

Школа	<u>Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности</u>
Направление подготовки	<u>15.04.01 Машиностроение</u>
ООП/ОПОП	<u>Машины и технологии сварочного производства</u>
Специализация	<u>Машины и технологии сварочного производства</u>
Отделение	<u>электронной инженерии</u>

### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Формирование микроструктуры быстрорежущей стали 10P6M5 в процессе селективной электроннолучевой наплавки

УДК 621.791.92:669.15-194

#### Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич		

#### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Першина А.А.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

#### Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Дерюшева В.Н.	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способностью формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способностью применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способностью использовать иностранный язык в профессиональной сфере
ОПК(У)-4	Способностью осуществлять экспертизу технической документации
ОПК(У)-5	Способностью организовывать работу коллективов исполнителей, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок выполнения работ, организовывать в подразделении работы по совершенствованию, модернизации, унификации выпускаемых изделий, и их элементов, по разработке проектов стандартов и сертификатов, обеспечивать адаптацию современных версий систем управления качеством к конкретным условиям производства на основе международных стандартов
ОПК(У)-6	Способностью к работе в многонациональных коллективах, в том числе при работе над междисциплинарными и инновационными
ОПК(У)-7	Способностью обеспечивать защиту и оценку стоимости объектов интеллектуальной деятельности
ОПК(У)-8	Способностью проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий в области машиностроения

ОПК(У)-9	Способностью обеспечивать управление программами освоения новой продукции и технологий, проводить оценку производственных и непроизводственных затрат на обеспечение требуемого качества продукции, анализировать результаты деятельности производственных подразделений
ОПК(У)-10	Способностью организовывать работу по повышению научно-технических знаний работников
ОПК(У)-11	Способностью подготавливать отзывы и заключения на проекты стандартов, рационализаторские предложения и изобретения в области машиностроения
ОПК(У)-12	Способностью подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований в области машиностроения
ОПК(У)-13	Способностью разрабатывать методические и нормативные документы, предложения и проводить мероприятия по реализации разработанных проектов и программ в области машиностроения
ОПК(У)-14	Способностью выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способностью разрабатывать технические задания на проектирование и изготовление машин, приводов, оборудования, систем и нестандартного оборудования и средств технологического оснащения, выбирать оборудование и технологическую оснастку
ПК(У)-2	Способностью разрабатывать нормы выработки и технологические нормативы на расход материалов, заготовок, топлива и электроэнергии в машиностроении
ПК(У)-3	Способностью оценивать технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, изготовления машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов, принимать участие в создании системы менеджмента качества на предприятии
ПК(У)-8	Способностью организовать и проводить научные исследования, связанные с разработкой проектов и программ, проводить работы по стандартизации технических средств, систем, процессов оборудования и материалов
ПК(У)-9	Способностью разрабатывать физические и математические модели исследуемых машин, приводов, систем, процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере, разрабатывать методики и организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов
ПК(У)-10	Способностью и готовностью использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности



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

Школа	<u>Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности</u>
Направление подготовки	<u>15.04.01</u>
<u>Машиностроение</u>	
ООП/ОПОП	<u>Машины и технологии сварочного</u>
<u>производства</u>	
Специализация	<u>Машины и технологии сварочного</u>
<u>производства</u>	
Отделение	<u>электронной</u>
<u>инженерии</u>	

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_ А.С. Гордынец  
(Подпись) (Дата) (ФИО)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич

Тема работы:

Формирование микроструктуры быстрорежущей стали 10P6M5 в процессе селективной электроннолучевой наплавки	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	Комплект образцов металла, вырезанных из разных слоёв аддитивно выращенного изделия посредством аддитивной электронно-лучевой технологии на основе стали 10P6M5
<p><b>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b> <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литературный обзор</li> <li>2. Материалы и методы</li> <li>3. Результаты обучения</li> </ol>

