
1.2.1 Методы исследования.....	22
1.3 Влияние зон перегрева в аддитивном производстве методом электронно-лучевого осаждения металлической проволоки	25
1.4 Сварка титана со сталью.....	25
1.5 Влияние различных присадочных металлов на электронно-лучевую сварку титанового сплава с нержавеющей сталью.....	29
1.5.1 Микроструктуры поперечных сечений.....	31
1.5.2 Микроструктуры интерфейсов между ТА15 и сварными швами.....	32
Глава 2. Практическая часть	34
2.1 Подготовка образцов к исследованию	34
2.2 Методики измерения микротвердости.....	37
2.3 Изготовление наплавленных образцов	40
2.4 Описание процесса печати образца.....	41
2.5 Анализ структуры	44
2.6 Анализ измерения микротвердости.....	44
2.6.1 Образец с подложкой из 12Х18Н10Т.....	44
2.6.2 Образец ВТ1-0	46
2.7 Результаты статических испытаний на одноосное растяжение	50
Глава 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	54
3.1 Предпроектный анализ	54
3.2 SWOT-анализ.....	58
3.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	60

3.4 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	62
3.5 Цели и результаты проекта	62
3.6 Организационная структура проекта	63
3.7 Ограничения и допущения проекта.....	64
3.8 Планирование управления научно-техническим проектом.....	64
3.9 План проекта.....	64
3.10 Бюджет научного исследования	67
3.11 Расчет затрат на материалы.....	67
3.12 Основная заработная плата	68
3.13 Расчет затрат на социальный налог.....	70
3.14 Расчет затрат на электроэнергию	71
3.15 Расчет амортизационных расходов	72
3.16 Расчет прочих расходов.....	73
3.17 Расчет общей себестоимости разработки	73
3.18 Расчет прибыли	74
3.19 Расчет НДС	74
3.20 Цена разработки НИР	74
3.21 Оценка экономической эффективности проекта	74
Глава 4. Социальная ответственность.....	76
4.1 Введение.....	76
4.1.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	77
4.1.2 Мероприятия при организации рабочей зоны	78
4.2 Производственная безопасность.....	79
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов	79
4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению вредного воздействия	79
4.2.3 Шумовой фактор	81
4.2.4 Микроклимат	82
4.2.5 Освещенность рабочей зоны.....	84
4.3 Электробезопасность	88

4.4 Пожар, взрывоопасность	90
4.5 Экологическая безопасность	91
4.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	93
4.6.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	93
4.6.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	93
4.6.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
Список публикаций студента.....	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	99
Приложение А	104
Приложение Б	118

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования являются аддитивные технологии 3-Д печати, применяемые в машиностроении для получения материалов с изменённой структурой и свойствами.

Целью диссертационной работы является рассмотрение влияния температурных условий при оплавлении проволоки из титанового сплава и выработка рекомендаций по совершенствованию процесса, на основе полученных данных.

Аддитивное производство (АП) – это многообещающая технология, которая позволяет изготавливать большие металлические предметы сложной геометрии и полностью плотные металлические предметы послойно. АП предлагает значительное преимущество перед традиционным производством и обладает потенциалом преобразования в различных промышленных приложениях современного производства [1]. Обычная технология производства часто требует значительного количества механической обработки и не может удовлетворить постоянно растущие требования по повышению эффективности современных машиностроительных производств. Мотивацией к использованию АП является необходимость автоматизации движения машин, минимизации количества отходов, снижения энергопотребления и повышения эффективности использования материалов [2, 3]. Помимо этого, способность АП создавать трёхмерные детали и компоненты произвольной формы на послойной основе является основной движущей силой для достижений [4]. АП металлических конструкций делятся на порошковые и проволоочные технологии.

АП принципиально отличается от традиционных технологий формообразования или субтрактивного производства тем, что оно ближе всего к производству, когда конструкции можно придать заданную форму нанося «слой за слоем», а не штамповкой, ковкой или литьём. Или с помощью такой технологии, как механическая обработка поверхности путём

срезания слоя стружки. АП показало себя универсальным, гибким, легко перенастраиваемым. И поэтому может использоваться в большинстве секторов машиностроительного производства. Материалами для изготовления этих деталей или заготовок может быть самое разное сырьё. Сюда относятся металлические, керамические и полимерные материалы, а также комбинации в виде композитов, гибридных или функционально дифференцированных материалов.

Особое внимание уделяется такому перспективному методу, аддитивного изготовления трёхмерных металлических компонентов, как электронно-лучевая наплавка - (EBM).

Среди всех систем АП, электронно-лучевая наплавка одна из немногих технологий, которые позволяют изготавливать металлические детали напрямую, без механической обработки, без термической обработки для снятия напряжений. Возможность печати металлических деталей сложной геометрии и высокой точности – одно из главных достоинств EBM.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Особенности процесса электронно-лучевой наплавки

В порошковом процессе плавление металлического порошка с использованием лазерного луча или электронного луча, например:

- селективное лазерное плавление (SLM) [5];
- лазерное осаждение металла (LMD) [6];
- процесс электронно-лучевого плавления (EBM).

Скорость осаждения низкая, несмотря на очень высокую точность допусков на размер [4, 7]. Использование порошка в качестве сырья приводит к образованию таких дефектов, как поры, которые могут снизить структурную целостность детали. По сравнению с порошковой основой преимущества проволоки заключаются в том, что скорость осаждения значительно выше, а также неограниченные возможности сборки в кратчайшие сроки [4, 8]. Наплавка на основе проволоки используется в основном для изготовления деталей на основе металлических компонентов вместо порошковой наплавки. Расплавляется проволока с помощью лазера, электронного луча или электрической дуги. Этот процесс включает в себя:

- аддитивное производство проволоочной дуги (WAAM);
- проволоочное и лазерное аддитивное производство (WLAM) [7];
- изготовление электронно-лучевой формы произвольной формы (EBF³);
- лазерное проектирование сетки (LENS) [9].

Среди этих источников энергии лазер является наиболее распространённым из-за его высокой точности позиционирования луча и следовательно более высокой точности формования деталей. Однако для лазеров любого типа характерна низкая энергоэффективность (2-5%) [10]. Электронный пучок – ещё один популярный источник энергии, из-за более высокой энергоэффективности (15-20%). Однако для этого запуска этого процесса требуется рабочая среда с высоким вакуумом [11]. Учёные

отмечают, что эти источники используют очень высокие плотности энергии, что приводит к превосходным размерным свойствам печатных деталей, но имеет несколько недостатков, таких как низкая скорость осаждения, высокая стоимость и ограниченный размер компонентов [12, 13].

Как показано на рисунке 1.1, классификация методов АП показывает, что их можно разделить на порошковые и проволоочные исходные материалы.

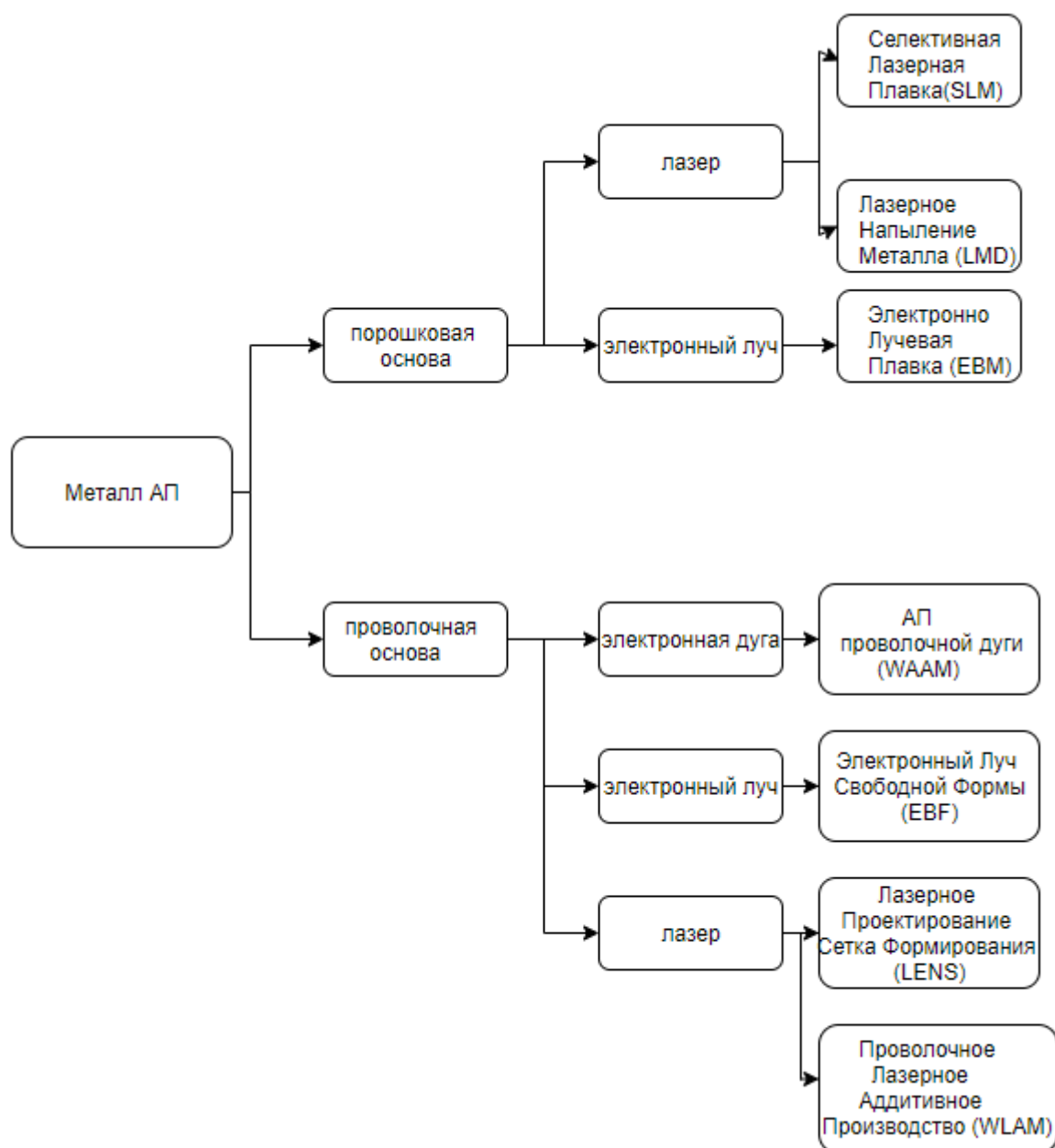


Рисунок 1.1 – Классификация методов аддитивного производства

Перспективным направлением повышения стойкости деталей на базе сталей и медных сплавов может служить метод ЭЛН в вакууме. Это обеспечивается за счёт в основном нанесения покрытий износостойкого типа на их поверхность. С помощью ЭЛН-технологии, можно реализовать процессы как порошковой металлургии, так и микрометаллургии в электронном луче в зависимости от режимов наплавки, непосредственно на детали. Электронный луч создаёт жидкометаллическую ванну на упрочняемой поверхности, куда, в свою очередь, порошковый дозатор отправляет материал соответствующий по составу наплавочным композициям. Малые объёмы расплавленной ванны гарантируют огромную скорость кристаллизации. Что даёт нам в результате, во всем объеме наплавленного слоя сверх однородную ультрадисперсную структуру.

Многопроходная электронно-лучевой наплавки использует эффекта концентрированной энергии сосредоточенной в электронном луче, который отдаёт свою огромную энергию в микрообъём жидкой металлической ванны сконцентрированной на поверхности. Электронный луч имеет определенный угол и траекторию сканирования. Наличие развёртки позволяет лучу многократно, с частотой сканирования, воздействовать на микрообъём сварочной ванны. Время воздействия луча (скорость перемещения или скорость подачи) подбирается так, что бы обеспечить гарантированное расплавление наплавочного порошка, подаваемого в зону оплавления. Такой режим гарантирует однородность фазового состава жидкометаллической ванны. В случае присутствия в расплаве тугоплавкой составляющей, в областях выхода электронного луча вследствие перемещения зоны оплавления, расплав кристаллизуется с более высокой скоростью из-за значительного отвода тепла из жидкометаллической ванны. Тугоплавкая составляющая, которая всегда выступает как упрочняющая, одновременно играет роль дополнительного центра кристаллизации. В результате такого механизма кристаллизации, когда дисперсные частицы не успевают про взаимодействовать с расплавом. Как результат формирование в

поверхностном слое износостойких композиций образующих высококачественное покрытие с высоким уровнем физико-механических характеристик. Толщиной наплавляемого слоя можно управлять, изменяя скорость подачи наплавочного порошка или увеличивая число наплавленных слоёв. Специфическая особенность этой технологии – это формирование протяжённой (0,5-1,5 мм) переходной зоны между подложкой и покрытием. Что гарантирует нам полное отсутствие отслаиваний в переходной зоне между покрытием и подложкой. Определённый интерес представляет так же совмещение процесса наплавки с синтезом наплавляемого материала, сопровождающегося экзотермическим эффектом.

Как результат - ЭЛН-технология уникальна, как в плане многообразия свойств формируемых порошковых покрытий, так и в плане нанесения покрытий на любые сплавы [14].

1.2 Микроструктура и свойства деталей полученных электронно-лучевой плавкой

На рисунке 1.2 показано электронно-микроскопическое изображение поверхности титана. Структура образцов содержит альфа-фазу в виде пластин; бета-фаза представлена в виде стержней между альфа-пластинами. Размеры альфа-пластин увеличиваются при увеличении тока пучка. Такая микроструктура прежде всего определяется скоростью охлаждения расплава в сварочной ванне. Так же как и при термической обработке скорость охлаждения влияет на микроструктуру сплавов, в первую очередь [15]. Главным образом это происходит из-за того, что изменение скорости охлаждения регулирует и дисперсию вторичных пластин α -фазы, но и фазовый состав сплавов Ti после охлаждения. При медленном охлаждении вторичная α -фаза предпочтительно осаждается на пластинах первичной α -фазы. При более высоких скоростях охлаждения α -фаза в виде пластин, скорее всего, осаждается по границам. Размеры самой β -фаз тоже не постоянны и с увеличением температуры уменьшается. Так же можно отметить, что увеличение тока электронного пучка приводит к увеличению

размера ванны расплава и , как следствие, к уменьшению скорости охлаждения (таблица 1.1).

Микроструктура образцов содержит α -фазу с гексагональной замкнутой кристаллической структурой и β -фазу с объёмно-центрированной кристаллической модификацией.

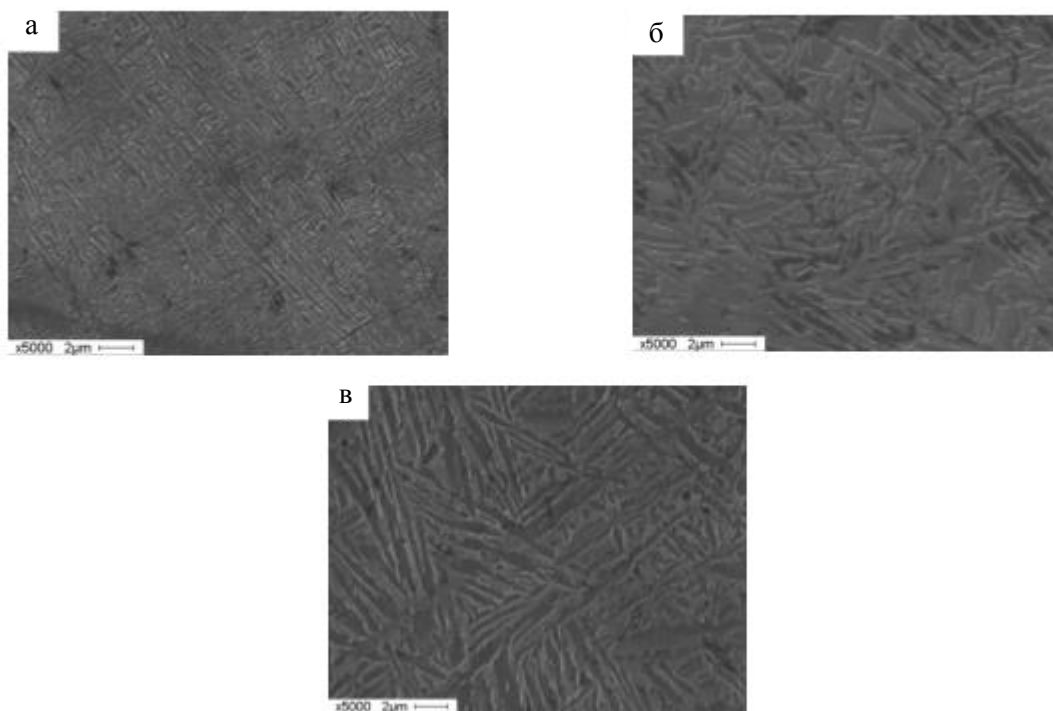


Рисунок 1.2 – Поверхностные рентгено-изображения титанового сплава, полученного электронно – лучевой наплавкой при различных токах пучка:

а – ток пучка 3 мА, б – ток пучка 4 мА, в – ток пучка 6 мА

Таблица 1.1 – Структурно-фазовое состояние титанового сплава, полученного методом ЕВМ

Ток пучка, мА	Фаза	Содержание фазы, объём %	Параметры решетки, А	Размер кристаллитов	Микро-напряжение, 10^{-3}
3	Ti_шестиугольная	88,0	a = 2,9267 c = 4,6694	30	0,609
	Ti_кубическая	12,0	a = 3,2384	18	1,079
4	Ti_шестиугольная	85,6	a = 2,9261 c = 4,6708	34	0,148
	Ti_кубическая	14,4	a = 3,2475	20	2,075
6	Ti_шестиугольная	83,9	a = 2,9280 c = 4,6701	31	0,317
	Ti_кубическая	16,1	a = 3,2391	14	3,302

Установлено, что при изменении тока пучка микронапряжения в β -фазе титана возрастают. Кроме того, наблюдается изменение объёмного содержания β -фазы в зависимости от параметров электронно-лучевого плавления. Наибольшее содержание β -фазы ($\approx 16\%$ по объёму) наблюдается в образцы, полученные при токе пучка 6 мА; наименьшее содержание β -фазы ($\approx 12\%$ по объёму) наблюдается в образцах, полученных при токе пучка 3 мА.

Результаты измерений микротвердости показали, что микротвердость уменьшается с увеличением тока пучка. Снижение микротвердости образцов обусловлено увеличением объёмной доли β -фазы в материале, сопровождающимся повышением тока пучка. Увеличение пластин α -фазы обязательно будет оказывать влияние на микротвердость.

Увеличение тока пучка с 3 до 6 мА приводит к укрупнению Альфа-пластин в структуре изготовленных образцов. Образцы, полученные при токе пучка 6 мА, имеют наибольшее содержание бета-фазы, а также самые высокие значения микронапряжения. Самые твёрдые образцы титанового сплава изготавливаются на токе 3 мА, что связано с меньшим содержанием бета-фазы и более тонкой микроструктурой материала [16].

1.2.1 Методы исследования

Электронно-лучевой метод наплавки металлической проволокой имеет следующие входные параметры: мощность луча, размеры зоны воздействия луча, скорость наплавки и скорость подачи проволоки. Однако есть и мешающие эффекты, например, отклонение скорости подачи проволоки, смещение фокуса электронного луча и влияние зон повторного нагрева. Влияние зон повторного нагрева относится к классу неконтролируемых параметров, поскольку температура под слоем зависит от деталей поверхности и траектории луча [17]. Для решения этой проблемы можно использовать математическое моделирование и экспериментальные методы. Экспериментальные методы включают прямое измерение температуры

поверхности [18] и анализ структуры металла с использованием методов разрушающего контроля, таких как получение макро-шлифов продукта [19, 20]. Прямое измерение температуры поверхности полезно для создания закрытых и непрерывных систем мониторинга. Однако распределение температуры, которое может быть различным при одной и той же температуре поверхности [21] независимо от присадочного материала (проволока или порошок) – не контролируется. Анализ структуры металла даёт исчерпывающую информацию о структуре и свойствах, но требует разрушения образца и трудоёмкого анализа. Используя математическое моделирование, можно детально отслеживать изменения во всем температурном поле во время электронно-лучевого осаждения металлической проволоки и прогнозировать параметры режима осаждения. В этом случае необходима проверка модели. Пожалуй, наиболее рациональным методом исследования является совместное проведение вычислительных и лабораторных экспериментов с последующим анализом их результатов [22].

Разработанная модель проверена по результатам экспериментов, проведённых на электронно-лучевых системах АЭЛТК-12 и ЭЛА-40И. Обе системы оснащены идентичными электронными пушками с ускоряющим напряжением 60 кВ и максимальной мощностью пучка 40 кВт. Фотография цилиндрической конструкции и ее разрез в поперечном сечении представлены на рисунок 1.3.