<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Титульный лист. Цели и задачи. Материалы и методы. Микроструктура исходного покрытия и литого ядра. Микротвердость образцов. Микроструктура после импульсного электроннолучевого оплавления. Микроструктура ЗТВ. Структура в области двух смежных дорожек оплавления. Зависимости от тока луча. Выводы.</p>
--	--

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p><b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b></p>	<p><b>Гасанов Магеррам Али оглы</b></p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p><b>Антоневич Ольга Алексеевна</b></p>
<p><b>Английский язык</b></p>	<p><b>Щеголихина Юлия Викторовна,</b></p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b></p>	
<p><b>Реферат</b></p>	
<p><b>1 Литературный обзор</b></p>	

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

**Задание выдал руководитель**

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

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>1ВМ11</p>	<p>Никифоров Илья Игоревич</p>		

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

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 15.04.01  
Машиностроение  
 ООП/ОПОП Машины и технологии сварочного  
производства  
 Специализация Машины и технологии сварочного  
производства  
 Отделение электронной  
инженерии

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич

Тема работы:

Формирование микроструктуры быстрорежущей стали 10P6M5 в процессе селективной электроннолучевой наплавки
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.02.2023	1. Литературный обзор	15
16.03.2023	2. Постановка задачи	10
25.03.2023	3. Получение образцов 10P6M5 в вакууме	11
18.04.2023	4. Изучение структуры образцов и их свойств	17
10.05.2023	5. Сравнительный анализ с литературными данными	20
13.05.2023	6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и Ресурсосбережение	12
15.05.2023	7. Социальная ответственность	9
15.05.2023	8. Заключение	6

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Першина А.А.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

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

**Обучающийся**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 116 с., 29 рис., 20 табл., 39 источников, 1 прил.

Ключевые слова: ЗТВ (зона термического влияния), литое ядро, микроструктура, микротвердость, инструментальная сталь, инструментальная сталь.

Объектом исследования являются образцы стали 10P6M5 полученные посредством электронно-лучевой технологии.

Цель работы – изучение структуры и свойств изделий на основе стали 10P6M5 наплавкой на электронно-лучевой установке.

В ходе работы проводились исследования свойств в различных, по высоте наплавки, слоях образца.

В результате исследования на основании полученных данных в работе можно обосновать 2 наиболее рациональных режима обработки импульсным электронным лучом ранее наплавленного покрытия. Первый: это режим обработки при токе луча до 64 мА, позволяющий получить в литом ядре дисперсную структуру с большим объемом остаточного аустенита и, следовательно, малой твердостью. Второй режим при токе луча 64...78 мА. Он способствует образованию в литом ядре скрытоигольчатого мартенсита с малым содержанием остаточного аустенита (~7...7,5 ГПа).

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord7.0, фотографии были получены с использованием микроскопа OLYMPUS GX51.

Микротвердость образцов измеряли на приборе HVS-1000.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	13
1.1 Анализ современного состояния аддитивного производства. Формирование объемных изделий и покрытий методами прямого подвода энергии и металла .....	13
1.2 Электронно-лучевая технология и её применение.....	17
1.2.1 Селективное электронно-лучевое плавление.....	18
1.3 Инструментальные стали в аддитивном производстве и наплавке.....	21
1.3.1 Свойства, микроструктура и влияние последующей термообработки изделий полученных лазерным селективным плавлением инструментальных сталей, и его современное состояние на примере стали H13.....	21
1.3.2 Использование порошков инструментальных сталей с технологией лазерного покрытия в качестве износостойкого слоя.....	30
1.4 Характеристика видов износа.....	41
1.5 Изнашивание поверхностей трения без смазочного материала.....	44
Выводы по первой главе.....	45
2 ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	47
2.1 Материал исследования.....	47
2.2 Методика исследования .....	48
2.3 Описание установки .....	49
3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ .....	51
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	58
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	58
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	58
4.3 SWOT – анализ.....	60
4.4 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований .....	61



4.5	Планирование научно-исследовательских работ .....	62
4.5.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	62
4.5.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	63
4.5.3	Разработка графика проведения научного исследования .....	64
4.5.4	Расчет материальных затрат НИИ.....	68
4.5.5	Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы	69
4.5.6	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	70
4.5.7	Накладные расходы .....	71
4.5.8	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	71
4.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	72
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	77
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	77
5.2	Производственная безопасность .....	78
5.2.1	Движущиеся (в том числе разлетающиеся) твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего.....	80
5.2.2	Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов.....	81
5.2.3	Отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения .....	83
5.2.4	Повышенный уровень локальной вибрации .....	88
5.2.5	Чрезмерное загрязнение воздушной среды .....	88
5.2.6	Аномальные микроклиматические параметры воздушной среды на местонахождении работающего.....	89
5.2.7	Производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (активное наблюдение за ходом производственного процесса, монотонность труда, перенапряжение анализаторов).....	90

5.2.8 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума) .....	90
5.3 Экологическая безопасность.....	91
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	92
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований, и ЧС, которые могут произойти на рабочем месте .....	92
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС .....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	96
Приложение А (справочное) .....	100

## ВВЕДЕНИЕ

Длительная эксплуатация машин и оборудования часто сопровождается ухудшением их эксплуатационных характеристик из-за износа, и поэтому необходима своевременная замена вышедших из строя компонентов, что увеличивает производственные затраты. Однако в некоторых случаях нецелесообразно изготавливать деталь полностью из износостойкого, труднообрабатываемого и, следовательно, дорогостоящего материала.

Одним из решений для повышения износостойкости детали и, таким образом, продления срока ее службы является применение некоторых методов поверхностного упрочнения; в частности, это может быть нанесение износостойких покрытий. Однако важно, чтобы выбранный процесс нанесения позволял адаптировать характеристики покрытия в соответствии с конкретными условиями износа. Следовательно, существует необходимость не только в выборе подходящих исходных материалов и условий термообработки, но и в проведении трибологических экспериментов в широком диапазоне условий скольжения [1].

В настоящее время в промышленности существует острая проблема разработки многофункциональных износостойких покрытий для тяжелых пар, работающих в условиях скольжения без смазки или без нее [2]. Для обеспечения высокой износостойкости и низкого трения необходимо обеспечить поверхности деталей материалами с высокими трибологическими свойствами, образующими при скольжении частицы износа с высокой несущей способностью.

Возникает необходимость создания поверхностного слоя в паре трения.

Методы направленного энергетического осаждения всегда широко использовались для поверхностного упрочнения деталей машин, подверженных износу [3]. В частности, заметный прогресс был достигнут в использовании метода электронно-лучевого осаждения. За счет особенностей

нанесения слоев (низкий теплоотвод, вакуум, дегазация и др.) электронно-лучевой метод позволяет получать более износостойкие материалы.

Использование распространённого порошка инструментальной стали позволит получить высокоизносостойкое покрытие на рабочей поверхности с высокими механическими и сплавными характеристиками за приемлемую цену.

Целью работы является исследование структуры и твердости быстрорежущей стали в процессе селективной электронно-лучевой наплавки исходного порошка (сталь 10P6M5).

## 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1 Анализ современного состояния наплавки и аддитивного производства. Формирование объемных изделий и покрытий методами прямого подвода энергии и металла

Аддитивное производство – это цифровая технология производства, которая объединяет оборудование, компьютер, программное управление и материалы, используемые в передовых промышленных отраслях за последние 30 лет. Этот метод позволяет создавать сложные геометрические объекты, которые невозможно произвести традиционными методами, и обеспечивает быстрое прототипирование [3].

В настоящее время для производства изделий с помощью аддитивного производства используются металлические, полимерные и керамические материалы [4].