В результате проведения экспериментов было установлено, что при постоянной скорости наплавки (340 мм/мин) и скорости подачи проволоки (1500 мм/мин, диаметр проволоки 1,2 мм) структура и свойства металла изменяются. Процесс осаждения проволоки проходил в два этапа с двухчасовым перерывом на охлаждение. На каждом этапе наносилось 19 слоёв. Габариты изделия, соответствуют расчётным, принятым при моделировании образца и расчете траектории. Мощность пучка 1,5 кВт (ток пучка 25 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ). При нанесении начальных слоёв проволоки увеличение длины ванны расплава приводило к увеличению

дендритов между слоями. Это связано с ухудшением отвода тепла от ванны расплава [23]. Нижние слои были тоньше верхних, потому что процесс проводился на холодной подложке. Когда был реализован второй этап (после нанесения 11 из 19 слоёв, см. рисунок 1.3), ток пучка был уменьшен с 25 мА (мощность пучка 1,5 кВт) до 22,5 мА (мощность пучка 1,35 кВт). Это замедлило рост размера ванны расплава.

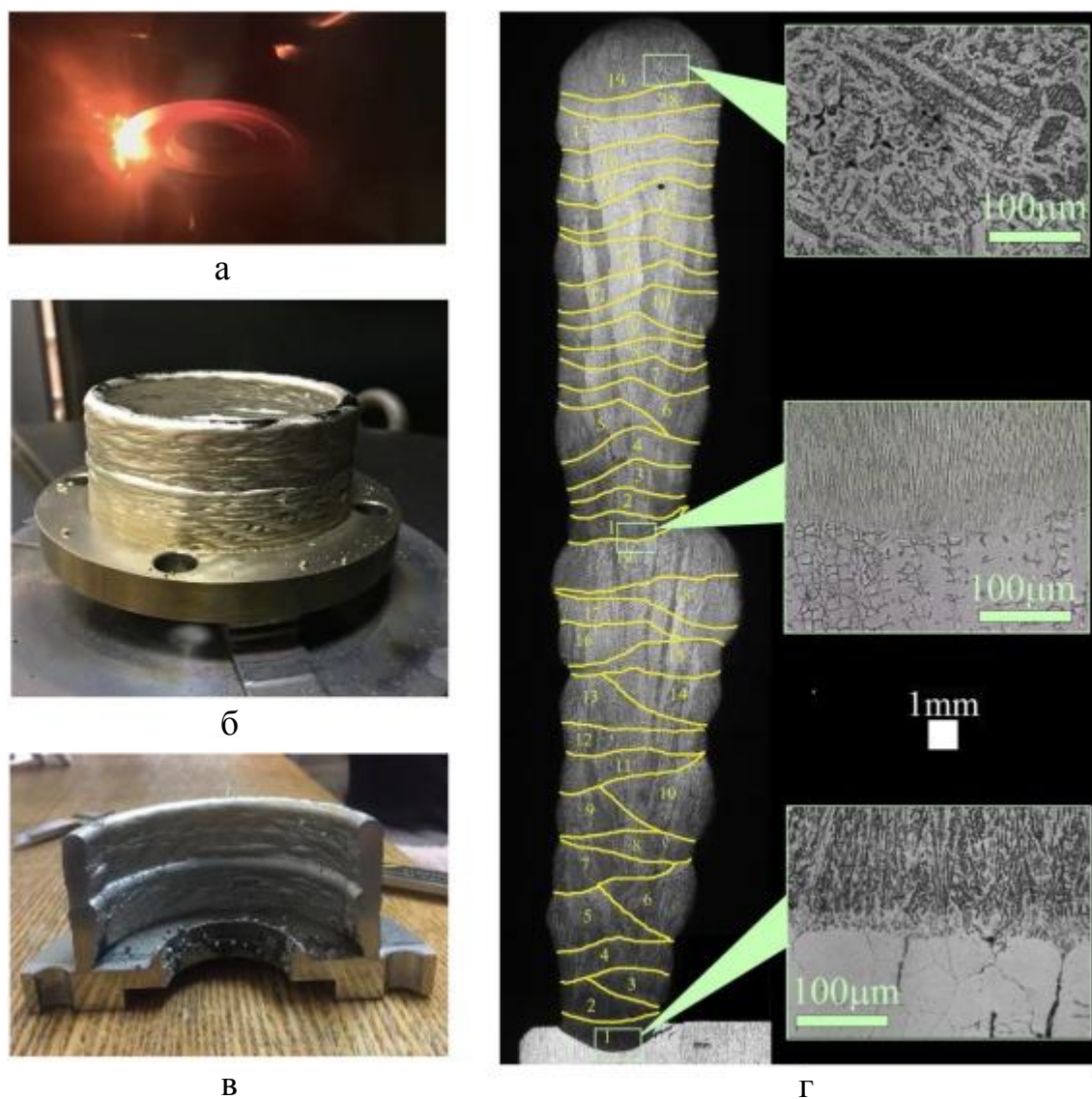


Рисунок 1.3 – Процесс изготовления цилиндрической конструкции (а), полученное изделие (б, в) и его макросечение (г)

Экспериментальные исследования, проведённые в идентичных условиях на одном материале, показали адекватность созданной модели.

Таким образом, было экспериментально подтверждено, что рост дендритов происходил по мере увеличения ванны расплава от слоя к слою.

1.3 Влияние зон перегрева в аддитивном производстве методом электронно-лучевого осаждения металлической проволоки

Однако управление процессом наплавления металлической проволоки является сложной технической задачей, поскольку необходимо обеспечить постоянство формы наплавленного слоя, а также размеров и свойств материала. Для этого, одной системы ЧПУ недостаточно [24]; необходимо использовать системы обратной связи [25].

Для контроля параметров наплавленного слоя некоторые исследователи предлагают использовать инфракрасные камеры, датчики отраженных электронов [26], видеокамеры видимого диапазона [8] и устройства лазерного сканирования в сочетании с другими техническими устройствами [27]. Из всех этих методов инфракрасные камеры – лучший способ контролировать распределение температуры по поверхности осажденного слоя [28]; однако высокая стоимость делает их нецелесообразными в серийном производстве.

Ни один из этих методов управления параметрами осажденного слоя не дает оснований для изменения формы и размера осаждаемого слоя. Следовательно, в дополнение к экспериментальным методам необходимо использовать теоретические методы (математическое моделирование) [29], которые поддерживают прогнозы относительно тепломассопереноса в процессе электронно-лучевого осаждения металлической проволоки.

1.4 Сварка титана со сталью

Любая отрасль машиностроения требует применения каких материалов, которые объединяли бы в себе самые разнообразные и

противоречивые свойства. К таким и относятся биметаллы один из видов металлических композиционных материалов, имеющие слоистую структуру и состоящие как минимум из двух и более слоёв металла, прочно соединённых между собой металлической связью.

Проводящийся маркетинговый мониторинг показывает наличие постоянного, устойчивого спроса на международных рынках на биметаллические изделия типа сталь-титан, объединяющий в себе исключительную коррозионную стойкость, свойственную титану, с высокими прочностными и технологическими характеристиками сталей. Главный заказчик и потребитель каких композитов предприятия ракетно-космической, авиационной отраслей, химического и энергетического машиностроения. Единственный фактор, создающий определённые трудности при производстве биметаллических пластин типа сталь-титан связан с проблемой получения качественного шва между титаном и сталью.

Использование конструктивных элементов из титана со стали гарантирует снижение веса изделий, что для авиации и космонавтики имеет решающее значение. Исследования по сварке титана со сталью разного класса проводятся в последние годы особенно интенсивно. В работах разных авторов имеются данные о положительном решении вопросов точечной сварки тонколистовых титана и стали. Но пока задача сварки титана со сталью аустенитного класса, до сих пор не имеет однозначного решения и оставляет много открытых вопросов .

Сварка этих двух сплавов представляет проблемы из-за заметного несоответствия физических и химических свойств. Традиционные методы сварки плавлением показывают некоторую перспективность, но принципиально сложны по целому ряду причин, среди которых выделяются образование избыточных интерметаллических соединений и термические искажения деталей [30, 31, 32] используется двусторонняя дуговая сварка MIG-TIG для соединения титанового сплава с нержавеющей сталью, а механические свойства могут быть улучшены с помощью присадочных

металлов Cu-Si для контроля образования [33] изучил лазерную сварку титанового сплава с нержавеющей сталью и обнаружил, что путем смещения лазерного луча в сторону СС можно получить более прочные соединения. Эти два метода все еще влекут за собой проблемы, связанные с плавкой металлов.

Сварка титана со сталью даёт сварной шов с максимальным содержанием железа в титане, в пределах его возможной растворимости. Поэтому классическое соединение титана со сталью с использованием сварки плавлением, гарантирует получение швов с низкой пластичностью, трещины в них образуются уже в процессе сварки и холодные и горячие. Эта проблема ещё больше обнаруживается при сварке титана с хромо-никелевыми сталями аустенитного класса. Сложные интерметаллические соединения титана с железом, хромом и никелем, образуются в этом случае, делают сварной шов еще более хрупким.

Данные полученные при измерении микротвердости сварных швов и зоны сплавления дают основание считать, что включения в микроструктуре шва представляют собой разнообразные сложные интерметаллические соединения титана с железом, хромом и никелем. И образование трещин в шве, как раз связано с высокой концентрацией интерметаллидов в зоне сплавления.

Включения интерметаллидов можно обнаружить и по линии сплавления основного металла с титаном. Одно из перспективных направлений по борьбе с формированием интерметаллидов устранение процессов перемешивания расплавленных металлов при сварке и как результат получение соединений титана со сталью с высокой пластичностью сварные швов.

На сегодняшний день эту задачу можно решать различными путями например: использовать технологию пайки, когда более легкоплавкий металл выступает в качестве припоя, растекаясь по покрытию, нанесённому на

поверхность более тугоплавкой детали и образуя сварно-паянное соединение).

Но к сожалению из-за своей природы титан имеет удовлетворительную смачиваемость с очень узким кругом металлов, таких как цирконий, ниобий, тантал, ванадий, молибден и гафний. Причём наибольшую пластичность показывают соединения титана с цирконием, ниобием, а так же танталом.

А вот стали, даже не аустенитного класса, не сваривается непосредственно ни с одним из приведенных ранее металлов, кроме ванадия.

Из всего сказанного следует, что единственным металлом, который подходит в качестве разделительного слоя при сварке титана и стали, является ванадий [34]. Так как и с титаном и с железом ванадий может образовывать непрерывный ряд твёрдых растворов.

Так же хорошие результаты были получены при использовании комбинированных вставок для пайки , включающей кроме ванадия ещё и бронзу.

Но разрабатывая любую сварочную технологию нужно, прежде всего, стремиться к получению равнопрочного соединения. И с этой целью лучше всего справился технический тантал в сочетании с высокопрочными бронзами.

Наилучшие характеристики сварных соединений технического титана и низколегированных титановых сплавов с углеродистыми и, в первую очередь, с аустенитными сталями были получены при применении бронз с пределом прочности до $70 \cdot 10^7$ Н/м², упрочняемых как и термически так и механически (нагартовкой или наклёпом).

В результате проведённых исследований было установлено, что при сварке биметалла титан-сталь с полным проплавлением основного слоя, достигает температура зоны сплавления достигает 1200°C, Что делает возможным образование твердой фаз с высокой хрупкостью, располагающихся на ширину до 3 мм от центра шва. Поэтому для

качественного сварного соединения плакирующий слой при подготовке кромок необходимо удалять на ширину не менее 6 мм.

Коррозионная стойкость сварных соединений титана со сталью недостаточно изучена. В результатах некоторых исследований имеются сведения о том, что в растворах соляной, серной и щавелевой кислот титан имеет потенциал, более отрицательный, чем нержавеющая сталь. Поэтому в паре в гальванической паре титан - нержавеющей сталью скорость коррозии титана будет обязательно снижаться. Но скорость коррозии нержавеющей стали остаётся без изменений. Это явление анодной защиты титана наблюдается не только при комнатной температуре, но и в кипящих растворах перечисленных кислот.

1.5 Влияние различных присадочных металлов на электронно-лучевую сварку титанового сплава с нержавеющей сталью

Было признано, что традиционные методы сварки плавлением не подходят для соединения титановых сплавов с нержавеющими сталями из-за металлургической несовместимости. Поэтому метод твердотельного соединения является жизнеспособным решением для преодоления этой трудности путём предотвращения диффузии легирующих элементов [35]. Однако прямое твердотельное соединение также очень сложно. Это объясняется низкой растворимостью железа в альфа-титане при комнатной температуре учёные предположил, что хрупкость интерметаллидов FeTi и FeCrTi ухудшает механические свойства диффузионные связи между титановыми сплавами и нержавеющими сталями было доказано, что интерметаллиды TiFe образуются на границах раздела при сварке трением и сварке взрывом титановых сплавов с нержавеющими сталями. Разрушение произошло на границе раздела на основе интерметаллидов, и прочность уменьшалась с утолщением слоя интерметаллидов. В настоящее время косвенное соединение обычно осуществляется путем добавления промежуточного металлического слоя, такого как Ni, Cu или Al, для

предотвращения атомной диффузии между Ti и Fe, Cr или Ni [36]. Среди межслойных металлов, упомянутых выше, наиболее часто используется медь. Медь не образует хрупких интерметаллидов с железом, хромом, никелем или углеродом. Кроме того, это мягкий металл, который может деформироваться и ослаблять напряжение, вызванное несоответствием линейного расширения.

Электронно-лучевая наплавка считается наиболее часто используемым методом сварки плавлением для соединения разнородных металлов из-за определённых преимуществ, таких как высокая плотность энергии, вакуумная атмосфера и точный контроль положения и площади нагрева [37]. Кроме того, может быть получена очень узкая зона теплового воздействия

Поэтому целесообразно рассматривать электронно-лучевую наплавку в качестве предпочтительного процесса-кандидата для сварки плавлением титановых сплавов с нержавеющей сталью.

1.5.1 Микроструктуры поперечных сечений

На рисунке 1.4 показаны микроструктуры поперечного сечения сваренного электронным лучом соединения Ti/сталь с и без присадочных металлов Ni, V, Cu. Прочное соединение не могло быть достигнуто без присадочного металла и с присадочным металлом V из-за распространения сквозной трещины на границе раздела между сплавом Ti и сварным швом. Присадочный металл Cu с низкой температурой плавления полностью расплавился, в то время как частичный наполнитель V и Ni остается в сварном шве из-за их высокой температуры плавления.

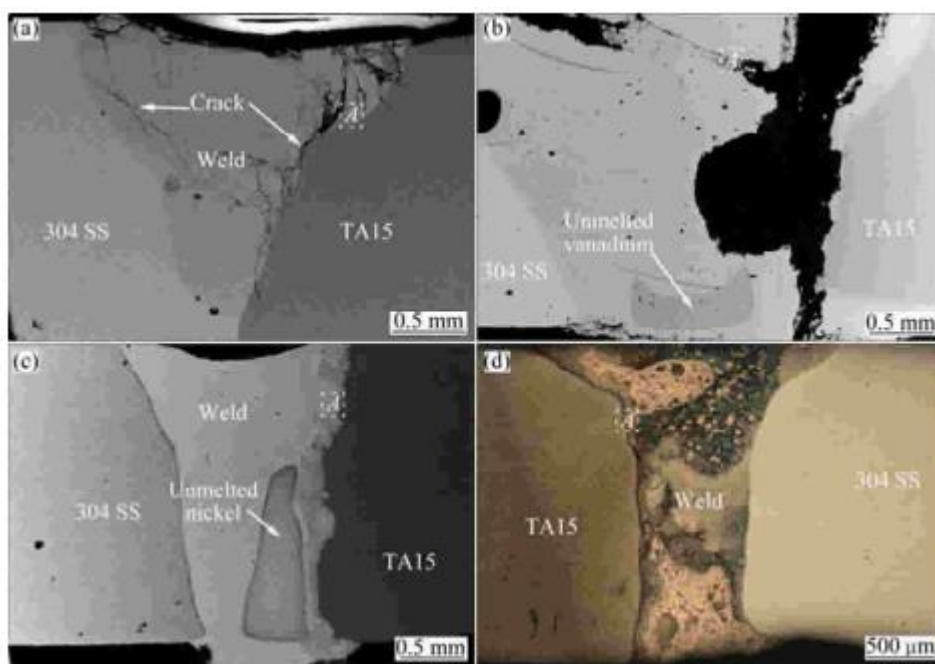


Рисунок 1.4 – Микроструктуры поперечных сечений соединений с различными присадочными металлами: а – без присадочного металла; б – ванадий; с – никель; d – медь

1.5.2 Микроструктуры интерфейсов между ТА15 и сварными швами

Ti является активным элементом и имеет тенденцию образовывать интерметаллические соединения с несколькими металлическими элементами. Следовательно, микроструктуры поверхности раздела Ti были проанализированы и сравнительно изучены. Микроструктуры интерфейсов Ti соединений Ti/сталь показаны на рисунке 1.5.

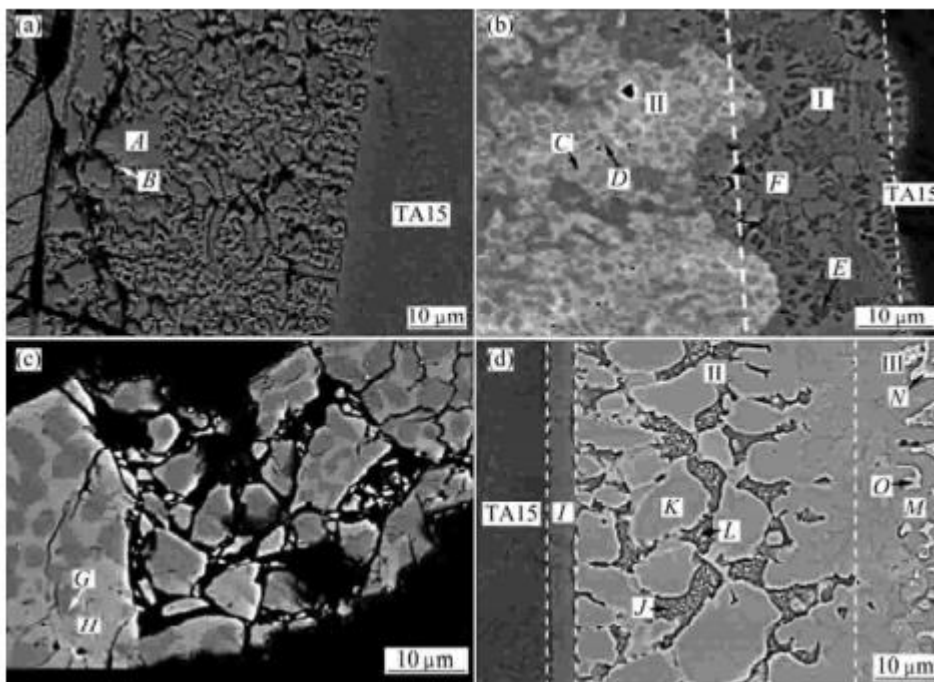


Рисунок 1.5 – Микроструктуры боковых поверхностей раздела Ti соединений Ti/сталь с различными присадочными металлами в зоне А: а – без присадочных металлов; б – никель; с – ванадий; d – медь

Множество плотных трещин образуется вокруг сквозной трещины на поверхности раздела Ti, которая состоит из дисперсионной блочной фазы А и непрерывной распределенной фазы сети Б без присадочных металлов можно идентифицировать как Ti+TiFe и TiFe. Видно, что трещины в основном появились в фазе TiFe. Сварной шов Ti разделен на две морфологически различимые зоны с присадочным металлом Ni, которые обозначены зоной I и зоной II.

Зона II, расположенная в трехфазной области, представляет собой смесь твердого раствора, Fe_2Ti и Ni_3Ti (фазы C и D). Зона I в основном состоит из Ni_2Ti (Фаза F), вокруг которой диспергировано небольшое количество-Ti (фаза E). Показывает, что среди элементов Ti, Fe и V нет тройного интерметаллида [38]. Твердая растворимость V в TiFe довольно низкая. В сочетании с результатами EDS, можно предположить, что фаза G и фаза H представляют собой жидкий раствор титана с некоторым содержанием Ti_2Cu в нем (фаза I). Зона II характеризуется блочными соединениями Ti_2Cu (фаза J) и TiCu (фаза K), а также дисперсно распределённым мелкодисперсным TiCu_2 (фаза L). Следует отметить, что Cu_2Ti является своего рода метастабильной фазой, существующей в диапазоне температур 890-870 °C. Но он был сохранен при комнатной температуре в этом соединении для высокой скорости охлаждения во время электронно-лучевой сварки. Зона III содержит 3 фазы. Он состоит из темно-серых блоков, обозначенных как 3 (фаза M), с тем же типом решетки, что и Cu_4Ti_3 , светло-серая фаза обозначается как 2 (фаза O), с тем же типом решетки, что и Cu_3Ti_2 , и твердым раствором меди (фаза N). Вышеуказанные ожидаемые фазы были подтверждены рентгенологическим анализом. Из анализа, представленного выше, следует, что сварные швы Ti состоят из интерметаллических соединений. А состав соединений, который обуславливает различные свойства сварных соединений, определяется металлургическими реакциями между присадочными металлами и благородные металлы. При использовании присадочного металла новые межфазные компоненты заменяют фазу TiFe в соединении Ti/Fe. Очевидно, что прочность интерферирующих соединений TiNi или TiCu выше, чем у интерметаллидов TiFe.