Применение аддитивных технологий может значительно сократить количество деталей, избавив от необходимости собирать несколько компонентов вместе и позволив изготовить сложные многокомпонентные детали. Кроме того, детали могут быть изготовлены по заказу, что уменьшает инвентарь запасных частей и время выполнения заказа на замену критически важных или устаревших компонентов. Именно поэтому аддитивное производство широко признано как новая парадигма для производства высокопроизводительных компонентов в различных отраслях, таких как авиационная, медицинская, энергетическая и автомобильная [5].

Основное представление аддитивного технологического процесса можно продемонстрировать элементарной схемой, представленной на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Схема аддитивного технологического процесса [6]

Система металлических аддитивных технологий основывается на расплавлении металлического сырья (проволоки, прутка или порошка) и нанесении его на подложку посредством расплавления для создания желаемой геометрии и свойств. Однако каждый тип технологии имеет свои уникальные особенности.

В процессе печати возникают фазовые превращения из-за повторного осаждения слоев и быстрого затвердевания, которые зависят от оборудования, геометрии и параметров печати. Эти переменные влияют на микроструктуру, которая может содержать длинные столбчатые зерна, поры и трещины, что ухудшает механические свойства материала. Тем не менее, металлические изделия, изготовленные с помощью аддитивных технологий, как правило, имеют более тонкую микроструктуру, чем традиционно изготовленные аналоги, и, следовательно, могут обладать более высоким пределом текучести и пределом прочности [3].

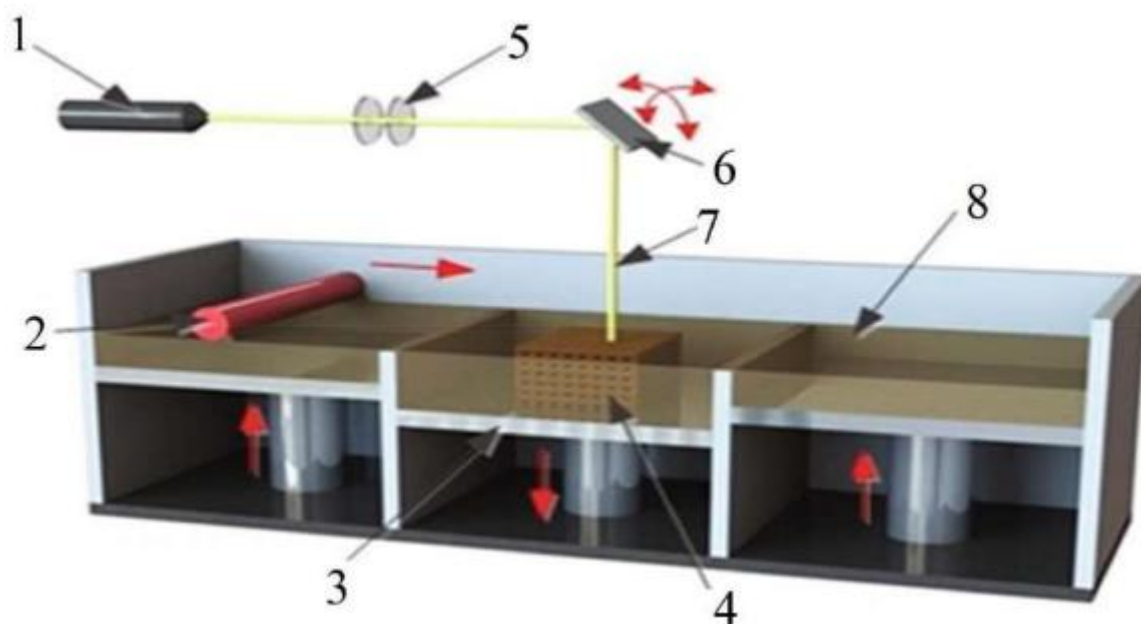
В соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.2, можно выделить 4 технологии металлических аддитивных процессов: струйное нанесение связующего, синтез на подложке, листовая ламинация и прямой подвод энергии и материала.