Глава 2. Практическая часть

2.1 Подготовка образцов к исследованию

Титан и его сплавы труднее подготовить для металлографического исследования, чем стали. Он намного дольше измельчается и полируется. Деформационное двойникование может быть индуцировано в альфа-сплавах чрезмерно агрессивными процессами секционирования и шлифования. Устранение размытия и царапин во время подготовки может быть довольно сложным, особенно для чистого Ti.

Грубая шлифовальная шкурка.

Целью этапа грубого шлифования является создание начальной плоской поверхности, необходимой для последующего этапа шлифования и полировки. В результате секционирования и шлифования материал может подвергнуться холодной обработке на значительную глубину, в результате чего образуется переходная зона деформированного материала между поверхностью и неискаженным металлом. Грубое шлифование может быть выполнено с использованием дисков от 80 до 180 зерен, но необходимо соблюдать осторожность, чтобы избежать значительного нагрева образца. Конечная цель состоит в том, чтобы получить плоскую поверхность, свободную от всех предыдущих следов инструмента и холодной обработки за счет резки образца.

Важным фактором на всех стадиях грубого и тонкого шлифования является то, что царапины должны быть одинаковыми по размеру и параллельными друг другу на любой стадии шлифования. Правильное шлифование включает поворот образца на 90 градусов между этапами, в то время как угол шлифования должен оставаться постоянным во время шлифования на любом этапе.

Образец необходимо тщательно промыть, прежде чем переходить от одной стадии измельчения к следующей.

Несоблюдение этого основного правила приведёт к переносу абразивных частиц между стадиями и вызовет длительные, неприятные проблемы при удалении нежелательных царапин.

Средняя и Тонкая шлифовальная шкурка.

Идея состоит в том, чтобы осторожно переходить от одного этапа к следующему, где абразивы становятся тоньше на каждом последующем этапе. Переход к следующей стадии обработки следует выполнять только тогда, когда все царапины с предыдущего этапа будут полностью удалены. Как правило, последовательные этапы составляют 240, 320, 400 и 600 зернистости SiC, и скорость шлифования должна неуклонно снижаться от одного этапа к следующему. Правильное шлифование включает вращение образца между этапами, в то время как угол шлифования должен оставаться постоянным во время шлифования на любом этапе.

Механическая Полировка.

После шлифования и промытый образец подвергается полировке на войлочном сукне, со скоростью не менее 700 оборотов в минуту, с применением водной суспензии окиси хрома в качестве абразива. Полирование ведётся до тех пор, пока не исчезнут последние штрихи, оставшиеся после шлифования. Время полирования напрямую зависит от твёрдости обрабатываемого материала, а также и других его структурных особенностей.

Шлифы для микроструктурного анализа подготавливались на поперечных сечениях образцов. Шлифование выполнялось сначала на абразивном круге, а затем, последовательно, на дисках для шлифования, величина зерна абразива последовательно уменьшалась за счет смены шлифовальных кругов.

Операция травления.

Микроскопическое исследование отполированного, образца выявит лишь несколько структурных особенностей, таких как включения и трещины или другие физические дефекты. Травление используется для выделения, а

иногда и идентификации присутствующих микроструктурных особенностей или фаз, даже в тщательно подготовленном образце всегда присутствует поверхностный слой поврежденного металла, образующийся в результате заключительной стадии полировки, и его необходимо удалить. Травители обычно представляют собой разбавленную кислоту или разбавленные щелочи в воде, спирте или каком-либо другом растворителе. Травление происходит, когда кислота или база раствора наносятся на поверхность образца из-за разницы в скорости воздействия различных присутствующих фаз и их ориентации. Процесс травления обычно выполняется простым нанесением соответствующего раствора на поверхность образца в течение от нескольких секунд до нескольких минут.

Обычно для правильного травления достаточно от десяти секунд до одной минуты, в зависимости от образца и материала. Образец немедленно промывают под проточной водой, ополаскивают спиртом и сушат на воздухе. Для этой операции использовался травитель стандартного состава: 20-25% HNO_3 , 2-4% HF , и остальное H_2O .

После вытравливания микроструктуры шлифы рассматривали помощью металлографического микроскопа

Микроскопическое исследование.

Образец помещают на подставку микроскопа так, чтобы его поверхность была перпендикулярна оптической оси. Детальный просмотр производится на металлографическом микроскопе высшего Observer Axio-Im производства Karl Zeiss (Германия), максимальное увеличение 1000 крат. Общий вид металлографического микроскопа - рисунок 2.1.

В качестве оснащения микроскоп укомплектован программным обеспечением, которое позволяет проводить количественный анализ, как фазового состава так и структуры сплавов. Возможности микроскопа следующие: изучение структуры в светлом, темном и поляризованном свете; цифровое фотографирование, запись и архивирование результатов; измерение размеров отдельных частиц и фаз в рассматриваемом поле;

наличие нескольких фильтров для повышения качества изображений (яркость, контрастность, резкость); возможность ручного измерения всех геометрических параметров изображения длины, площади, периметра, радиуса окружности, углов.



Рисунок 2.1 – Микроскоп класса Observer Axio-Im

2.2 Методики измерения микротвердости

Твердомер Виккерса Durascan-10, представленный на рисунке 2.2 может использоваться для измерений твёрдости металлов и сплавов методом Виккерса в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007.

Принцип действия твердомеров основан на вдавливании наконечника Виккерса в виде алмазной пирамиды. Для получения результата измеряются обе длины диагоналей восстановленного отпечатка и последующим их пересчётом в значения твёрдости по Виккерсу (HV).

Твердомер представляют собой стационарное средство измерений. Состоит из нескольких узлов программно связанных между собой. Основные узлы это механизм приложения нагрузки и оптический измерительный блок.

Все твердомеры оснащены видеосистемой высокого разрешения, подсветкой на монохроматических светодиодах, автоматической

фокусировкой изображения и программным обеспечением (ПО) для выполнения измерений диагоналей восстановленного отпечатка. Для достоверности результатов по определению твёрдости методом Виккерса поверхность образцов, предназначенная для измерений, обязательно шлифуется и полируется. Для получения результатов по отдельным зёрнам микроструктуры шлиф дополнительно подвергается травлению.



Рисунок 2.2 – Стационарный микротвердомер DuraScan-10.

Принцип измерения твердости по методу Виккерса (HV) заключается во внедрении в испытуемый образец алмазной пирамиды с углом при вершине (между противоположенными гранями) 136 градусов. Нагрузка при проведении измерений выбирается в зависимости от твёрдости, а также толщины образца и может выбираться в интервале от 1 до 100 гр с шагом. Величина твёрдости результат деления нагрузки, приложенной к индентеру на площадь пирамидального отпечатка, которая геометрически определяется по диагонали отпечатка. Метод Виккерса позволяет измерять твёрдость

практически любого материала и любых размерами, соизмеримых с габаритами индентора, в том числе и тонких пластин, слоёв и покрытий.

Тщательная подготовка поверхности образца, чистовое шлифование или полировка обязательное условие для получения достоверного результата. Метод Виккерса не рекомендуется применять для измерения микротвёрдости на поверхностях крупнозернистых структур, так как можно получить большой разброс в результатах измерений из-за малого размера отпечатка.

Для определения микротвёрдости также применялся метод измерения по Виккерсу (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007). Для получения отпечатков прикладывалась нагрузка в 100 гр, время приложения нагрузки 10 сек. После удаления нагрузки измерялись диагонали квадратного отпечатка правильной формы, оставшегося на поверхности (рисунок 2.3).

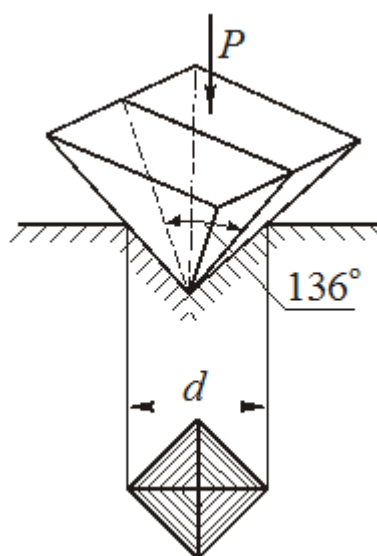


Рисунок 2.3 – Схема отпечатка

Величина микротвёрдости определяется по формуле:

$$HV = 1854 \cdot P / d^2 \text{ кг/мм}^2,$$

где d – длина диагонали отпечатка, мкм;

P – нагрузка вдавливания, гр.

2.3 Изготовление наплавленных образцов

Объектом исследования являются образцы, подложка которых изготовлена из:

- нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T;
- титана BT1-0.

Наплавка осуществлялась методом электронно-лучевой наплавки дорожками проволокой диаметром $d = 0,8$ мм из сплава BT6 для рассмотрения структуры сплава, измерение микротвёрдости и выбора оптимальных режимов сплавления.

Коррозионностойкая сталь марки 12X18H10T (состав, таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Химический состав стали 12X18H10T в %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	W	Fe
<0,12	<0,8	<2,0	<0,035	<0,02	17-19	9-11	<0,4	<0,2	Остальное

Сталь этой марки предназначена для производства деталей, работающих при температуре до $+600^{\circ}\text{C}$. Изделия, можно эксплуатировать в среде не концентрированных кислот, средне агрессивных щелочных и солевых растворов как например, резервуары, трубопроводы и сварные агрегаты химической и медицинской промышленности.

Титановый сплав марки BT1-0 (состав приводится в таблице 2.2).

Таблица 2.2 – Хим. состав сплава BT1-0 в %

Fe	C	Si	N	Ti	O	H
<0,25	<0,07	<0,1	<0,04	99,2-99,7	<0,2	<0,01

Это одна из наиболее востребованных марок на мировом рынке листового и фасонного металлопроката. Это трубы, листы, прутки, квадрат и другие виды продукции. Такая востребованность определяется его

уникальными физическими характеристиками и химическими свойствами. Титан этой марки легкий, прочный, не магнитен, показывает высокую коррозионную стойкость в агрессивных средах. Титановый сплав этой марки обеспечивает решение многих технических практически во всех отраслях современного производства машиностроительных отраслей промышленности.

Титановый сплав марки ВТ6 (состав приводится в таблице 2.3).

Таблица 2.3 – Химический состав сплава в % ВТ6

Ti	Fe	C	Si	V	N	Al	Zr	O
86-90	<0,6	<0,1	<0,1	<3,5-5,3	<0,05	5,3-6,8	<0,3	<0,2

Это титановый деформируемый сплав с высокими показателями прочности и высокими антикоррозионными свойствами. По структуре эта марка титана относится к смешанному классу. Конфигурация сочетающая в себе одновременно обе фазы титана ($\alpha + \beta$), также объединяет в себе и полезные свойства этих фаз. Основными легирующими элементами титана в этом сплаве являются алюминий и ванадий. Кроме них состав в незначительных количествах входят такие химические элементы как, цирконий, железо, кислород, кремний, углерод, азот и водород. В технологическом отношении сплав ВТ6 удовлетворительно сваривается, обрабатывается давлением только в горячем состоянии. При использовании ВТ6 в сварных конструкциях показатели прочности и пластичности сварных швов практически не отличаются от основного металла. Этот титановый сплав широко применяется в различных отраслях современной промышленности для производства крупногабаритных сварных и сборных конструкций космических и летательных аппаратов, баллонов, работающих под давлением и различных заготовок в виде полуфабрикатов.

2.4 Описание процесса печати образца

На развертку луча, круг 4-5 мм, непрерывно подаётся проволока.

Перемещением рабочего стола производится 5 мм/с, согласно схемы печати. Каждый последующий слой смещается по высоте (толщина слоя) на 0,7 мм и наносится согласно схемы заполнения.

Скорость перемещения по прямой 5 мм/с.

Скорость подачи проволоки 2 мм проволоки на 1 мм хода.

К основным технологиям, позволяющим получать продукцию аддитивным методом, относится электронно-лучевая установка. Данные технологии имеют возможность подвода проволочного или порошкового материала непосредственно в зону печати [15].

Электронно-лучевая наплавка с использованием присадочной проволоки или прутка, заключается в послойном нанесении металла в виде, расплава с использованием энергии сканирующего луча электронно-лучевой пушки, для создания высокоточных заготовок, максимально приближенных по форме и размерам к конечным изделиям. Основным конкурентным преимуществом данной технологии является высокая скорость формирования изделий до 12 кг/ч, которую не возможно получить, используя другие аддитивные технологий по производству металлических заготовок [16]. Технология ЭЛН позволяет наплавлять крупногабаритные (до 5000 мм) металлические детали, в том числе и из тугоплавких и жаропрочных сплавов.

Материал наплавки имеет высокую плотность и однородность структуры. На рисунке 2.4 показана схема процесса электронно-лучевой наплавки с использованием наплавочной проволоки.

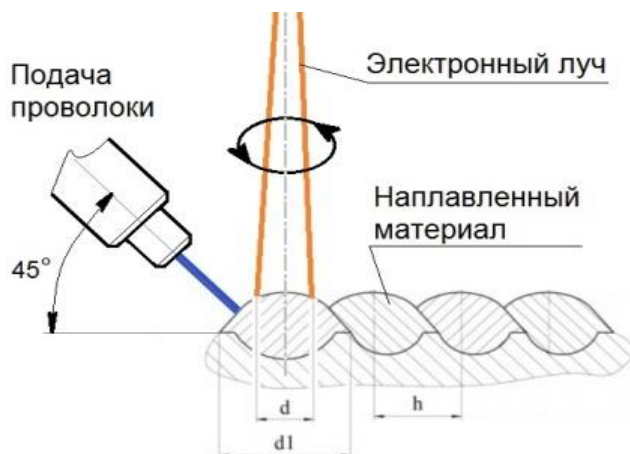


Рисунок 2.4 – Схема процесса электронно-лучевой наплавки проволокой

Электронно-лучевая плавка производится только в вакуумных рабочих камерах при достаточно высоких температурах, набирающих около 500°С, что позволяет изготавливать детали, не содержащие остаточное, механическое напряжение, вызванным градиентом температур между холодными и еще горячими слоями, а также позволяет работать с материалами, чувствительными к окисдации, такими как чистый титан [16].

Вид исследуемого образца приведен на рисунке 2.5.

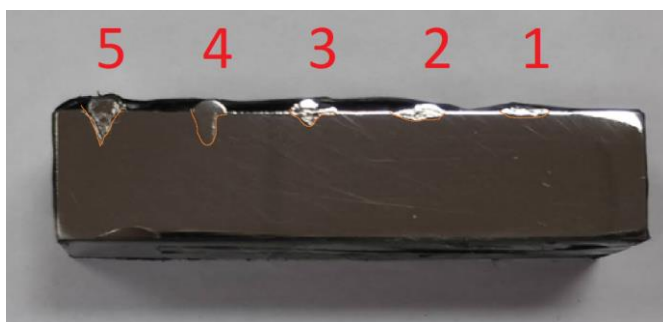


Рисунок 2.5 – Образец с наплавленными дорожками из проволоки ВТ6, цифрами обозначено количество швов с разными режимами наплавки

Параметры печати образцов указаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры печати для разных типов подложек

Подложка: 12X18Н10Т	Подложка: ВТ1-0
Параметры печати: Ускоряющее напряжение 30 кВ; Развертка луча круг 4,5-5мм; (Луч движется по периметру круга диаметром 4-5 мм); Ток луча 10-25 мА (изменения от 1 до 5 дорожки по мере увеличения);	Параметры печати: Ускоряющее напряжение 30 кВ; Развертка луча круг 4,5-5мм; (Луч движется по периметру круга диаметром 4-5 мм); Ток луча 15 мА (первые 9 слоёв); Ток луча 18,5 мА (с 10 го слоя); Толщина слоя 0,7 мм.

Дорожки наплавляли в один проход с использованием присадочной проволоки при разных рабочих режимах установки: изменялась мощность электронного луча. Для исследования режимов сплавления рассматривались треки в поперечном сечении.

2.5 Анализ структуры

В приложении Б показано сравнение поперечных сечений треков, полученных при разных режимах электронно-лучевого сплавления.

Различный химический состав сплавляемых материалов, различающихся физическими свойствами, такими как температуры плавления и кипения, плотность, теплопроводность приводят к разным условиям их сплавления на различную глубину при разных режимах сплавления. Малая мощность электронного луча приводит к образованию не больших сварочных ванн с не достаточным перемешиванием сплавляемых компонентов и образованием множества дефектов: не сплавления, газовая пористость, трещины. И только при одном режиме 4 электронно-лучевого сплавления возникает дендритная ячеистая структура, характерная для литого сплава.

Образование трещины в зоне сплавления можно объяснить сегрегацией легирующих и примесных элементов вдоль границы сплавления при высокой скорости затвердевания сплава.

Наличие пор при многослойной наплавке объясняется не режимами наплавки.

2.6 Анализ измерения микротвердости

2.6.1 Образец с подложкой из 12X18Н10Т

Определение механических свойств сформированного электронно-лучевым сплавлением образца осуществляли определением микротвердости. Измерения проводили поперек наплавленного слоя, сформированного по режиму 4 (рисунок 2.7) и в отдельных участках видимых фаз на всех полученных экспериментальных слоях (рисунок 2.8 и 2.9). Обнаружено повышение микротвердости в зонах сплавления по сравнению с основным

металлом. Можно сделать предположение, что это является следствием образования интерметаллидных фаз различного состава посредством перемешивания в ванне расплава титана и стали в процессе формирования образца.

Отсутствие полного перемешивания сплавляемых элементов при использовании малой мощности электронного луча, приводит к формированию в зоне сплавления участков с чётко выраженной границей раздела, а также различающихся интенсивностью травления и значениями микротвердости.

Значения микротвердости указаны на рисунках 2.8 и 2.9.

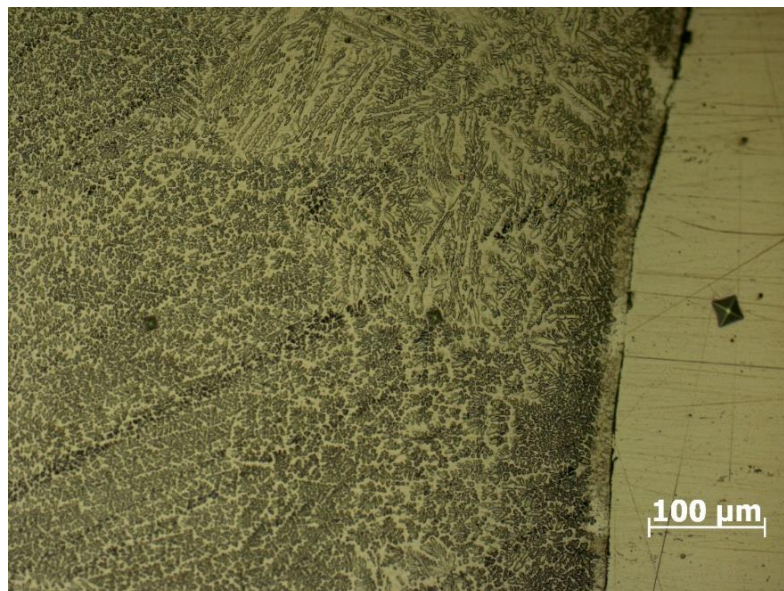


Рисунок 2.7 – Вид отпечатков от индентора на слоях, сформированном по режиму 4

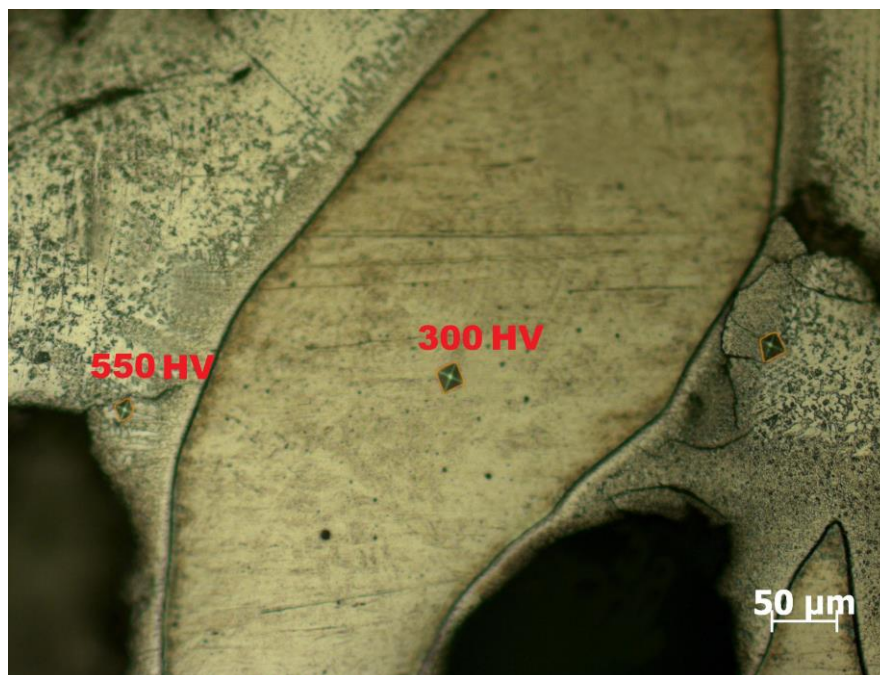


Рисунок 2.8 – Значение микротвердости на слое, сформированном по режиму

3

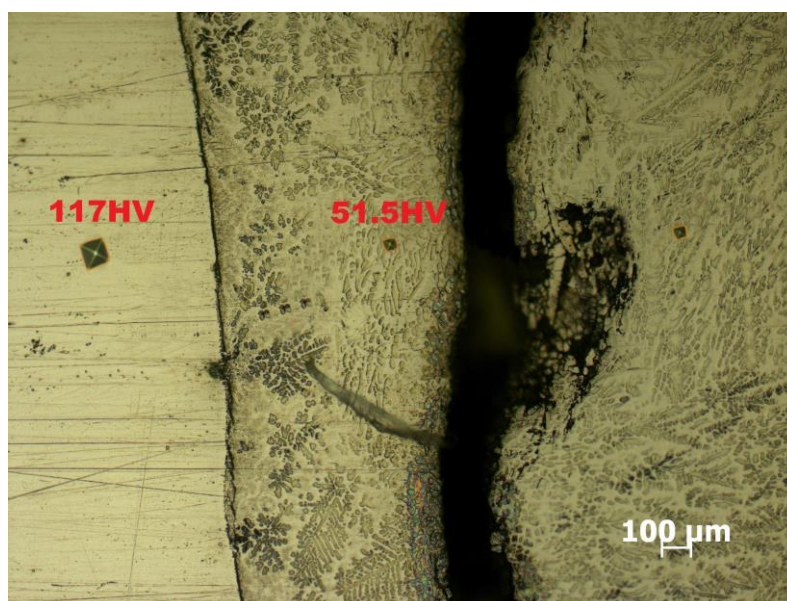


Рисунок 2.9 – Значение микротвердости на слое, сформированном по режиму 4

2.6.2 Образец ВТ1-0

Проведённые исследования изготовленных деталей прямолинейной формы показали, что в случае использования в качестве наплавочной проволоки ВТ6, а основной металл ВТ1-0 толщиной 10 мм, наплавленный

металл состоит из крупных зерен округлой формы, размер зёрен $d = 1-3$ мм. Общий вид образца после полировки и травления представлен на рисунке 2.10, значения микротвёрдости указаны на рисунке 2.11. Непротравленные участки объясняются малым количеством теплоты при наплавке, что исправляется после 10-го слоя с увеличением тока с 15 до 18,5 мА.

Не сплавление подложки с наплавленным титаном объясняется высокой толщиной подложки и отсутствием подогрева перед наплавкой, в первых 9 слоях с меньшим количеством тока наблюдаются меньшие размеры зерна 1-3 мм в верхней части, где ток увеличился на 3,5 мА, зёрна заметно выросли их размер примерно составил 8-10 мм.

На шлифе хорошо просматриваются зоны сплавления между слоями наплавки, зерно образуется на всем протяжении образца несмотря на слои, сначала растут β -зёрна, далее они распадаются на пластинчатые зерна альфа фазы. Повышение теплового влияния способствует росту большого зерна. Измерения микротвердости между слоями большого различия значений не выявило.

Выявлен дефект – несплошности, их размер 0,5-0,2 мм. Большой размер и количество возможно, объясняется малой длительностью существования ванны расплавленного металла по сравнению со сварочными режимами и непрогрев подложки. Высокая скорость кристаллизации обуславливает образование несплошностей за счёт малого времени существования ванны расплава.



Рисунок 2.10 – Общий вид второго образца а) после полировки
б) после травления

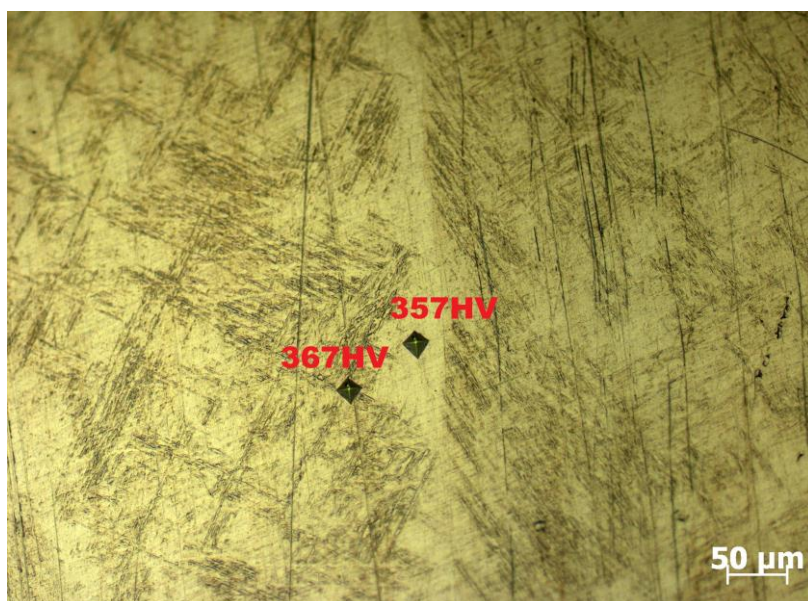


Рисунок 2.11 – Значение микротвёрдости в двух случайных местах

На рисунке 2.12 представлены значения микротвёрдости, измеренные по всей высоте шва. Средние значения в большинстве случаев составляли около 350 HV независимо от координат измерений. Однако разница между максимальным и минимальным значениями на данной высоте показала относительно большой разброс; в некоторых точках измерения твердость по Виккерсу составляла всего 312 Hv, в то время как самые высокие значения были около 399 Hv. Относительно большой разброс твёрдости по Виккерсу может частично отражать неоднородную микроструктуру. В целом, твёрдость, измеренная рядом с верхней точкой, была выше, чем где-либо ещё, что свидетельствует о влиянии теплового потока.

В верхней части изготовленной детали была обнаружена однородная микроструктура, состоящая из крупных α -зёрен с пластинчатыми элементами неправильной формы, который производит очень крупные зерна размером более 1 мм, что приводило к относительно большому разбросу твёрдости по Виккерсу при заданной высоте сборки.

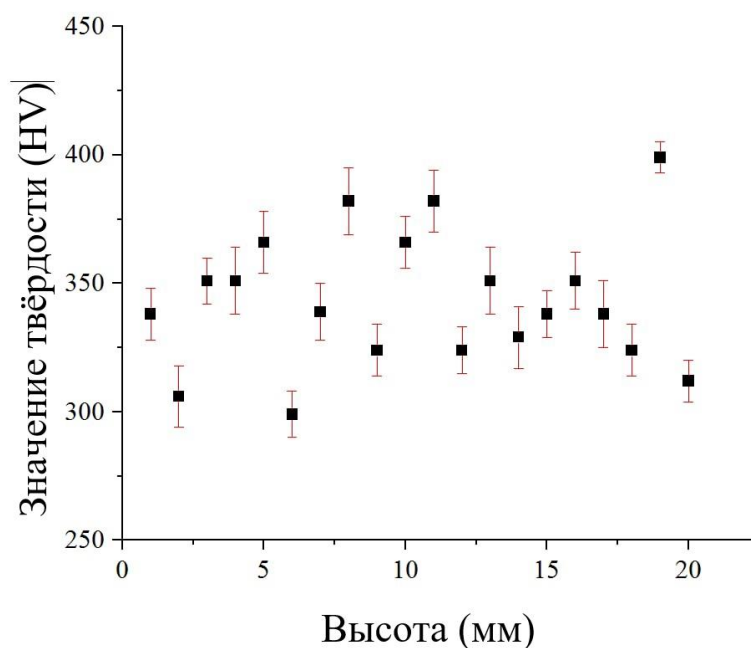


Рисунок 2.12 – Распределение значений микротвёрдости от высоты шва

Созданная микроструктура содержала субструктурированные зерна, которые были созданы вовремя ЕВМ. Развитие такой крупнозернистой структуры способствует время последующего теплового воздействия с точки зрения движущей силы, поскольку крупные зерна росли, поглощая окружающие более мелкие зерна.

Небольшое количество частиц β -фазы также образовывалось во время быстрого охлаждения после затвердевания, и они оставались неповреждёнными во время высокотемпературного воздействия после плавления. Эти частицы будут влиять на возникновение крупных зёрен, фиксируя движение границ α -зерен.

2.7 Результаты статических испытаний на одноосное растяжение

Деформация сплава ВТ6 вырезанного из различных областей образца, происходит по обычному для данного вида сплава, по достижению предела текучести, происходит от стадии упругой деформации к стадии пластического течения далее по достижению предела прочности происходит снижение нагружающего усилия (напряжение) снижение происходит образование шейки на образце, после чего происходит разрушение, для образцов аддитивного материала характерны повышенное относительное удлинение по сравнению с обычным сплавом, это может быть обусловлено крупным размером зерна, чем больше зерно тем пластичнее металл. Положение образца относительно подложки указано на рисунке 2.13.

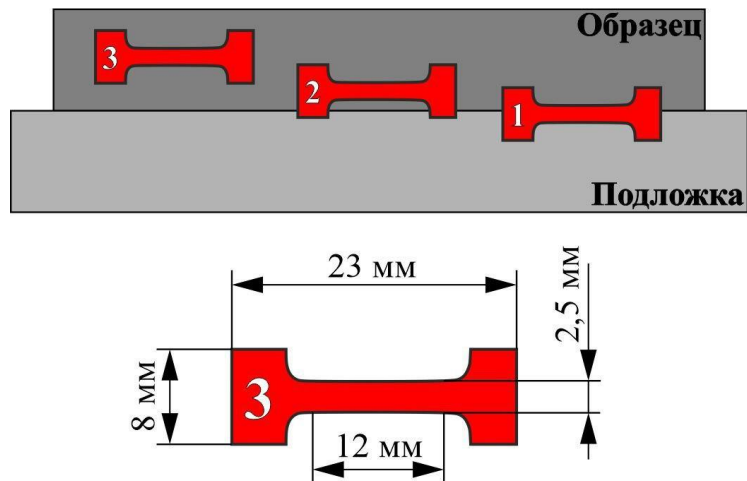
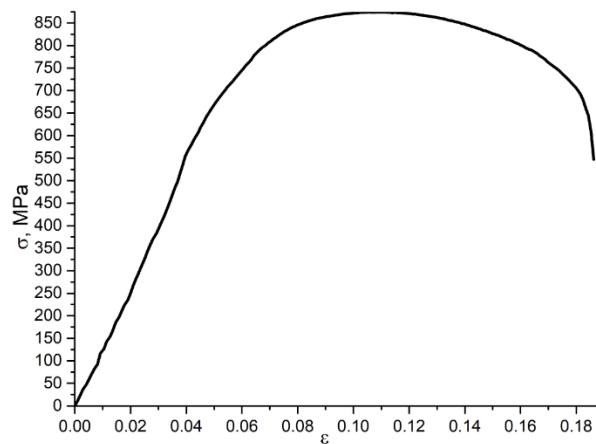


Рисунок 2.13 – Положение образца с его начальными размерами относительно подложки

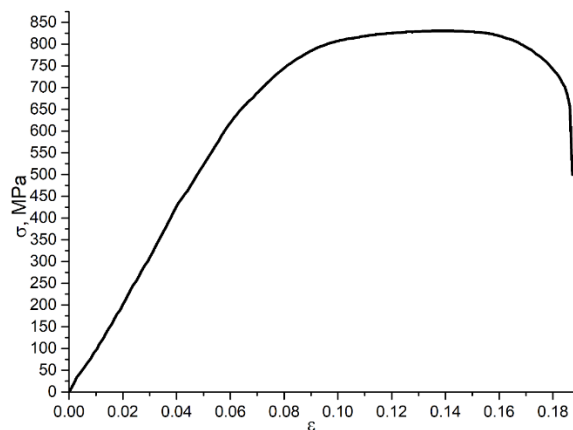
От подложки к верху образца повышается прочность (таблица 2.5 и рисунок 2.14). Такие значения предела прочности характерны сплаву ВТ6 в отожжённом состоянии, пластическая деформация проходит типично для данного сплава.

Таблица 2.5 – Значения механических свойств образца

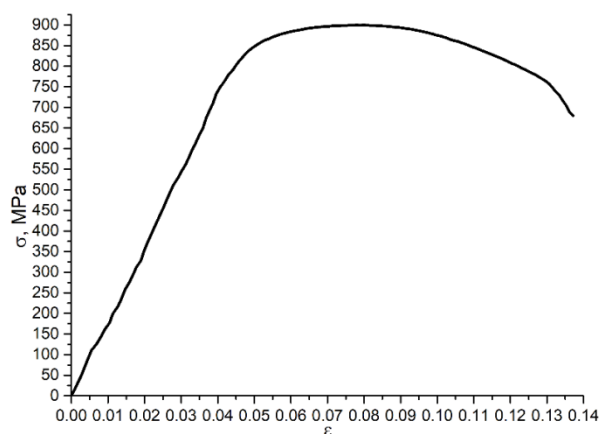
Мех свойства	Отожжённый	Аддитивный
$\sigma_{0,2}$, Мпа	380	678-831
σ_B , Мпа	885	828-900
ϵ , %	8	9-13



а)



б)



в)

Рисунок 2.14 – Графики растяжения для образцов 1 (а), 2 (б), 3 (в)

На рисунке 2.15 приведены фотографии поверхностей разрушения наплавленных образцов после растяжения. Изображения получены с использованием растрового электронного микроскопа. Исследование показали, что вид поверхности изломов образцов существенно не отличается. Для всех изломов характерно вязкое межкристаллитное разрушение чашечного вида.

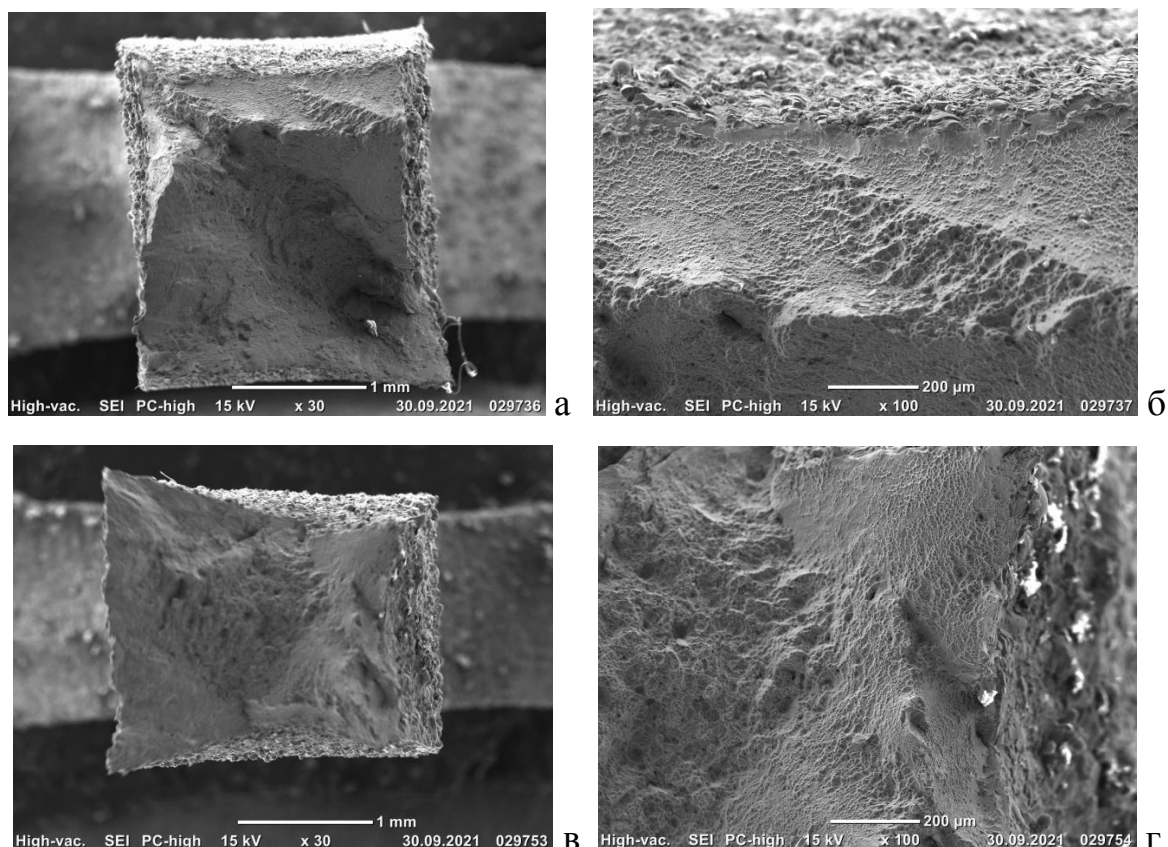


Рисунок 2.15 - Поверхности разрушения образцов 2 (а, б) и 3 (в, г) после растяжения

На поверхности изломов наблюдаются две характерные области: в центре излома – равноосная ямочная структура, в периферийной зоне (участки среза) – ямки сдвига. Также наблюдается области локализованной пластической деформации по периметру излома (утяжки наружных поверхностей изломов), что свидетельствует о значительной пластической деформации при вязком разрушении. На участках среза наблюдается неоднородная складчатая структура, характеризующаяся различным размером ямок, указывающая на различную степень деформации. Волокнистая рельефная поверхность ямок формируется по мере развития деформации, дальнейшая деформация стирает рельеф, глубина ямок уменьшается с уменьшением вязкости металла и формирует стенки среза.

Глава 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3.1 Предпроектный анализ

В данном разделе представлена оценка коммерческого потенциала, планирование проекта, расчёт затрат на проектирование для проведения научно-исследовательской работы (НИР) «Электронно-лучевая наплавка проволокой ВТ6», а также расчёт капитальных вложений и в последующую реализацию проекта и экономическую эффективность проекта.

Цель работы – применение технологии электронно-лучевой наплавки проволокой ВТ6.

В процессе работы рассматривался метод электронно-лучевой наплавки.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокая скорость печати, отсутствие химических реагентов, что делает его экологически чистым и достаточно эффективным.

Наплавка затрагивает многие сегменты, что и показывает нам карта сегментирования (таблица 3.1).

В настоящее время в основном применяются механические методы, которые являются недостаточно эффективными в наплавке, связи с этим к ЭИ способу наплавки проявляют интерес следующие иностранные компании: компания в Швейцарии, Норвегии и Германии – Schlumberger.

Электронно-лучевая наплавка имеет следующие конкуренты преимущества по сравнению с индукционной наплавкой:

- высокая концентрация ввода теплоты в изделие, которая выделяется не только на поверхности изделия, но и на некоторой глубине в объёме основного металла;
- малое количество вводимой теплоты;
- отсутствие насыщения расплавленного и нагретого металла газами;
- при правильной установке соотношения времени паузы и импульса можно сваривать очень тонкие листы металла;

– для перемещения луча по поверхности изделия используют перемещение изделия или самого луча с помощью отклоняющей системы.

– Отклоняющая система позволяет осуществлять колебания луча вдоль и поперёк шва или по более сложной траектории.

Таблица 3.1 – Карта сегментирования рынка аддитивных технологий

		Эксплуатационные отрасли					
		Корпорация РОСКОСМОС	Корпорация РОСАТОМ	Тяжмаш	Среднее машинос троение	Медтехн ика	Мелкое производ ство
Виды наплавки	Лазерная	×	×			×	
	Электронно-лучевая	×	×	×	×	×	
	Ручная дуговая	×	×	×	×	×	
	Газопламенная			×	×	×	×
	Индукционная	×	×	×	×	×	×

Совершенствование методов наплавки позволит улучшить качество швов изделий, снизить затраты на эксплуатацию и ремонт. Это положительно повлияет на все сектора экономической составляющей проекта.