Рисунок 1.2 – Классификация технологий аддитивного производства металлов [7, 8]

Принцип технологии струйного нанесения связующего включает в себя следующее: клейкий связующий агент выборочно наносится на тонкие слои порошкового материала. Печатающая головка передвигается над платформой нанося капли связующего агента по слою материала. После того, как нанесен первый слой, платформа опускается вниз на размер одного слоя и насыпается новый слой порошка. Процесс повторяется до завершения изделия [9]. Из металлических материалов особой популярностью, изготовленным данным методом, приобрели нержавеющая сталь [10], алюминиевые [11] никелевые, [12] и жаропрочные сплавы [9].

Синтез на подложке – является ещё одним методом аддитивного производства, в котором поверхность предварительно нанесенного слоя порошкового материала выборочно или полностью расплавляется при воздействии лазера или электронного луча [13]. Рисунок 1.3 отображает процесс синтеза на подложке. В процессе синтеза на подложке требуется источник тепла для плавления или спекания порошка с образованием деталей.



1 – лазер, 2 – выравнивающий валик, 3 – печатная платформа, 4 – скаффолд, 5 – линзы, 6 – X–Y сканирующее зеркало, 7 – пучок лазерного излучения, 8 – подложка

Рисунок 1.3 – Процесс аддитивного производства изделия путем синтеза на подложке [13]

Одной из технологий синтеза на подложке служит – селективное лазерное спекание. В данном методе используется порошкообразный материал, спекаемый с помощью лазера. Используемый порошок разогревается до температуры, близкой к температуре плавления металла/сплава, выравнивается валиком и лучом лазера спекается желаемый контур слоя. Используется метод для изготовления изделий из никелевого сплава [14].

Селективное лазерное плавление отличается от селективного лазерного спекания тем, что этот метод быстрее, но требует инертных газов для лазера. Но ключевое отличие состоит в том, что в процессе печати изделия порошок не плавится, а спекается. В выборочном лазерном спекании сверху устанавливается лазер с набором линз, сфокусированных на порошкообразном материале. После того, как слой затвердел, платформа для сборки опускается,



и рычаг с повторным покрытием создает новый слой наверху, весь этот процесс будет повторяться до тех пор, пока не будет произведена вся деталь. Метод применяется для изготовления деталей из сплава Ti6Al4V [15], AlSi10Mg [16] Inconel 718, и стали 316L [17].

Прямое лазерное спекание металла – метод аддитивных технологий, в котором источником тепла является лазер, при котором объект создается с использованием металлических порошков. Установка производит объект на подвижной платформе путем нанесения дополнительных слоев материала, каждый слой имеет одинаковую толщину. Лазер высокой мощности воздействует непосредственно на порошковый слой и расплавляет металл в соответствии с траекторией заданной системой автоматизированного проектирования. Этот процесс продолжается слой за слоем, пока объект не будет полностью изготовлен в соответствии с требуемым дизайном. В данном методе печати можно контролировать пористость каждого слоя. Ключевым недостатком является то, что детали, произведенные лазерным спеканием металла, не обладают сплошностью, и потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы или детали, произведенные субтрактивными методами [13, 18]. Метод используется для изготовления деталей из алюминиевого сплава [19] титанового [20] и нержавеющей стали [21].

## **1.2 Электронно-лучевая технология и её применение**

Электронно-лучевое наплавочное производство лишено части недостатков, присущих дуговому и лазерному, поскольку в нем нет ни зависимости от отражательной способности металла, ни окисления за счёт реализации процесса печати в вакуумной камере. Более того, ожидается, что предварительный нагрев, который обычно используется в электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии, позволит снизить остаточные напряжения, вызванные быстрым охлаждением. Данная технология успешно

применялась для изготовления деталей из стали, алюминиевых сплавов, чистой меди, медных и титановых сплавов [33]. Пучок электронов большой мощности в вакууме используется для направленного нагрева и расплавления материала подложки и проволочного филамента. В качестве филамента может использоваться как стандартные порошки, так и специально изготовленные смеси.

Работа в вакууме обеспечивает чистую производственную среду и устраняет необходимость в расходном защитном газе, который обычно используется в системах лазерного осаждения. Процесс электронно-лучевого проволочного производства почти на 99% эффективен по потреблению сырья и приближается к 95% эффективности по использованию энергии. Электронный луч превосходно взаимодействует с любым электропроводящим материалом, включая сплавы с высокой отражающей способностью, такие как алюминий и медь.

На данный момент тщательно отработанным процессом электронно-лучевого аддитивного производства владеет компания Sciaky, которая учитывает тенденции исследований и проблем при изготовлении деталей. Компания Sciaky помогает крупному производителю автомобилей сократить время на создание и ремонт инструментов, а также предоставляет возможность печати крупносерийных деталей.

### **1.2.1 Селективное электронно-лучевое плавление**

Селективное электронно-лучевое плавление, подобно другим технологиям, основанным на послойном выращивании, является неотъемлемой частью процесса аддитивного производства. Оно включает в себя создание трехмерной виртуальной компьютерной модели необходимого компонента, разделение данных на отдельные слои с постоянной толщиной, производство компонента и извлечения. Во время извлечения изготовленные компоненты удаляются из порошкового слоя с помощью пескоструйной

обработки тем же порошком. Восстановленный порошок может быть повторно использован для последующих процессов. В зависимости от применения компонента, может быть проведена дополнительная обработка поверхности для уменьшения шероховатости, свойственной процессу изготовления.

Селективное электронно-лучевое плавление ограничено электропроводными материалами, в основном металлами, из-за взаимодействия электронов с атмосферой. Для устранения этого эффекта производственный процесс осуществляется в вакуумной камере, обычно поддерживаемой при давлении около  $2 \cdot 10^{-3}$  Па с помощью контролируемого выпуска гелия. В вакуумной камере находится пушка электронного луча, обладающая мощностью до 3 кВт и ускоряющим напряжением 60 кВ. Диаметр луча составляет от 100 до 1000 мкм в зависимости от качества, типа катода и применяемой мощности. Электромагнитные катушки могут использоваться для перемещения электронного луча со скоростью отклонения до 10 000 м/с без инерции.

Внутри вакуумной камеры установлены две емкости для порошка и грабля для нанесения слоев в заданной области конструкции с использованием подвижной платформы. На рисунке 1 показаны компоненты вакуумной камеры и отдельные шаги, связанные с производственным процессом.

На первом этапе используют расфокусированный электронный луч для сканирования всей поверхности слоя порошка несколько раз с целью установления предварительной температуры нагрева. Требуемая температура варьируется в зависимости от используемого материала от 300°C, для чистой меди, до 1,100°C для некоторых никелевых сплавов. Этот шаг крайне важен для обеспечения стабильности процесса. Однако существует проблема, связанная с рассеиванием электрического заряда электронов через слой порошка. Если это не управляется должным образом, это может привести к задымлению вакуумной камеры, когда верхний слой порошка взрывается и частицы выбрасываются из слоя. Это неизбежно приводит к прекращению

процесса. Благодаря небольшому спеканию частиц во время предварительного нагрева, обеспечивается достаточная электропроводность. Контролируемое поступление гелия при давлениях до  $2 \cdot 10^{-3}$  Па дополнительно поддерживает стабильность процесса. Электронный луч положительно ионизирует атомы гелия, позволяя им нейтрализовать отрицательный заряд в слое порошка. Кроме того, спекание слоя порошка помогает удерживать компонент.

На следующем этапе сфокусированный электронный луч полностью плавит области, соответствующие геометрии компонента. В зависимости от геометрии используются различные способы обработки при скоростях перемещения луча от 4 м/с до 10 м/с. Контуры могут быть обработаны индивидуально или множественном лучей, до 100 позиций контуров могут быть оплавлены одновременно. Это становится возможным благодаря быстрому отклонению электронного луча.