3.2 Анализ конкурентных решений

Исследуемая разработка решение не является уникальной, так как содержит в себе компонентов, которые используются и в других технологиях: это и вакуумная камера и электронный луч и др. Поэтому в качестве альтернативных, конкурирующих были рассмотрены подобные

современные технологии. В качестве конкурирующих технологий были выбраны :

1. Лазерное аддитивное производство «WLAM» [1]
2. Выборочное лазерное спекание «SLS» [4]
3. Исследуемая электронно-лучевая наплавка «EBM» [5]

Экспертная оценка основных технических характеристик данных продуктов представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

№	Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
			Б ф	Бк 1	Бк 2	Бк 3	Кф	К1	К2	К3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Технические критерии оценки ресурсоэффективности										
1	Производительность труда	0,2	5	2	2	3	1	0,4	0,4	0,6
2	Удобство техобслуживания	0,15	5	3	2	4	0,75	0,45	0,3	0,6
3	Размеры рабочей камеры	0,03	5	3	4	5	0,12	0,09	0,11	0,12
4	Затраты на энергию	0,01	4	5	5	4	0,05	0,05	0,05	0,04
5	Надёжность	0,05	4	3	4	5	0,2	0,15	0,15	0,20
6	Потребность в инертных газах	0,05	4	4	4	3	0,15	0,2	0,2	0,15
7	Функциональность	0,1	5	1	1	2	0,5	0,1	0,1	0,2
8	Простота эксплуатации	0,1	5	2	2	4	0,5	0,2	0,2	0,4
9	Качество продукции	0,07	4	1	1	4	0,28	0,07	0,07	0,25

Экономические критерии оценки эффективности										
1	Конкурентоспособность	0,01	5	2	2	4	0,05	0,02	0,02	0,04
2	Объём занимаемого производства	0,01	4	4	3	1	0,05	0,04	0,03	0,01
3	Стоимость технологической установки	0,09	4	2	3	2	0,36	0,18	0,27	0,18
4	Гарантийное обслуживание	0,08	5	2	2	4	0,4	0,16	0,16	0,32
5	Затраты на разработку	0,04	5	5	4	3	0,2	0,2	0,16	0,12
6	Время появления промышленных установок	0,01	5	4	4	5	0,04	0,03	0,03	0,04
	Итого	1	73	43	42	53	4,65	2,34	2,25	3,27

Исходя из проведённого анализа можно сделать вывод, о том что слабыми местами в конкурирующих технологиях, прежде всего с более низким уровнем производительности труда. Аппаратная реализации первых двух технологий, лазерное аддитивное производство «WLAM» и выборочное лазерное спекание «SLS» очень похожи – и там и там, в качестве источника теплоты используется энергия лазерного луча, поэтому и коэффициенты их конкурентоспособности близки между собой. Данные технологии обладают несколькими не значительными достоинствами – уровнем распространённости на промышленных площадках современных высокотехнологичных производств и большими возможностями получению тонкостенных деталей с минимальными радиусами на пересечениях геометрических поверхностей.

Наиболее близким конкурентом можно считать более свежую разработку выборочное лазерное спекание «SLS». К основным достоинствам

данной технологии можно отнести, удобность в использовании, надёжность, размеры рабочей камеры и распространённость на технологических площадках однако, как и второй конкурент эта технология проигрывает по надёжности и материальным затратам на производственную эксплуатацию.

Неоспоримым преимуществом исследуемой электронно-лучевой наплавки «EBM» является то, что она в несколько раз сокращает время выполнения процесса. К другим преимуществам данной технологии можно отнести и то, что данная система проста в использовании, так как разрабатывалась с расчётом на операторов со средней квалификацией и не большим опытом работы, то есть на молодых специалистов.

3.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица составляется на основе анализа рынка и конкурентных технических решений, и показывает сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для разработки.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Матрица SWOT представлена в таблице 3.2.

Сильные стороны исследовательской работы создадут следующие возможности: снижение числа аварий и нештатных ситуаций, увеличение надёжности системы в целом, улучшение качества наплавления. Данные возможности позволят потребителям и энергокомпаниям снизить затраты на ремонт и ущерб от остального производства и на новое силовое электрооборудование и коммутационные системы сетевого питания. Повысится спрос на новую технологию наплавления проволокой ВТ6, следовательно, повысится финансовая привлекательность проекта.

Таблица 3.3 – SWOT-анализ

			Сильные стороны	Слабые стороны
			С1. Экологическая безопасность	СЛ1. Отсутствие бизнес-плана коммерциализации
			С2. Относительная простота метода	СЛ2. Не проработаны вопросы использования инфраструктуры поддержки
			С3. Высокая эффективность	СЛ3. Не проработаны вопросы выхода на международный рынок
			С4. Возможность использования метода без вывода оборудования из работы	СЛ4. Высокая вероятность поражения электрическим током
			С5. Использование электричества	
		Возможности	O1O2O3O4C5 – использование технологии для диагностики нового или производимого оборудования для улучшения качества выпускаемой продукции Высокая эффективность наплавления при меньших подаваемых напряжениях позволит уменьшить количество затрат на оборудования.	O1СЛ4 – проработать методику определения конкретного вида повреждения ЭО.
O	1	Увеличение числа аварий, связанных с техническим состоянием ЭО в электроэнергетической отрасли		
O	2	Старение парка имеющегося силового ЭО и постепенная его замена на новое ЭО в энергосистемах		

Продолжение таблицы 3.3

О	3	Повышение требований к синхронности работы ЭО		
Угрозы			У1У3С5 – наплавка без вывода оборудования из работы потребует высокой квалификации персонала и повысит требования к технике безопасности	У1СЛ1 – заинтересованность компании проработанной методикой диагностики ЭО
У	1	Незаинтересованность малых и средних российских бизнесов в разрабатываемой технологии		
У	2	Отсутствие спроса на данный метод в отрасли		У2СЛ2СЛ3 – разработать бизнес-план коммерциализации и использовать инфраструктуру НИ ТПУ
У	3	Высокие требования к технике безопасности в отрасли		У3СЛ2СЛ4 – использовать рекламу для иностранных компаний

3.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим готовность проекта к коммерциализации, заполнив соответствующую таблицу (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определён имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	5

Продолжение таблицы 3.4

3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	50	40

По суммарным значениям баллов $B_{\text{сум}} = 40-50$ можно сказать что проект обладает перспективностью выше среднего. Значение позволяет говорить о готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации.

Тем не менее, произведения оценка готовности научной разработки требует дальнейшего совершенствования проекта и более глубоких исследований в области маркетинга.

3.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

При коммерциализации научно-технических разработок продавец, преследует вполне определённую цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок, одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или накопление, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

Для данной разработки наиболее подходит инжиниринг, т.е комплекс инженерно-консультационных услуг коммерческого характера по подготовке и обеспечению непосредственно процесса производства, обслуживанию сооружений, эксплуатаций хозяйственных объектов и реализации продукции.

Возможна следующая схема коммерциализации: между НИ ТПУ и предприятием-заказчиком инжиниринговых услуг заключается хозяйственный договор. Исполнитель предоставляет аппарат, собранный на средства предприятия-заказчика с использованием производственной базы НИ ТПУ и услуги диагностики для предприятия заказчика.

3.6 Цели и результаты проекта

В рамках инициализации определяются цели и содержание проекта, определяется объём финансирования.

Определим заинтересованные стороны и их ожидания, результат сведём в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Руководитель проекта	Реализация проекта, получение гранта, компенсация трудозатрат
Исполнитель проекта	Получение степени магистра, компенсация трудозатрат
НИ ТПУ	Привлечение В/Б средств, рост рейтинга ТПУ, регистрация новых статей
РОСКОСМОС, РОСАТОМ и другие П.О. РОССИИ	Снижение аварийности, повышение надёжности установок

Цели и результат проекта представлены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Проанализировать электронно-лучевую наплавку проволокой ВТ6
Ожидаемые результаты проекта:	Действенное использование метода для сварки (наплавки) швов оборудование
Критерии приемки результата проекта:	Получение большего по объёму и качеству наплавления при меньших затратах в сравнении с обычными способами.

3.7 Организационная структура проекта

Исполнителей и их роли в создании проекта сведём в таблицу.

Таблица 3.7 – Список исполнителей проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, Час.
1	Стрелкова Ирина Леонидовна к.т.н. доцент	Технический руководитель проекта	1. Анализ имеющихся технических решений и результатов. 2. Проведение экспериментов.	225
2	Багинский Андрей Геннадьевич НИ ТПУ Магистрант группы 4БМ01	Исполнитель проекта	Подготовка и проведение экспериментов. Анализ результатов экспериментов.	985
				1210

3.8 Ограничения и допущения проекта

Ограничения и допущения сведем в таблицу 6

Таблица 3.8 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
1.2.3.1 Бюджет проекта	60 000 рублей
1.2.3.1.1 Источник финансирования	НИТПУ
1.2.3.2 Сроки проекта	10.10.2021 – 24.05.2022
1.2.3.2.1 Фактическая дата утверждения плана управления проектом	10.10.2021
1.2.3.2.2 Плановая дата завершения проекта	24.05.2022

В результате проведения инициализации проекта сформулированы цели и предлагаемые результаты, определены заинтересованные стороны проекта и финансовые рамки, что очень важно для успешного завершения проекта и его реализации.

3.9 Планирование управления научно-техническим проектом

Особенность НИР в энергетической области это ее неповторимость, сложность и уникальность.

Последовательность выполнения научно-исследовательской работы, а также ее содержание зависят от предмета исследования, сложности научно-исследовательской работы, актуальность и новизны темы.

3.10 План проекта

Линейный график представляется в виде таблицы 3.9. В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта (таблица 3.10).

Таблица 3.9 – Линейный график проекта

№ п/п	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление ТЗ и его утверждение	2	1.10.21	2.10.21	Руководитель проекта, исполнитель
2	Изучение литературы и прочих материалов	34	9.10.21	27.11.21	Исполнитель
3	Составление схемы экспериментальной установки	9	01.12.21	11.12.21	Исполнитель проекта
4	Подбор образцов	11	11.12.21	28.12.21	Исполнитель проекта
5	Подбор и изучение объекта исследований	15	11.01.22	29.01.22	Руководитель проекта, исполнитель
6	Проведение серии первичных экспериментов	20	01.02.22	26.02.22	Исполнитель проекта
8	Обработка полученных данных	9	01.03.22	12.03.22	Исполнитель проекта
9	Анализ полученных результатов, формулировка выводов	10	15.03.22	26.03.22	Исполнитель проекта
10	Оценка эффективности и анализ результатов	10	01.04.22	16.04.22	Руководитель проекта, Исполнитель проекта
11	Оформление результатов в форме ПЗ	29	19.04.22	31.05.22	Исполнитель проекта
Итого		Руководитель проекта		27	
		Исполнитель проекта		149	

Таблица 3.10 – Календарный план-график проекта

Вид работ	Исполнители	Т _к , дни	Продолжительность выполнения работ																										
			Окт			Нояб			декабрь			Янв.			Февр.			Март			Апр.			Май.			Июнь		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Составление ТЗ и его утверждение	Руководитель	2																											
	Исполнитель																												
Изучение литературы и прочих материалов	Исполнитель	34																											
Составление схемы экспериментальной установки	Исполнитель	9																											
Подбор образцов	Исполнитель	11																											
Подбор и изучение объекта исследований	Исполнитель	15																											
	Руководитель																												
Проведение серии первич. экспериментов	Исполнитель	20																											
Обработка полученных данных	Исполнитель	9																											
Анализ полученных результатов	Исполнитель	10																											
Оценка эффективности	Исполнитель	10																											
	Руководитель																												
Оформление результатов	Исполнитель	29																											

 – Руководитель(Р)
  – Студент (С)

3.11 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице.

3.12 Расчёт затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретённое оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизённо они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5-20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. В таблице 3.10 приведён расчёт затрат на материалы.

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учётом ТЗР равны $C_{\text{мат}} = 13400 * 1,05 = 14070$ руб.

Таблица 3.11 – Расчет затрат на материалы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед.,руб.	Сумма,руб.
Провлока Вт6	кг	1	229	200
Лицензия ПО (для личных целей)	Штук	1	6908	6908
Подложка ВТ1-0	кг	1	112	112
Технический аргон	кг	5	1390	6950
Итого				14070

3.12 Основная заработная плата

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

Включаем основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР и определяем по формуле:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (3.1)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная Заработная плата, руб.

Основная заработная плата:

$$C_{осн} = Z_{дн} + Z_{раб}, \quad (3.2)$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (3.3)$$

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

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

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Действительный годовой фонд времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	273	273
Количество нерабочих дней <i>Выходные дни и праздничные</i>	87	87
Потери рабочего времени: <i>Отпуск и невыходы по болезни</i>	15	20
Действительный фонд рабочего времени	171	166

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (3.4)$$

где, $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб./мес.;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3.

Основная заработная плата руководителя ТПУ рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) Оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад $Z_{\text{б}}$ определяется исходя из размеров окладов, определённых штатным расписанием предприятия.

2) Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) Иные выплаты; районный коэффициент.

Расчёт основной заработной платы сводится в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З _д , руб./мес.	k _р	З _м , руб./мес.	З _{дн} , руб./день	Т _р , раб.дни.	З _{осн} , руб.
Исполнитель	14874	1,3	24542	981,6	149	131545
Руководитель	23626	1,3	34190	1367	27	83423
Итого:	43300		56290	2553		214968

Общая заработная исполнителей работы представлена в табл. 3.13.

Таблица 3.13 – Общая заработная плата исполнителей

	З _{осн} , руб.	З _{доп} , руб.	З _{зп} , руб.
Руководитель	83423	20855	104278
Магистрант	131545	13154	144699
Итого:			248977

Как видно из проведённого анализа бюджета научного исследования рассчитаны расходы на материалы и специальное оборудование, энергозатраты и фонд заработной платы участников проекта.

3.13 Расчёт затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е.:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3 . \quad (3.5)$$

Итак, в нашем случае:

$$C_{\text{соц}} = 214968 \cdot 0,3 = 64490 .$$

3.14 Расчёт затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot \Pi_{\text{э}}, \quad (3.6)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$\Pi_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – работы оборудования, час.

Для ТПУ $\Pi_{\text{э}} = 6,59$ руб/кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 2 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчёта, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_{\text{т}} \quad (3.7)$$

Здесь $T_{\text{рд}} = 450,4$. $K_{\text{т}} \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путём прямого учёта, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{с}} \quad (3.8)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт.

$K_{\text{с}} \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_{\text{с}} = 1$.

В таблице 3.14 приведён расчёт электроэнергии для технологических целей.

Таблица 3.14 – Расчет электроэнергии для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты $\Delta_{\text{ОБ}}$, руб.
3Д принтер	450,4·0,9	0,3	801,4
Персональный компьютер	450,4·0,005	0,1	1,48
Итого:			802,88

3.15 Расчёт амортизационных расходов

В разделе «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта. Используется формула:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot \Pi_{\text{ОБ}} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n}{F_{\text{д}}} \quad (3.9)$$

где $H_{\text{А}}$ – годовая сумма амортизации единицы оборудования, $H_{\text{А}} = 25\%$;

$\Pi_{\text{ОБ}}$ – стоимость единицы оборудования с учётом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берётся из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку $C_{\text{АМ}}$. Для ПК в 2020 г. (247 рабочих дней при пятидневной рабочей неделе) можно принять $F_{\text{д}} = 247 \cdot 8 = 1976$ часа; $t_{\text{рф}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта; n – число задействованных однотипных единиц оборудования, $n = 1$.

При использовании нескольких типов оборудования расчёт по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Стоимость оборудования 200 000 руб. Таким образом:

$$C_{AM} = \frac{0,25 \cdot 200000 \cdot 450,4 \cdot 1}{1976} = 11396,7 \text{ руб.}$$

3.16 Расчёт прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.:

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ЭЛ.ОБ.}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1 \quad (3.10)$$

$$= (9144,45 + 214968 + 64490 + 802,88 + 11396,7 \cdot 0,1) = 30\,080 \text{ руб.}$$

3.17 Расчёт общей себестоимости разработки

Проведя расчёт по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Экспериментального исследования процесса сплавления и наплавки при аддитивных технологиях».

В таблице 3.15 приведён расчёт общей себестоимости проекта.

Таблица 3.15 – Расчёт общей стоимости проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	С _{мат}	14070
Основная заработная плата	С _{зп}	214968
Отчисления в социальные фонды	С _{соц}	64490
Расходы на электроэнергию	С _{эл.}	802,88
Амортизационные отчисления	С _{ам}	11396,7
Прочие расходы	С _{проч}	30080
Итого:		335808

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 335808$ руб.

3.18 Расчёт прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определённости и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. Так как мы не располагаем данными для применения «сложных» методов, то прибыль примем в размере 20 % от полной себестоимости проекта. В нашем проекте она составляет 67161 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

3.19 Расчёт НДС

Так как НДС составляет 20 % от суммы затрат на разработку и прибыль.

То в нашем случае $\text{НДС} = (67161 + 13235) \cdot 0,2 = 16079$ рублей.

3.20 Цена разработки НИР

Цена разработки НИР равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, тогда:

$$C_{\text{НИР}} = 335808 + 67161 + 16079 = 419048 \text{ рублей.}$$

3.21 Оценка экономической эффективности проекта

В настоящее время все чаще возникает вопрос об эффективности работы новых установок и автоматизированных систем. На большинстве производств постоянно происходит модернизация оборудования для сокращения времени производства и, соответственно, уменьшения

финансовых затрат.

Использование порошка в качестве сырья приводит к образованию таких дефектов, как поры, которые могут снизить структурную целостность детали. По сравнению с порошковой основой преимущества проволоки заключаются в том, что скорость осаждения значительно выше, а также неограниченные возможности сборки, настройки и запуска производства установок по электронно-лучевой наплавке в кратчайшие сроки.

Результатом будущего внедрения электронно-лучевой наплавки позволит изготавливать металлические детали напрямую, без механической обработки, без термической обработки для снятия напряжений. Вследствие того, что данная разработка несёт исследовательский характер и точно дать количественную оценку предполагаемого экономического эффекта невозможно.

Глава 4. Социальная ответственность

4.1 Введение

В разделе «Социальная ответственность» в соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 26000 «Руководство по социальной ответственности». Рассматриваются вопросы выполнения требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению.

Социальная ответственность предполагает следование человека предписаниям и соблюдения некоего регламента. Данный раздел выпускной квалификационной работы посвящён выполнению анализа и разработке мер по обеспечению благоприятных условий труда при работе на 3D принтере.

С быстрым развитием научно-технического прогресса остро встаёт вопрос о возможности безопасного исполнения людьми своих трудовых обязанностей. В связи с этим была создана и развивается наука о безопасности труда и жизнедеятельности человека.

Безопасность жизнедеятельности (БЖД) — наука о комфортном и безопасном взаимодействии человека с техносферой, представляет собой область научных знаний, изучающая опасности, угрожающие человеку и разрабатывающие способы защиты от них в любых условиях обитания человека.

В данном разделе рассматриваются возможные риски безопасности труда, при научно-исследовательской работе, которая была проведена в лаборатории №208 Научного парка Томского политехнического университета (ТПУ). Работа проводилась на предмет исследования экспериментального процесса сплавления и наплавки при аддитивных технологиях.

На рабочем месте должны быть предусмотрены меры защиты от возможного воздействия опасных и вредных факторов производства. Уровни этих факторов не должны превышать предельных значений, оговорённых правовыми, техническими и санитарно-техническими нормами. Эти

нормативные документы обязывают к созданию на рабочем месте условий труда, при которых влияние опасных и вредных факторов, работающих лиц, либо устранено совсем, либо не превышают допустимых пределов. Объект исследования: электронно-лучевая установка [43].

4.1.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно трудовому законодательству, в РФ регламентируется 8-ми часовой рабочий день. Во время рабочего дня отводятся специальные промежутки времени для перерывов на отдых и питание. Продолжительность перерывов на отдых и питание составляет от 30 до 60 мин.

К работе с оборудованием допускаются сотрудники Томского политехнического университета, получившие допуск. Для получения допуска к самостоятельной работе работник должен ознакомиться с правилами работы на оборудовании сдать экзамен.

В соответствие с инструкцией по охране труда, при работе с лабораторным комплексом, в ТПУ к работе с электронным оборудованием допускаются лица (сотрудники Института, аспиранты, студенты и прикомандированные лица) не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний и прошедшие инструктаж (не реже 1 раза в год).

Эксплуатация каждого прибора должна выполняться согласно инструкции по его эксплуатации [44]. К работе на персональном компьютере (ПК) допускаются лица, прошедшие медицинское освидетельствование, вводный инструктаж, первичный инструктаж, обучение и стажировку на рабочем месте, проверку знаний требований охраны труда, имеющие группу I по электробезопасности.

По данной теме рассматриваются законодательные и нормативные документы:

- 1) Инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.

2) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы.

3) ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности [45].

4) ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности.

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

4.1.2 Мероприятия при организации рабочей зоны

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса. Рабочее место является основной подсистемой производственного процесса.

Основные требования к размерам и конструкции рабочего стула в зависимости от вида выполняемых работ установлены в ГОСТ 12.2.032—78 и ГОСТ 21889-76. Рабочее место для выполнения работ сидя организуют при лёгкой работе, не требующей свободного передвижения, работающего. Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т. д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

Компоновка рабочих столов, стеллажей и другой мебели подобрана таким образом, чтобы не создавать заторов и препятствий при эвакуации людей из помещения во время возникновения чрезвычайных ситуаций.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации

работы» экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учётом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов [46].

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 рабочее место должно быть по высоте таким, чтобы при выполнении исследований, и проведении расчётов, и обработке данных не было необходимости сгибать корпус или приседать.

Рациональный режим чередования труда и отдыха снижает утомляемость и травматизм, повышает производительность труда. В работе, требующей тонкой координации движений и не столько физического, сколько нервного напряжения, желательны короткие (3...5 мин) частые перерывы. Для борьбы с монотонностью работы, которая ускоряет наступление усталости и приводит к быстрому нервному истощению, надо менять ритм работы, позу, вводить кратковременные перерывы и использовать их для упражнений производственной физкультуры.

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

Самостоятельно объект исследования, а именно, электронно-лучевая установка не сопровождается вредными и опасными факторами. Соответствует всем нормам СанПиНа [47]. Не выделяет токсических веществ, излучения, постороннего запаха, в общем, не подвергает опасности жизнь человека (таблица 4.1).

4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению вредного воздействия

При выполнении данной работы возникает вероятность воздействия таких производственных факторов как: шума, тепловыделений, недостаточной освещённости, электрический ток, физические и эмоциональные перегрузки, умственное перенапряжение.

Все опасные и вредные производственные факторы в соответствии с

ГОСТ 12.0.003-2015 подразделяются на физические, химические, биологические и психофизиологические.

Таблица 4.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Испытания	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	В санитарных нормах СанПиН 2.2.4-548-96 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия для работы. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
2. Превышение уровня шума		+		
3. Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
6. Пожар взрывоопасность	+	+	+	Эксплуатационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования и правильное содержание помещения, удовлетворяющее требованиям СНиП 245-71.

К физическим факторам можно отнести:

- Повышенная запылённость;
- Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;

- Повышенный уровень шума [48] на рабочем месте;
- Опасность поражения электрическим током.

К химическим факторам относится реактив для травления образцов. При травлении образцов реактив может попасть на кожу, что может привести к ожогу, а также пары реактива могут попасть на слизистые глаз и носоглотки (при дыхании незащищённом маской), что может вызвать местные покраснения и раздражение. Травление проводилось раствором на специально оборудованном рабочем месте, после чего образцы промывались дистиллированной водой и протирались этиловым спиртом.

К психофизическим факторам можно отнести шумовое воздействие, монотонность работы, умственное перенапряжение и т.п. При подготовке шлифов рабочий выполняет монотонную работу, связанную с однообразным набором последовательных действий, которые могут привести к возникновению переутомляемости.

4.2.3 Шумовой фактор

Шум — это совокупность звуков, неблагоприятно воздействующих на организм человека и мешающих его работе и отдыху. Шум, возникающий при работе производственного оборудования и превышающий нормативные значения, воздействует на центральную и вегетативную нервную систему человека, органы слуха. Основное физиологическое воздействие шума заключается в том, что повреждается внутреннее ухо, возможны изменения, биоэлектрической активности головного мозга, сердца и скорости дыхания, общей двигательной активности, кровяного давления, сужение кровеносных сосудов, расширение зрачков глаз. Рабочий человек в условиях продолжительного шумового воздействия испытывает раздражительность, головную боль, головокружение, снижение концентрации внимания, повышенную утомляемость. Уровень шума [48] в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, не должен превышать 50-60 дБ.

Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочем месте для высококвалифицированных работ, измерительных и аналитических работ в лабораториях следует принимать, исходя из таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочем месте

Среднегеометрические частоты, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Нормативные значения, Дб	93	79	70	68	8	55	52	52	49
Уровень звука и эквивалентный уровень звука (дБА)	60								

Уменьшение шума от электрических машин достигается их своевременной смазкой, регулировкой и ремонтом. Коллективным способом защиты от шума может являться установка звукоизолирующих устройств. Персонал следует снабжать специальными наушниками, шлемами, заглушками, менять режим труда и отдыха.

Для работы с оборудованием в рассматриваемой аудитории предусмотрены специальные наушники.

4.2.4 Микроклимат

Микроклимат – это комплекс метеорологических условий в помещении: температура, относительная влажность, воздухообмен, скорость движения воздуха, содержание в воздухе твёрдых частиц (пыли), наличие запахов и др.

Параметры микроклимата могут меняться в широких пределах, в то время как необходимым условием жизнедеятельности человека является поддержание постоянства температуры тела благодаря терморегуляции, т.е. способности организма регулировать отдачу тепла в окружающую среду.

Принцип нормирования микроклимата – создания оптимальных условий для теплообмена тела человека с окружающей средой. 3D-принтер является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлен 3D-принтер, должны соблюдаться определённые параметры микроклимата. В санитарных нормах СанПиН 2.2.4-548-96 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения.

Оптимальными для микроклимата жилых и общественных помещений в тёплое время года считаются: температура воздуха 22-25° С, относительная влажность 40-60 %, скорость движения воздуха не более 0,25 м/с; в холодное время года эти показатели составляют соответственно 20-22° С, 30-45 % и 0,1-0,15 м/с.

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются принтер, персональные компьютеры, периодическая работа вытяжной системы.

В таблице 4.3 – допустимые параметры микроклимата на рабочем месте (СанПиН 2.2.4.548-96).

Объем помещений, в которых размещены работники вычислительных центров, не должен быть меньше 19,5м³ три человека с учётом максимального числа одновременно работающих в смену. Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположен 3D-принтер, приведены в таблице 4.4.

Для обеспечения комфортных условий используются как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система).

Температура в рабочей зоне поддерживается отоплением в холодный период и вентиляцией в тёплый период.

Таблица 4.3 – Параметры микроклимата для помещений, где установлен 3D-принтер

Период	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Температура воздуха в помещении. Относительная влажность. Скорость движения воздуха.	22...24 ⁰ С°С 40...60% До 0,1м/с
Тёплый	Температура воздуха в помещении. Относительная влажность. Скорость движения воздуха.	23...25 ⁰ С°С 40...60% 0,1...0,2м/с

Таблица 4.4 – Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где 3D-принтер

Характеристика помещения	Объёмный расход подаваемого в помещение свежего воздуха.
Объем до 20 м ³ на человека От 20...40 м ³ на человека Более 40 м ³ на человека	Не менее 30 Не менее 20 Естественная вентиляция

4.2.5 Освещённость рабочей зоны

Создание комфортных световых условий труда улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего сотрудника, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомлённости. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего.

В данном рабочем помещении используется смешанное освещение. Естественное освещение осуществляется через окно в наружной стене здания. В качестве искусственного освещения используется система общего освещения (освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения). Освещённость на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 лк. В данной работе использовались «Общие санитарно-гигиенические требования к показателям микроклимата рабочей зоны, который устанавливает стандарт СанПиН 2.2.4.3359–16».

Для организации такого освещения лучше выбрать люминесцентные 66 лампы, так как они имеют ряд преимуществ перед лампами накаливания: их спектр ближе к естественному освещению; они имеют большую экономичность (больше светоотдача) и срок службы (в 10–12 раз больше чем лампы накаливания). Но следует помнить, что имеются и недостатки: работа ламп такого типа иногда сопровождается шумом; они хуже работают при низких температурах; такие лампы имеют малую инерционность. Для данного помещения, в котором будет эксплуатироваться информационная система, люминесцентные лампы подходят.

В настоящее время в лаборатории используются светильники ШОД (люминесцентный светильник, соответствующий широкому типу кривой силы света, относящийся классу отражённого света светильника по светораспределению).

Нормами для данных работ установлена необходимая освещённость рабочего места $E=300$ лк (так как работа очень высоко точности – наименьший размер объекта различия равен 0,15–0,3 мм разряд зрительной работы – Г, фон – светлый, контраст объекта с фоном – большой).

Произведём расчёт освещения.

Помещение имеет площадь 48 м^2 , ширина составляет 6 м, длина – 8 м, высота – 2,5 м. Воспользуемся методом светового потока. В помещении лаборатории используются люминесцентные лампы ШОД, использование которых допускается при умеренной влажности и запылённости.

Величина освещённости корректируется с учётом коэффициента запаса, т.к. со временем за счёт загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп снижается освещённость. Значение коэффициента запаса, выбираемого для помещения с малым выделением пыли, при люминесцентных лампах $KЗ = 1,5$.

Расположение светильников должно соответствовать двум критериям: обеспечение высокого качества освещения, направленность света на рабочие места.

Наиболее экономичное создание нормированной освещённости. Расположим светильники параллельно стенам. Расстояние между светильниками рассчитаем по формуле:

$$\lambda = L / h \quad (4.1)$$

где L – расстояние между светильниками, м;

h – высота подвеса светильника над рабочей поверхностью, м.

Находим $\lambda = 1,2$ (при $h = 2,5$ м)

Отсюда следует, что:

$$L = \lambda \cdot h = 1,2 \cdot 2,5 = 3 \text{ м.}$$

Расстояние от стен помещения до крайних светильников $1/3 \cdot L$.

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{\eta \cdot n} \quad (4.2)$$

где F – рассчитываемый световой поток, лм;

E – нормированная минимальная освещённость, лк (определяется по таблице). Работу специалиста, в соответствии с этой таблицей, можно отнести к разряду точных работ, следовательно, минимальная освещённость будет $E = 400$ лк;

S – площадь освещаемого помещения (в нашем случае $S = 48 \text{ м}^2$);

Z – отношение средней освещённости к минимальной (обычно принимается равным 1,1-1,2, пусть $Z = 1,1$);

K – коэффициент запаса, учитывающий уменьшение светового потока лампы в результате загрязнения светильников в процессе эксплуатации (его

значение зависит от типа помещения и характера проводимых в нем работ и в нашем случае $K = 1,5$);

η – коэффициент использования, (выражается отношением светового потока, падающего на расчётную поверхность, к суммарному потоку всех ламп и исчисляется в долях единицы; зависит от характеристик светильника, размеров помещения, окраски стен и потолка, характеризуемых коэффициентами отражения от стен (РС) и потолка (РП)). Их оценивают субъективно и определяют по таблице. Так, для свеж побеленного потолка и со свеж побеленными окнами без штор РС = 50% и РП = 70% соответственно.

Значение η определим по таблице коэффициентов использования различных светильников. Для этого вычислим индекс помещения по формуле:

$$I = \frac{S}{h \cdot (A + B)} \quad (4.3)$$

где S – площадь помещения, $S = 48 \text{ м}^2$;

h – расчётная высота подвеса, $h = 2,5 \text{ м}$;

A – ширина помещения, $A = 6 \text{ м}$;

B – длина помещения, $B = 8 \text{ м}$. Подставив значения получим:

$$I = \frac{48}{2,5 \cdot (6 + 8)} = 1,37.$$

Зная индекс помещения I , по таблице находим $\eta = 0,6$.

При выборе осветительных приборов используем светильники типа ОД. Каждый светильник комплектуется двумя лампами.

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 3 светильника типа ОДР. Длина одного светильника 1 м., ширина 0,5 м. При этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Изображаем в масштабе схему размещения на нем светильников (рисунок 4.1).

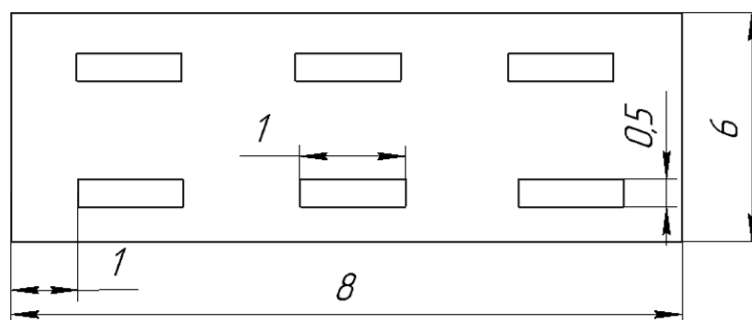


Рисунок 4.1 – Схема расположения светильников

Подставим все значения в формулу для определения светового потока F:

$$F = \frac{400 \cdot 1,5 \cdot 48 \cdot 1,1}{0,6 \cdot 12} = 4400 .$$

В соответствии со световым потоком выбираем стандартную лампу ЛБ -80-4 с потоком 4960 ЛМ.

Таким образом, система освещения лаборатории соответствует нормам.

4.3 Электробезопасность

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний. Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- Рода и величины напряжения и тока;
- Частоты электрического тока;
- Пути тока через тело человека;
- Продолжительности воздействия электрического тока или электромагнитного поля на организм человека;
- Условий внешней среды [49].

Электротравма опасна прежде всего воздействием тока на сердечнососудистую систему. Напряжение от 36 вольт и выше вполне способно вызвать остановку сердца или дыхания, однако убивает не напряжение, а сила тока. Рабочее помещение по опасности относится к 1 группе, т.е. электрическая нагрузка относительно мала.

Категория персонала – I (не электротехнический персонал), т.е. это люди, прошедшие только первичный инструктаж. Рабочее место удовлетворяет всем требованиям безопасности жизнедеятельности: нет доступа к токоведущим частям, все источники питания пронумерованы, корпуса компьютеров заземлены.

При нормальном режиме работы оборудования опасность электропоражения невелика, однако, возможны режимы, называемые аварийными, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

Поражения человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- При прикосновении к токоведущим частям во время ремонта FDM или 3D принтера;
- При возможном коротком замыкании в высоковольтных блоках (блоке питания).
- Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются:
 - Изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
 - Установка защитного заземления;
 - Своевременный осмотр технического оборудования, изоляции.

Таблица 4.5 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока t , с									
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Переменный 50 Гц	U, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70
	I, мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65

4.4 Пожар, взрывоопасность

Пожар в кабинете может привести к необратимым последствиям, (потеря ценной информации, порча имущества, травмы и гибель людей), поэтому необходимо: выявить и устранить все причины возникновения пожара; разобрать план мер по ликвидации пожара в здании; план эвакуации людей из здания [50]. Причинами возникновения пожара могут быть:

- Неисправность электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробое изоляции;
- Использование повреждённых (неисправных) электроприборов;
- Использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- Возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- Возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- Неаккуратное обращение с огнём и несоблюдение мер пожарной безопасности.

Эксплуатационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования и правильное содержание помещения, удовлетворяющее требованиям СНиП 245-71.

В качестве средств пожаротушения используются пожарные краны, находящиеся в коридоре, а также передвижной углекислотный огнетушитель типа ОП-1. Огнетушитель порошковый ОП-1 предназначен для тушения

возгорания твёрдых, жидких и газообразных веществ (класса А, В, С или В, С в зависимости от типа применяемого порошка).

Изобразим в соответствие с исходными данными план помещения, укажем на нем расположение светильников и определим их число.

Воспользуемся методом коэффициента использования светового потока. С его помощью можно рассчитать, как световой поток ламп, необходимый для создания заданной освещённости горизонтальной поверхности с учётом света, отражённого стенами и потолком, так и освещённость при известном потоке.

4.5 Экологическая безопасность

Любое предприятие, осуществляющее свою деятельность в сфере создания материальных благ, в процессе работы наносит тот или иной вред окружающей среде [49]. Это производственные отходы, которые необходимо утилизировать, вредные газы, выделяемые при осуществлении технологического процесса, сточные воды.

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

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

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

- Уменьшение и полное прекращение выбросов вредных веществ в

атмосферу;

- Сохранение и увеличение биомассы производителей кислорода и поглотителей углекислоты;
- Сохранение и восстановление оптимальной циркуляции атмосферы в региональном масштабе;
- Утилизация отходов вредных производств.

В настоящее время нет какого-либо кардинального способа, позволяющего решить проблему загрязнения атмосферы. Однако существует, ряд мер, которые в комплексе позволяют существенно снизить степень загрязнения воздуха. Основными мерами, которые необходимо предусмотреть при проектировании и строительстве новых реконструкций и расширение действующих производств являются совершенствование их технологии, обеспечивающей сокращение выбросов и оснащение их современным оборудованием и пылеуловительной аппаратурой по очистке газов, дымовых и вентиляционных выбросов.

Важнейшим направлением уменьшением выбросов и экономии капитальных затрат является максимально возможная утилизация тепла в промышленности.

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

В лаборатории в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяются фильтры.

Вследствие использования работниками душевых, туалетов, специальных веществ для обработки материалов, а так же средств хозяйственного назначения, образуются жидкие отходы для удаления которых применяют канализационную систему. Система канализации

подсоединена к городской канализационной сети, поэтому полная очистка сточных вод на нем не проводится.

Также из-за использования обтирочных материалов образуются твердые отходы, для которых предусмотрены места хранения, и в конце рабочего дня они очищаются. При удалении отходов с территории предприятия им присваиваются категории опасности и вывозятся на соответствующие полигоны (промышленных отходов, токсичных отходов и т.д.).

4.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

4.6.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В ходе проведения научной-исследовательской работы необходимо соблюдать предельную осторожность. В целом объектом исследований является экспериментальное исследование процесса сплавления и наплавки с использованием электронного луча в вакууме с использованием 3D-принтера, который не может являться причиной возникновения ЧС [51].

4.6.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

При проведении исследований существует вероятность появления пожара. Причинами возникновения пожара неэлектрического характера могут быть неосторожное обращение с огнём, нагревающимися предметами, электронагревательными приборами, легковоспламеняющимися веществами. Самовозгорание веществ электрического характера возможно вследствие короткого замыкания, перегрузки электросети, больших переходных сопротивлений.

Во избежание травм и повреждения системы PrintBox существует несколько различных систем безопасности, в том числе: экстренная остановка; главный выключатель безопасности; функция остановки высокого напряжения; несколько механических предохранителей; двери с ключом с предохранительными выключателями.

4.6.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются 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 и т. д. необходимо соблюдение пожарной безопасности.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. При возникновении аварийной ситуации необходимо: сообщить руководителю (дежурному), позвонить в аварийную службу или МЧС - тел. 112, принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

План эвакуации представлен на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений административного здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были наплавлены 2 образца из разных подложках, одной проволокой, с использованием разных стратегий печати (дорожки и послойное наплавление), для исследования формирования структуры и дальнейшего изучения на микротвердость и механические испытания.

В ходе исследования структуры был сделан вывод, что малая мощность электронного луча приводит к образованию не больших сварочных ванн с не достаточным перемешиванием сплавляемых компонентов и образованием множества дефектов: не сплавления, газовая пористость, трещины.

С прибавкой тока луча однородность структуры заметно выравнивается микротвердость возрастает, механические свойства в пределах ГОСТа соответствует отожжённому металлу.

Предложены следующие рекомендации по совершенствованию процесса наплавки:

- механические свойства могут быть улучшены с помощью присадочных металлов Cu-Si, медь не образует хрупких интерметаллидов с железом, хромом, никелем или углеродом. Кроме того, это мягкий металл, который может деформироваться и ослаблять напряжение, вызванное несоответствием линейного расширения.

- По результатам измерения микротвердости можно предполагать, что различные включения в структуре представляют сложные интерметаллические соединения титана с железом, хромом и никелем. Чтобы избежать условий способствующих образованию интерметаллидов и получить сварные швы с высокой пластичностью в соединениях титана и стали, есть возможность решить эту проблему подбором режимов наплавки.

- Максимальную пластичность можно получить на сварных соединениях формирующихся при сварке титана с цирконием, ниобием танталом и бронзой.

В результате выполнения раздела финансового менеджмента можно сформулировать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений при сравнении различных вариантов аддитивных технологий является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя работ и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. В результаты было определено общее количество календарных дней для выполнения работ составляет 273 день; общее количество рабочих дней, в течение которых работал инженер, составляет 166 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 171 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 335 808 рублей;

В разделе 4 были рассмотрены требования по производственной безопасности. Рассмотрели вопрос о влиянии образцов напечатанных с помощью 3D – технологии на экологическую среду. Также затронуты мероприятия при возникновении чрезвычайных ситуаций. Приведены правовые и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. Также проведён анализ вредных и опасных факторов при проведении исследований. Далее выявили влияние на организм человека материала, из которого были напечатаны образцы. Выяснили, что проволока сплава ВТ6 безвредна для человека. Данный материал хорошо подвергается химической переработке, также существует множество компаний, которые занимаются переработкой изделий из титана и его сплавов. Разработаны мероприятия при возникновении ЧС и мер по ликвидации их последствий.