После затвердевания платформа двигается вниз на толщину одного слоя. Конкретная толщина слоя может варьироваться от 50 нм до 150 нм в зависимости от размера порошка и используемого материала. Далее наносится новый слой порошка. Для этого грабельный инструмент сначала проходит через скопление порошка перед резервуаром с порошком, вызывая падение достаточного количества порошка на другую сторону грабельного инструмента. Затем эти частицы распределяются внутри резервуара. Этот же процесс осуществляется в обратном порядке в другом резервуаре с порошком для следующего слоя. Конечные свойства изготовленных компонентов в значительной степени зависят от качества порошка. Желательно, чтобы слой порошка имел высокую относительную плотность, которая обеспечивает отличную сыпучесть порошка. Поэтому обычно используют сферические порошковые частицы размером от 40 нм до 105 нм, производимые методами атомизации или вращения. Важно минимизировать наличие мелких частиц размером менее 40 нм и сателлитов (мелких частиц, присоединяющихся к обычным порошковым частицам), поскольку они значительно снижают электропроводность и текучесть порошка.

### **1.3 Инструментальные стали в аддитивном производстве и наплавке**

На сегодняшний день производство инструмента и деталей из инструментальной стали имеет широкий охват. Это связано с удобством воспроизводить различные геометрические исполнения без форм для литья, что важно при создании мелкосерийного инструмента; скоростью печати и качеством получаемой структуры. Можно сказать, что вместо разработки технологического процесса изготовления инструмента или сложного нанесения режущей части на подложку достаточно освоить технологию селективного плавления и в кратчайшие сроки с минимальными затратами моделировать и изготавливать необходимые элементы.

Если в производстве новых единиц и восстановлении режущей части все понятно, то нанесение покрытия из инструментальной стали для увеличения износостойкости поверхностей трения изучено слабо. Наиболее подходящие темы связаны с нанесением инструментальных сталей и исследованием их свойств приведены в этом подразделе.

#### **1.3.1 Свойства, микроструктура и влияние последующей термообработки изделий полученных лазерным селективным плавлением инструментальных сталей, и его современное состояние на примере стали H13 (Китай)**

H13 - одна из наиболее широко используемых инструментальных сталей для горячей обработки (ближайший аналог 4X5MФ1С), обладающая превосходной прочностью при высоких температурах, стойкостью к термическим ударам и термоусталостной стойкостью [34]. Аддитивное производство для данных сталей позволяет проектировать и изготавливать штампы для горячей обработки с каналами охлаждения, что повышает эффективность охлаждения и ускоряет рабочий цикл таких процессов, как

литье под давлением, литье под давлением и ковка. Поэтому в последние годы все больший интерес вызывают детали H13, обработанные аддитивными методами, используемые в промышленных штампах.

Обычно H13 используется в закаленном и отпущенном состоянии с микроструктурой пластинчатой мартенситной матрицы и выделениями вторичными карбидами. Микроструктура H13, изготовленного аддитивными методами, в значительной степени отличается от литых деталей. Взяв в качестве примера селективное лазерное плавление, микроструктура H13 обычно состоит из чередующихся полос мартенсита и закаленного мартенсита, ровно стоящих перпендикулярно направлению формирования. Это происходит из-за эффектов переплава и повторного нагрева лазерного луча при наплавке соседних слоёв [35]. Кроме того, в H13 была обнаружена уникальная ячеистая структура с большим количеством (до 25 %) остаточного аустенита из-за чрезвычайно высокой скорости охлаждения во время обработки.

С точки зрения механических свойств H13 обладает равной или превосходящей прочностью по сравнению с коваными аналогами и демонстрирует анизотропию свойств при растяжении в разных плоскостях .

Для штампов с горячей обработкой термические свойства материала также имеют большое значение, такие как эффективность охлаждения и термическая стабильность матрицы. Однако термические свойства закаленных инструментальных сталей до сих пор изучены недостаточно хорошо. Для данного сплава, такого как сталь H13, теплопроводность сильно зависит от микроструктуры, а микроструктура дополнительно определяется способом обработки.