Список публикаций студента

1. Багинский А.Г., Стрелкова И. Л. Исследования процесса наплавки титанового сплава ВТ-6 методом электронно-лучевого сплавления. // XX I Международная научная-техническая молодёжная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (СТТ-2022) (в печати).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пададюк Семен; Аддитивное производство и 3D-печать [Электронный ресурс]: //blog.iqb.ru/additive-manufacturing-basics/
2. Whittaker D. Developments in the additive manufacturing of titanium at PM Titanium 2015 / D. Whittaker // Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall. – 2015. – Vol. 1, №3. – P. 53–60.
3. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Изд-во СПбГУ, 2013, 221 с.
4. Зайнтьдинов А.М., Александров Ю.Б. Перспективы использования 3D-печати в авиастроении. Международный научно-исследовательский журнал. №5 2015. 64-65 с.
5. T.A. Rodrigues, V. Duarte, R.M. Miranda, T.G. Santos, J.P. Oliveira Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM) Materials, 12 (2019)
6. S.M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, A. Yadollahi An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: transport phenomena, modeling and diagnostics Addit Manuf, 8 (2015), pp. 36- 62
7. D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests Int J Adv Manuf Technol, 81 (2015), pp. 465-481
8. Q. Han, Y. Li, G. Zhang Transactions on Intelligent/ Welding Manufacturing, I (2018), pp. 85-93
9. M. Kumar, A. Sharma, U.K. Mohanty, S.S. Kumar/Additive anufacturing with welding
10. R.R. Unocic, J.N. DuPont/ Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process Metall Mater Trans B Process Metall Mater Process Sci, 35 (2004), pp. 143-152,

11. L.E. Rannar, A. Glad, C.G. Gustafson/ Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting *Rapid Prototyp J*, 13 (2007), pp. 128-135
- O.O. Marenych, D. Ding, Z. Pan, A.G. Kostyryhev, H. Li, S. Van Duin
12. Effect of chemical composition on microstructure, strength and wear resistance of wire deposited Ni-Cu alloys *Addit Manuf*, 24 (2018), pp. 30-36
13. J.L. Prado-Cerqueira, J.L. Diéguez, A.M. Camacho/ Preliminary development of a wire and arc additive manufacturing system (WAAM) *Procedia Manuf*, 13 (2017), pp. 895-902
14. H. Wang, R. Kovacevic/ Rapid prototyping based on variable polarity gas tungsten arc welding for a aluminium alloy
15. Wanying L, Yuanhua L, Yuhai C, Taihe S и Singh A 2017 *Rare Met. Mater. and Eng.* 46 634
16. Jamshidinia M, Kong F and Kovacevic R J. 2013 *Manuf. Sci. Eng.* 135 1
17. Donghong Ding, Zengxi(Stephen) Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li A Tool-Path Generation Strategy For Wire And Arc Additive Manufacturing/*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73 (2014), pp. 173-183
18. A. Lehti, L. Taimisto, H. Piili, O. Nyrhilä, A. Salminen Correlation Between Pyrometer Monitoring and Active Illumination Imaging of Laser Assisted Additive Manufacturing of Stainless Steel *Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)*, Paper 404 (2011), pp. 196-204
19. Sui Him Mok, Guijun Bi, Janet Folkes, Ian Pashby Deposition of Ti–6Al–4V Using a High Power Diode Laser and Wire, Part I: Investigation on the Process Characteristics *Surface & Coatings Technology*, 202 (2008), pp. 3933-3939.
20. Fritz Klocke, Kristian Arntz, Nils Klingbeil, Martin Schulz Wire-Based Laser Metal Deposition for Additive Manufacturing of TiAl6V4: Basic Investigations of Microstructure and Mechanical Properties from Build Up Parts

Proceedings of SPIE LASE, 2017, San Francisco, California, United States, Volume 10095, Laser 3D Manufacturing IV; 100950U (2017)

21. A. Raghavan, H.L. Wei, T.A. Palmer, T. DebRoy Heat Transfer and Fluid Flow in Additive Manufacturing Journal of Laser Applications, 25 (Number (5)) (2013)

22. Qianru Wu, Jiping Lu, Changmeng Liu, Hongli Fan, Xuezhi Shi, Jie Fu, Shuyuan Ma Effect of Molten Pool Size on Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy Materials, 10 (7) (2017), p. 749

23. F. Montevecchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, G. Campatelli Idle Time Selection For Wire-Arc Additive Manufacturing: A Finite Elementbased Technique Additive Manufacturing, 21 (2018), pp. 479-486

24. B. Wu, D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, J. Han, et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Mater Process Technol, 250 (2017), pp. 304-312

25. B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing Addit Manuf, 23 (2018), pp. 151-160

26. F. Montevecchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, G. Campatelli Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: a finite element-based technique Addit Manuf, 21 (2018), pp. 479-486

27. Y. Lei, J. Xiong, R. Li Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing Int J Adv Manuf Technol, 96 (2018), pp. 1355-1365

28. L. Van Thao, M. Dinh Si, D. Tat Khoa, H. Quang Huy Prediction of welding bead geometry for wire arc additive manufacturing of SS308L walls using response surface methodology Transp Commun Sci J, 71 (2020), pp. 431-443

29. V.T. Le, D.S. Mai Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing Mater Lett, 271 (2020), p. 127791

30. I. Tomashchuk, P. Sallamand, N. Belyavina, M. Pilloz Evolution of microstructures and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium alloy to stainless steel via copper interlayer Mater. Sci. Eng. A, 585 (2013), pp. 114-122
31. I. Tomashchuk, D. Grevey, P. Sallamand Dissimilar laser welding of AISI316L stainless steel to Ti6–Al4–6V alloy via pure vanadium interlayer Mater. Sci. Eng. A, 622 (2015), pp. 37-45
32. H. Liu, Z. Cheng, J. Huang, Z. Ye, J. Yang, S. Chen, et al. Feasibility study of different filler metals on MIG-TIG double-sided arc brazing of titanium alloy-stainless steel J Manuf Process, 47 (2019), pp. 183-191
33. S. Chen, M. Zhang, J. Huang, C. Cui, H. Zhang, X. Zhao Microstructures and mechanical property of laser butt welding of titanium alloy to stainless steel Mater Des, 53 (2014), pp. 504-511
34. Сварка с титаном и титановыми сплавами [Электронный ресурс]: <http://weldzone.info/technology/materials/49-carbonic/512-svarka-stalej-s-titanom>
35. Sudha C, Prasanthi T N, Murugesan S. Study of interface and base metal microstructures in explosive clad joint of Ti–5Ta–1.8Nb and 304L stainless steel [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16: 133139.
36. Kundu S, Chatterjee S. Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer [J]. Materials Characterization, 2008, 59: 631637.
37. Sun Z, Karppi R. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: An overview [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59: 257267.
38. Rahavan V. FeTiV (Iron-Titanium-Vanadium) [J]. Journal of Phase Equilibrium, 1993, 14(5): 632.
39. Гибсон Я. Розен Д. Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство 2016. 656 с.
40. Григорьянц. А.Г. Лазерные аддитивные технологии в

машиностроении.2016г. 280 с.

41. Станки эксперт. Анастасия Глухова/ Твёрдость металлов [Электронный ресурс]: stankiexpert.ru/tehnologii/tverdost-metallov.html

42. Abnormal grain growth in commercially pure titanium during additive manufacturing with electron beam melting [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100281>

43. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197;

44. СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 15.06.2003 г;

45. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.М.: Стандартинформ, 2016 г;

46. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.;

47. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11с.;

48. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения;

49. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов;

50. ГОСТ 12.4.120-83 Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты от ионизирующих излучений. Общие технические требования;

51. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.

Приложение А

(Справочное)

1. Literature review

Laser powder bed fusion (LPBF), also known as selective laser melting (SLM), is a layer-by-layer metal additive manufacturing technique that provides significant design flexibility when compared to conventional manufacturing approaches. While LPBF-built parts are increasingly used in industrial applications, knowledge gaps remain about microstructural evolution and the resulting effect on structural properties. These uncertainties arise from the unusual thermal history inherent to LPBF, in which rapid, local thermal cycling as the part is built layer-by-layer follows initial rapid solidification. Part geometry has a significant influence on this thermal history, which causes instances of microstructural variation (and therefore mechanical property changes) across a single part. Furthermore, in the case of alloys that undergo a thermally driven phase transition upon cooling, the timescale of that phase transition has a large influence on the resulting microstructure. LPBF-produced parts also exhibit significant residual stresses due to the extreme thermal histories. Post-build heat treatments can alleviate some of these issues, however residual stress can lead to part failure or unacceptable part distortion during the build. Prediction of and compensation for these issues using tailored thermal histories and/or alloy modifications requires a detailed understanding of the in situ evolution of residual stress and other micro-structural features during the build process.

The most commonly used Ti alloy for LPBF is Ti-6Al-4V (Ti-64), driven largely by the aerospace and biomedical industries. While the application of LPBF to Ti-64 shows great promise and has been successfully implemented for in service parts by General Electric and Airbus, the Ti-64 alloy composition was optimized for specific thermomechanical processing conditions that entail significantly

different thermal histories than those experienced in LPBF. Therefore, the exploration of alternative Ti alloy compositions which are better suited to the extreme processing conditions of LPBF is an important research objective. One strategy currently being explored is to use β -Ti alloys that do not undergo a β to α phase transition upon cooling, to change how the asbuilt microstructure is formed and achieve different properties. For example, Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr is a metastable β -Ti alloy that shows promise for LPBF applications but has a much less extensive body of literature pertaining to its use in LPBF than Ti-64. While microstructural information and mechanical properties have been reported for LPBF-produced Ti material, no in situ studies of its solidification behavior under LPBF conditions have been reported.

While in situ X-ray imaging has been applied to understand LPBF process dynamics over the last few years, similar applications of in situ X-ray diffraction to LPBF have been more limited. High speed X-ray imaging probes subsurface melt pool dynamics of the LPBF process and provides complementary information to more widespread optical techniques. This technique has been used to study the influence of melt pool geometry on spatter formation, vapor depression (or keyhole) geometry changes as a function of laser power and scan speed in Ti-64, and the dynamics of pore formation and evolution in various materials. Other studies have focused on understanding and mitigating specific types of defect formation such as pores at laser scan turnaround points, pore repair strategies, and issues that arise when scanning over deep powder to mimic unsupported overhang regions that often occur in full builds. X-ray diffraction directly measures the evolution of lattice parameters and the presence of different crystallographic phases. Tracking lattice expansion and contraction provides insight into postsolidification cooling rates as well as the evolution of residual stress. Measurements of what phase fractions are present provides insight into the dynamics and timescale of the β to α transition in Ti-64 upon cooling, which influences the final microstructure of LPBF Ti-64. Time resolved X-ray diffraction has been used to probe the dynamics of welding processes in various materials,

notably by Elmer and coworkers. Recent work by Brown et al. used X-ray diffraction to understand microstructural evolution in an additive wire arc process depositing 308L stainless steel. Zhao et al. used pink beam diffraction to observe the β to α transition in laser spot melting of Ti-64 on LPBF-relevant timescales, but did not perform any scanning experiments. Recently, Thampy et al. used monochromatic X-ray diffraction to quantify cooling rates in LPBF of Ti-64 at scan speeds approaching those used in LPBF. High speed (20 kHz) diffraction experiments by Hocine et al. quantified cooling rates and phase transformations in Ti-64 during multiplescan laser melting under conditions similar to a single layer during a full LPBF build, quantifying microstructural changes during cyclic annealing induced by multiple passes of the laser beam. In this work we use high speed (20,000 frames per second) in situ X-ray imaging to quantify and compare the melt pool fluid dynamics in Ti-64 and Ti under LPBF conditions. We also use in situ X-ray diffraction (1,000 frames per second) to quantify phase changes and thermal contraction caused by LPBF in both alloys. We correlate the diffraction results in Ti-64 with thermomechanical modeling to understand relative contributions of temperature, residual stress, and chemical changes on the microstructural changes observed in the experimental data. These results provide a thorough view of the solidification and cooling dynamics driven by LPBF in both Ti-64 and Ti and provide insights into defect formation and residual stress development, two important features that influence the mechanical performance of LPBF-produced parts.

2. Methods

The experimental setup used for the in situ X-ray imaging and diffraction experiments presented here is described in detail elsewhere. The samples were held in a vacuum chamber with windows on either side to allow entrance and exit of X-rays. After mounting each sample, the chamber was evacuated to 1×10^{-2} Torr and then backfilled with ar and kept under a constant flow of Ar at ~ 760 Torr

during laser melting experiments to avoid oxidation. The samples were irradiated by a 1070 nm Yb-fiber laser (IPG Photonics, Oxford, MA, USA), which was focused to a $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ beam diameter ($D4\sigma$) and scanned across the sample surface using a 3-axis scan mirror system. All experiments reported here used a laser scan speed of 455mm/s

2.1 Sample geometry

Samples consisted of 500 μm thick plates of Ti-64 (TMS Titanium, Poway, CA, USA) or Ti (Grandis Titanium, Rancho Santa Margarita, CA, USA) cut to the desired dimensions by wire electrical discharge machining (EDM) and sandwiched between two 1 mm thick glassy carbon plates. A 50–80 μm deep powder layer of either Ti-64 (Additive Metal Alloys, Maumee, OH, USA) or Ti (Advanced Powders and Coatings, Inc., Canada) was manually spread using a steel razor blade on top of a substrate of the matching material. All singletrack laser scans were 3 mm in length, and X-ray data were collected from near the middle of the scan, when the scan speed had reached steady state.

2.2 X-ray imaging

Imaging was performed with the full, unattenuated X-ray spectrum to maximize flux. To prevent damage to the X-ray detector, a Uniblitz fast shutter was placed upstream from the scintillator to minimize X-ray exposure. The X-ray detection system consisted of a 100 μm thick scintillator crystal (Crytur, Turnov, Czech Republic), 10 $\times$ /0.28NA long working distance infinity corrected objective lens (Mitutoyo, Kawasaki, Japan), tube lens (Thorlabs, Newton, NJ, USA) and Photron SA-X2 high speed camera, which enabled data collection at 20 kHz frame rates with 25 μs exposure time. This produced 1024×672 pixel images with an effective pixel size of 2 μm , yielding a $\sim 2 \times 1.3\text{mm}^2$ field of view.

Data processing followed the same procedure described by Martin et al.

using a custom script written in Mathematica. A time difference image was calculated by dividing each frame by the uncorrected frame and t_0 represents the intensity of the first frame. In these images, darker regions indicate a decrease in X-ray absorption and lighter regions indicate an increase in X-ray absorption. Each difference image frame was binarized based on a builtin Mathematica Binarize function, and both the vapor depression and pores were manually identified. For each frame, analysis was limited to the region below the substrate powder interface to avoid misidentifying powder motion as either vapor depression behavior or pore formation.

3 Results and discussion

3.1 Pore formation as a function of laser power

Fig. 1 displays the vapor depression depth, depth of voids from the substrate surface, and linear spatial void frequency for both Ti-64 and Ti as a function of power for a scan speed of 455 mm/s. The spatial void frequency is computed by dividing the number of pores observed in a single sample by the linear field of view, 2.048 mm, to normalize the data by the observed scan distance. The vapor depression depth, which quantifies the distance between the deepest point in the vapor depression and the surface of the substrate, increases linearly as a function of laser power for both materials. While these experiments cannot resolve the density difference between the liquid melt pool and solid substrate material, *ex situ* metallographic measurements of melt pool depth are very similar to the average vapor depression depth, indicating that the vapor depression penetrates nearly all the way to the bottom of the melt pool. There is no substantial difference in observed vapor depression depth between the two alloys. The average depth of voids from the surface also exhibits a linear relationship with power and is near the average vapor depression depth,

suggesting that most voids are trapped during solidification near the deepest point of the melt pool.

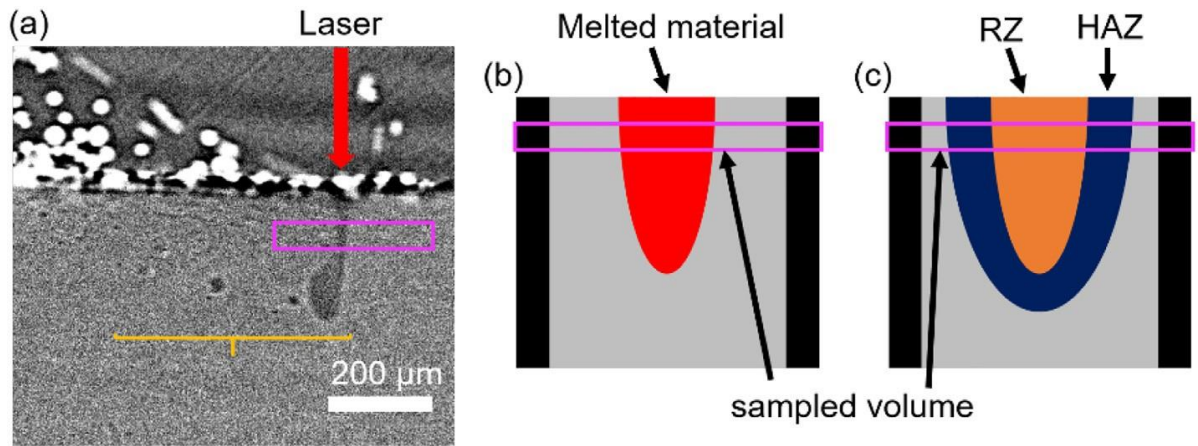


Fig. 1. Illustration of the sampled volume for diffraction experiments.

(a) X-ray difference image frame with X-ray diffraction spot size outlined in purple. The distance travelled by the laser between two consecutive diffraction patterns is illustrated with a yellow bracket, and the approximate laser location is indicated. (b) Schematic view orthogonal to the X-ray beam, parallel to the scan direction with the melted region illustrated in red, and the X-ray illuminated volume outlined in purple. (c) Schematic view of the sampled volume after laser melting and resolidification, illustrating the portions of the resolidified zone (RZ) and heat affected zone (HAZ) present in the sampled volume. Panels (b) and (c) are not drawn to scale.

As is evident in, Ti-64 samples consistently exhibited more voids than Ti with the same power. However, the magnitude of this difference is comparable to the variation in void frequency between two Ti trials, and statistically robust comparisons of void formation in the two materials requires fully 3D builds. The 50 μ s time resolution afforded by these measurements is insufficient to resolve differences in the pore formation mechanism between the two alloys if any such differences are present. Powder motion and spatter ejection are also evident in the X-ray imaging, and are generally similar to what has been observed by others. Powder motion behavior between the two materials is

broadly similar, although Ti produced more spatter ejections larger than 100 μm in diameter than Ti-64. These large ejections appear to originate from the agglomeration of multiple powder particles, as observed previously in various materials. This difference may arise from the different powder size distributions of the two powders used in this study. While explicit powder size distribution measurements were not performed, qualitative observations of the radiography data indicate that the Ti powder particles were smaller ($\sim 20\text{--}30\ \mu\text{m}$ diameter) than the Ti-64 powder particles ($\sim 30\text{--}40\ \mu\text{m}$ diameter). These size differences could influence entrainment and spatter behavior but are less likely to affect the formation of keyhole pores because the vapor depression instabilities that govern keyhole porosity depends on behavior of the melt pool, rather than the properties of the unmelted powder.

3.2 Laser-driven Ti-64 phase change kinetics

Fig.2 illustrates the evolution of the diffraction pattern from a Ti-64 sample as the melt pool passes through the volume probed by the X-ray beam. The scan parameters are 300 W and 455 mm/s, the highest energy density used in this study. While the observed timescales, magnitude of peak shifts, and intensity changes vary as a function of laser power, all the samples exhibit similar behavior. Prior to laser melting, the diffraction pattern is consistent with the $\alpha + \beta$ microstructure expected for mill annealed Ti-64 plate. At $t = 0$ ms, an abrupt decrease in intensity of all the diffracted peaks indicates the onset of laser melting. Immediately after the decrease in diffracted intensity due to laser melting, evolution of the structure due to cooling begins. All observed diffraction peaks shift to lower Q , indicating larger lattice parameters due to thermal expansion, although peaks from the resolidified zone and heat affected zone behave quite differently.

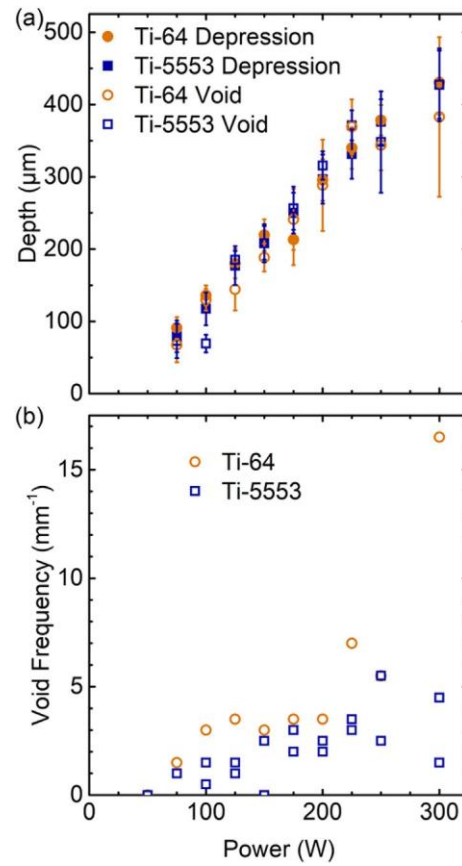


Fig. 2. Vapor depression behavior in Ti-64 and Ti-5553 as a function of laser power.

(a) Average vapor depression depth for Ti-64 and Ti plotted with the average depth for all voids found in the field of view for a given sample. Error bars correspond to the standard deviation of the data. (b) Linear spatial frequency of voids observed in each alloy as a function of laser power.

Upon resolidification, four diffraction peaks can be observed: α -Ti 100 at $Q \sim 2.48 \text{ \AA}^{-1}$, coincident α -Ti and β -Ti arising from β -Ti that has resolidified from the melt pool (β_{RS}) at $Q \sim 2.71 \text{ \AA}^{-1}$, a weak peak arising from β -Ti in the heat affected zone (β_{HAZ}) at $Q \sim 2.75 \text{ \AA}^{-1}$, and α -Ti 101 at $Q \sim 2.81 \text{ \AA}^{-1}$. The β_{RS} peak increases in intensity for 1–2 ms at the highest laser powers, indicating that the solidification front remains within the sampled volume for at least that amount of time as more liquid metal freezes to form β_{RS} . This is accompanied by a rapid shift to higher Q due to thermal contraction upon cooling. In contrast, the α -Ti peaks and the β_{HAZ} peak, all of which arise

from the HAZ, shift quickly to lower Q over a few milliseconds after laser melting. This time delay corresponds to the amount of time required to reach thermal equilibrium throughout the diffraction volume due to thermal diffusion, expected to be between 1 and 3 ms based on melt pool size and thermal diffusivity of Ti-64. This is followed by shifts to higher Q due to contraction upon cooling. Even after thermal equilibrium is reached, two distinct β -Ti peaks are observed, which we attribute to β_{RS} and β_{HAZ} with distinct lattice parameters. The distinct peaks indicate that at this point in the evolution of the sample significant non-thermal effects influence the lattice parameter of the β phase. If the lattice parameter of the β -Ti phase is purely governed by temperature, we would expect to observe a single β -Ti peak with most of the intensity due to β_{RS} and a high- Q tail due to the continuous temperature gradient in the cooler β_{HAZ} , as is the case with experiments performed at higher energy densities. Instead, we observe two distinct distributions of β lattice parameters, indicating that either residual strain or compositional variations caused by solute partitioning play an important role in determining the lattice parameter.

Upon further cooling the β_{RS} peak abruptly loses intensity and disappears while the α -Ti peaks gain intensity due to the β to α phase transition expected for Ti-64. This occurs at ~ 13 ms for the experiment shown in Fig. 3a. Prior to this phase transition, the contraction of the β_{RS} phase appears to follow a simple exponential decay, but reliable fitting of the peak shift is not possible due to the brief period when resolidified material remains above the β transus temperature. To quantify the cooling rate as a function of power we extract the β_{RS} lifetime (τ_β) from changes in the intensity of the α -Ti 100 peak, which is inversely related to the presence of the β_{RS} phase. We note that this relationship assumes that no additional undetected phases are present during this time. The α -Ti 100 peak was used to avoid possible artifacts introduced by peak overlap near the β_{RS} peak. To extract the lifetime, we fit the intensity of the α -Ti 100 peak as a function of time (fig. 3) to an asymmetric Gaussian peak and define

τ_β as 2σ , equivalent to the amount of time required for $\sim 95\%$ of the β_{RS} to disappear. Based on a 1 kHz sampling rate, the minimum τ_β detectable with this approach is ~ 2 ms. The extracted τ_β values increase linearly as a function of laser power. If we assume an approximately equal degree of undercooling for both the liquid $\rightarrow \beta$ and $\beta \rightarrow \alpha$ phase transitions, these τ_β values correspond to average cooling rates of $\sim 3 \times 10^5$ K/s at 150 W to $\sim 5 \times 10^4$ K/s at 300 W in the resolidified region when the β phase is present.

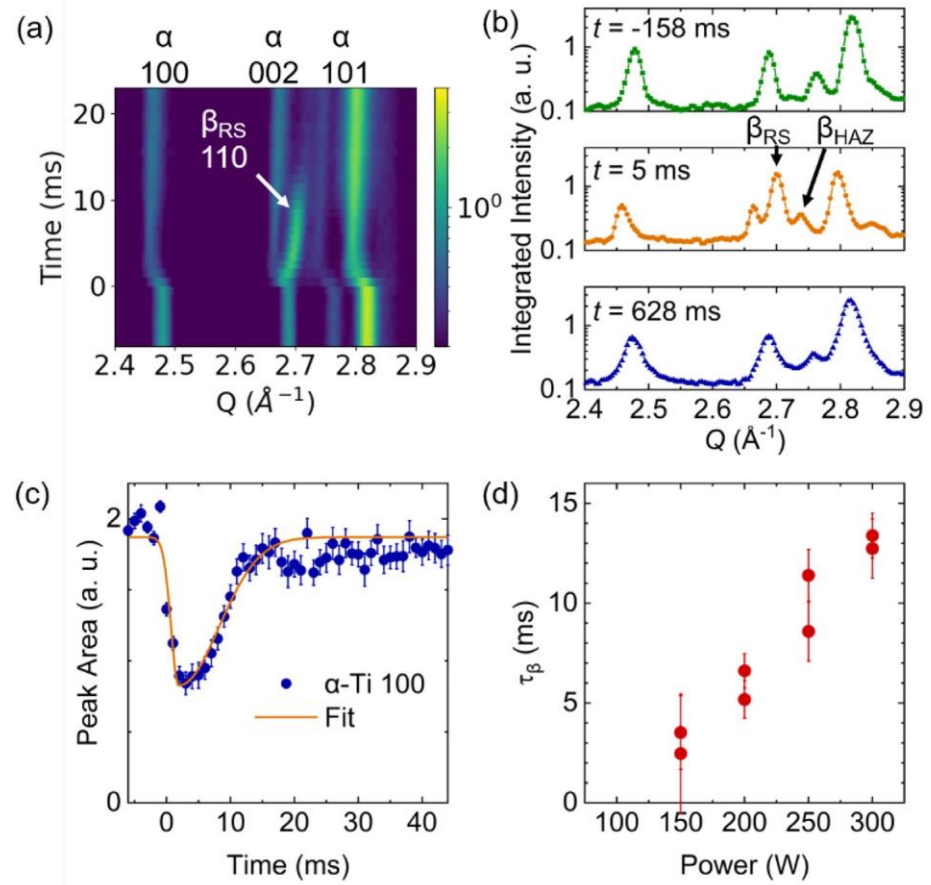


Fig. 3. Evolution of the Ti-64 diffraction pattern due to laser melting.

(a) Time series of diffraction patterns shortly before and after the laser melts the material, with intensity plotted on a log scale. Laser melting occurs at $\sim t = 0$ ms. (b) Selected individual diffraction patterns including $t = -158$ ms, illustrating the as received $\alpha + \beta$ microstructure prior to laser induced melting; $t = 5$ ms, shortly after melting with β_{RS} and β_{HAZ} peaks labelled; and $t = 628$ ms, after the material has cooled to near room temperature (c) Evolution of the α -Ti 100 peak intensity for 300 W and asymmetric Gaussian fit used to determine τ_β . (d) τ_β plotted as a

function of laser power. Each point in (d) represents a different experiment, with error bars representing the standard error computed from the fit.

This phase transition still occurs at powers below 150W, but it occurs on timescales too fast to resolve with these data, e.g. $\tau_\beta \ll 2$ ms. After the phase transition lattice contraction continues until the sample reaches equilibrium (Fig. 3b, $t = 628$ ms).

To interpret the relative importance of thermal contraction, mechanical strains due to thermal cycling, and chemical segregation during the laser melting experiments, we compared the position of the α -Ti 100 peak in the 200W case fig 4. To thermal strains and total strains extracted from thermomechanical simulations. While the thermomechanical simulations do not explicitly resolve crystallographic information, the observed behavior for all α -Ti peaks was relatively similar so this comparison can still provide valuable insights. It is important to note that the data presented in fig.4 should not be directly compared to the data presented in fig. 3a because of differences in the laser power. Fig 3a shows data from the 300W case to most clearly illustrate the changes observed during laser melting, while the data in fig 4. focus on the 200W case to ensure the comparison to modeling results are in a processing regime where the model assumptions are most consistent with the experimental conditions. Thermal strain, $\epsilon_{\text{thermal}}$, is calculated based on the average temperature in the simulation volume corresponding to the diffraction measurement and the coefficient of thermal expansion for Ti-64. To directly compare the total strains to the strains probed in this diffraction geometry, we extract ϵ_{x+z} , from the simulated strains:

$$\epsilon_{x+z} \approx \frac{1}{4} (\epsilon_x + \epsilon_z)$$

,where ϵ_x represents strains parallel to the laser scan direction and ϵ_z represents strains parallel to the laser beam. In this coordinate system, ϵ_y refers to strains parallel to the X-ray beam, which are not measured by the diffracted

X-rays collected in this detection geometry. As shown in fig. 4, the general experimental trend is qualitatively captured by the model, with a rapidly rising ($\sim$ ms) strain followed by a slow decay over 10s of 1ms. The comparison between the model and experiment highlights a few important features of the material behavior. First, as expected, the biggest contributor to the changes in lattice strain is the thermal expansion and contraction. Second, shortly before melting at a time of $\sim$ 3ms, the material contracts very slightly. The model reveals that this is due to a compression wave traveling in front of the melt pool as a response to thermal expansion of the preceding material, which is under laser irradiation. Third, during and after melting there is some non-negligible disagreement between the experimental values and modelled values. This disagreement is due to two primary causes. During and shortly after melting (4–10ms in fig 4, highlighted in red), the modelled thermal strain is substantially larger than the measured lattice strains because the measured strains in this instance only track α -Ti behavior, underestimating the overall thermal expansion of the sample by not including behavior of the high temperature β phase and liquid Ti. Later after melting (45–50ms in fig.4) the experimental lattice strains are larger than those predicted by the thermo mechanical modeling. This is because of the influence of unmodelled mechanisms affecting changes to the lattice parameter. These mechanisms could include chemical redistribution, temperature differences between the experiment and the model due to latent heat of the $\beta - \alpha$ phase transition, volumetric strains arising from the $\beta - \alpha$ phase transition, and/or unreleased residual stress in the sample prior to melting.

Ex situ SEM imaging indicate that the solidified region is entirely α' phase with no β -Ti present, while the HAZ retains an $\alpha + \beta$ microstructure, as expected for these laser melting conditions. No clear trend can be observed in lattice expansion or contraction as a function of laser power for the β phase, and a small lattice expansion illustrated by a shift to smaller Q is observed for the α phase.

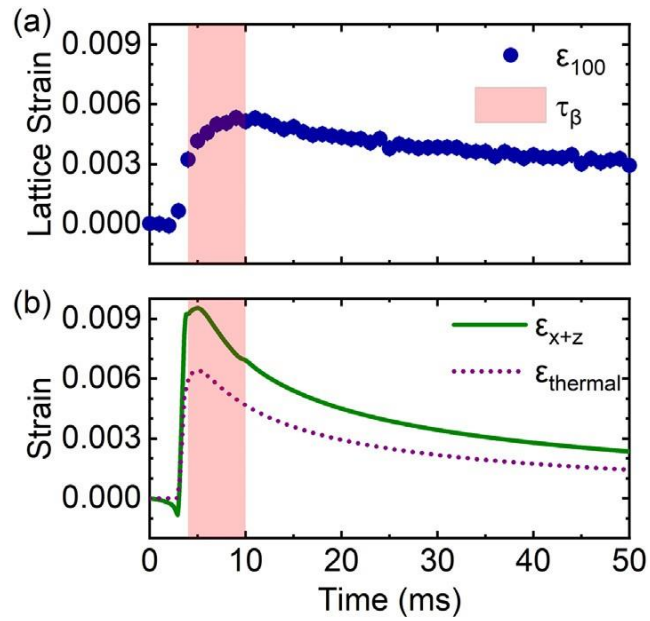


Fig. 4. Comparison of 200 W laser melting in Ti-64 with thermo mechanical modeling.

(a) Strain of the α -Ti 100 lattice plane as a function of time during laser melting, calculated from the position of the α -Ti 100 peak measured in the experiment. Therefore, this lattice strain under-estimates the overall material strain during the time when the β RS peak is present, τ_β , highlighted in red. (b) Average thermal ($\epsilon_{\text{thermal}}$) and total strains (ϵ_{x+z}) as calculated by thermo mechanical modeling. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

This behavior is consistent with observations in the thermomechanical modeling, which do not indicate significant residual stress in the orientation probed by the diffraction experiment once the sample has cooled back to room temperature. Peak width increases with laser power for both phases, with a more significant increase seen in the β phase. Furthermore, fit quality degrades with increasing laser power due to more significant deviations from ideal peak shapes. Taken together, these behaviors indicate an increase in crystallographic defects and micro strain (i.e. increased dislocation density) and chemical segregation in both phases. While anisotropic macro strain could also cause such peak broadening, we do not observe large enough residual strain

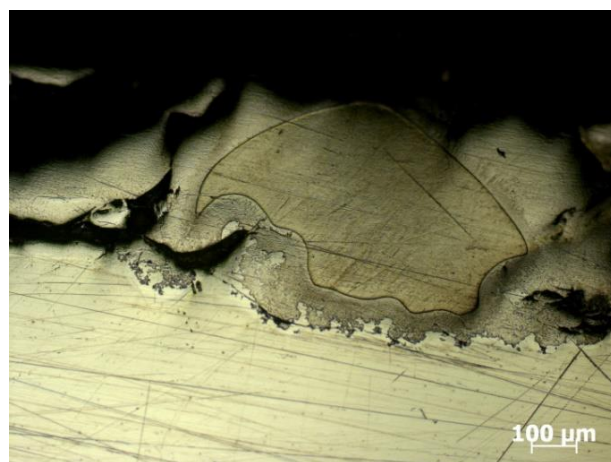
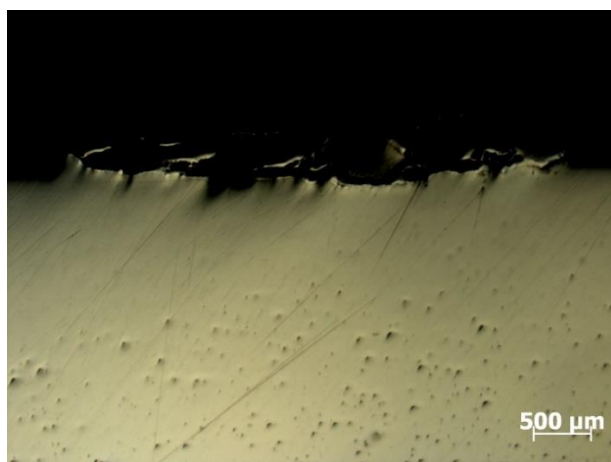
distributions in the thermo mechanical modeling at t_∞ to cause substantial peak broadening. In the case of the β phase, the changes are primarily due to chemistry changes and an increase in micro strain in the HAZ. It is unlikely that the broadening is due to grain refinement of the β phase, because the heating without melting experienced by the HAZ is not expected to cause grain refinement. These effects cannot be effectively deconvolved in the α phase because the sampled volume includes contributions from both the RZ and HAZ, where the α phase is in significantly different strain states.

4. Conclusions

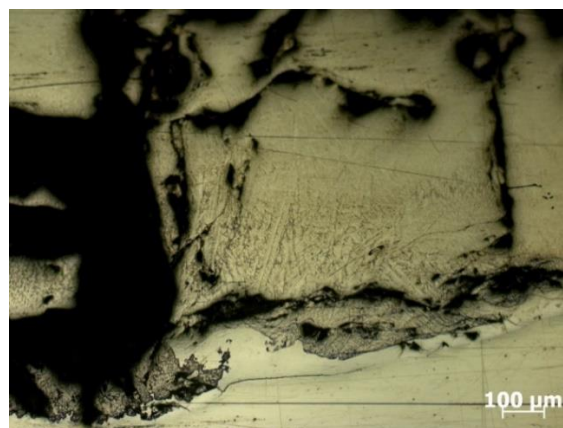
In this study, we investigated melt pool fluid dynamics and post solidification structural evolution in Ti-64 and Ti during LPBF using a combination of *in situ* X-ray imaging and diffraction. Fluid dynamics of the melt pool are similar between the two alloys, and they exhibit comparable melt pool dimensions for the same laser power and scan speed. While slightly more pore formation was observed in Ti-64 than Ti for a given set of laser scan parameters, comparisons of full builds are required to determine the statistical robustness of this observation. After solidification, Ti-64 exhibits a linear relationship between the beta lifetime τ_β and laser power over the conditions investigated here. Furthermore, both the α and β phases exhibited an increase in peak broadening due to a combination of increased microstrain/dislocation density and nonuniform solute segregation at high laser powers. In Ti, high powers caused increased lattice expansion in the β phase and contraction in the α phase. While these observations are most likely due to increases in isotropic residual stresses with increasing power, we cannot rule out additional contributions from solute segregation during resolidification. These results illustrate subtle differences in the behavior of these two alloys under LPBF conditions and can be used to inform models and process parameter choices for part production.

Приложение Б

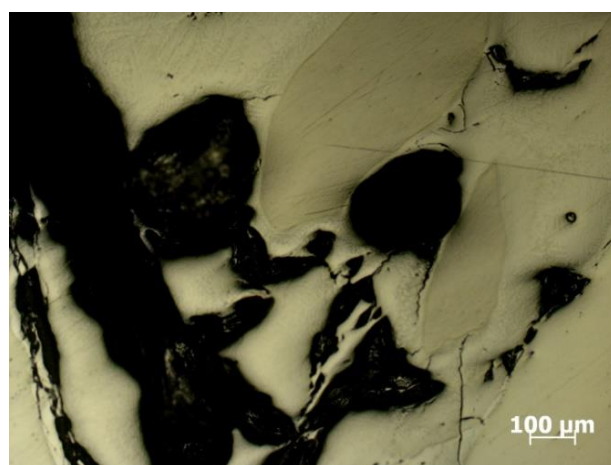
(обязательное)



Режим 1

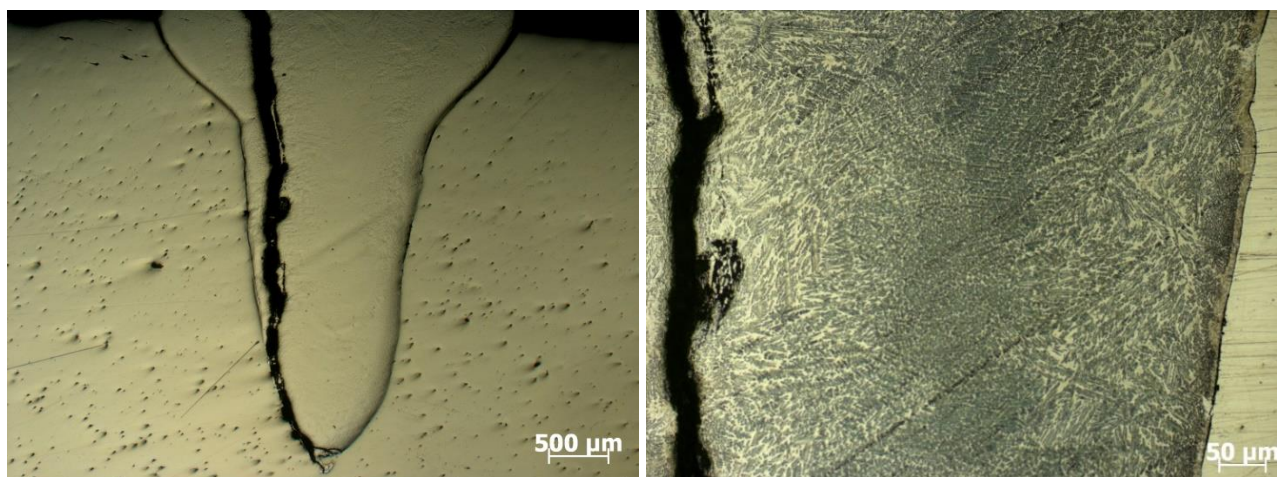


Режим 2

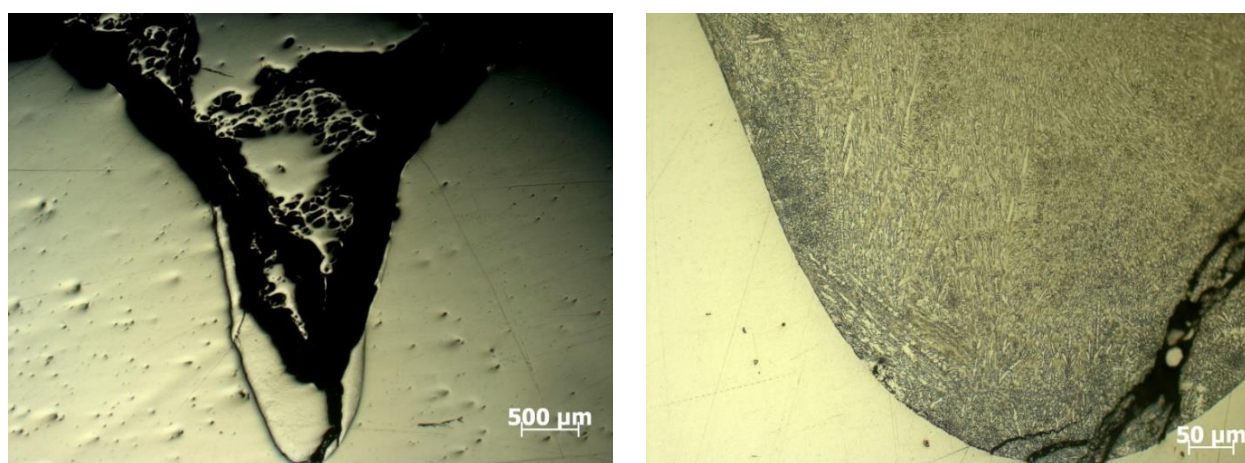


Режим 3

Рисунок Б.1 – Вид поперечных сечений треков, полученных при режимах 1-3
электронно-лучевого сплавления



Режим 4



Режим 5

Рисунок Б.2 – Вид поперечных сечений треков, полученных при режимах 4-5
электронно-лучевого сплавления