Как было указано выше, селективная лазерная плавка приводит к микроструктурам H13, которые кардинально отличаются от тех, которые обрабатываются обычными методами. Более того, последующая термическая обработка дополнительно изменяет микроструктуру в готовом виде и, следовательно, теплопроводность. Об этих эффектах свидетельствуют отчеты

о термических свойствах алюминиевых сплавов SLM, сплавов на основе меди и суперсплавов на основе Ni [36]. Однако мало что известно о теплопроводности H13.

В данных исследованиях описаны влияния селективной лазерной плавки на термические и механические свойства полученных образцов; исследования связывают теплопроводность инструментальной штамповочной стали H13 с уникальными микроструктурами в наплавленном виде и после термической обработки.

Для работы по изучению свойств H13 стоит отметить использование порошков стали H13 с дисперсностью 15-53 мкм, полученные образцы вырезались на эрозионном станке размерами 10x10x10 мм. Для образцов были применены различные погонные энергии, регулируемые скоростью движения лазера, и последующие две различные термообработки: аустенитизацию при 1020°C в течение 70 мин с последующей закалкой и двойным отпуском при 585°C в течение 2,5 ч и двукратную прямую термическую обработку образцов при 585°C в течение 2,5 ч.

Для полученных образцов средняя пористость, рассчитанная на основе оптических микрофотографий, и относительная плотность приведены на рисунке 1.4.

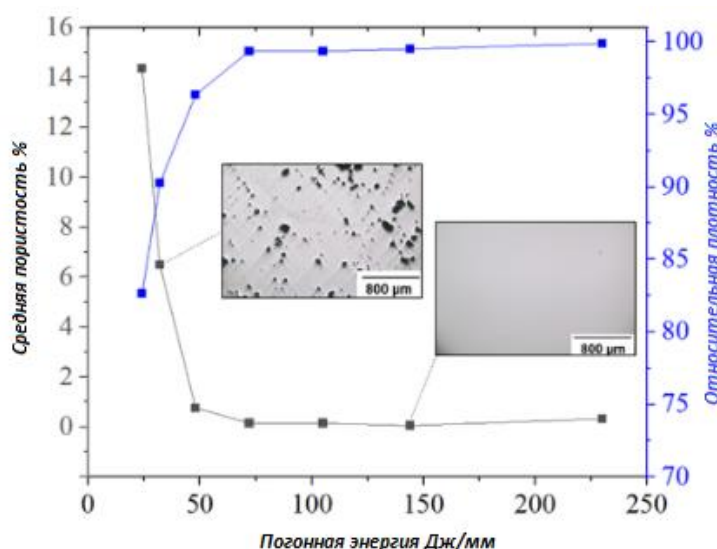


Рисунок 1.4 – Пористость и относительная плотность образцов стали H13, для различных погонных энергий селективной лазерной плавки

Общие тенденции изменения пористости и относительной плотности в зависимости от погонной энергии являются последовательными. Самая низкая погонная энергия в 24 Дж/мм приводит к высокой пористости 14,4 % и низкой относительной плотности 82,6 %, что, скорее всего, связано с отсутствием проплавления. Для образцов погонной энергией выше 48 Дж/мм уровни пористости составляют менее 1 %, а с 105 Дж/мм относительная плотность превышает 99 %.

Оптическая микрофотография для первого типа термической обработки показана на рисунке 1.5, демонстрируя типичную морфологию расплавленных ванн. Межслойные поры, следующие за границами ванны расплава, можно увидеть на примере, обозначенном стрелкой. Чередующиеся полосы светлых и темных областей выявляются травлением, представляя свежий мартенсит и закаленный мартенсит соответственно. Аналогичные полосчатые особенности широко наблюдались в мартенситных сталях, которые являются результатом термических циклов во время аддитивного процесса [37]. Во время обработки затвердевший слой расплавляется и повторно нагревается при сканировании соседних областей и следующих слоев лазерным лучом, что создает собственный эффект термообработки и вызывает размягчение мартенсита и выпадение карбидов.

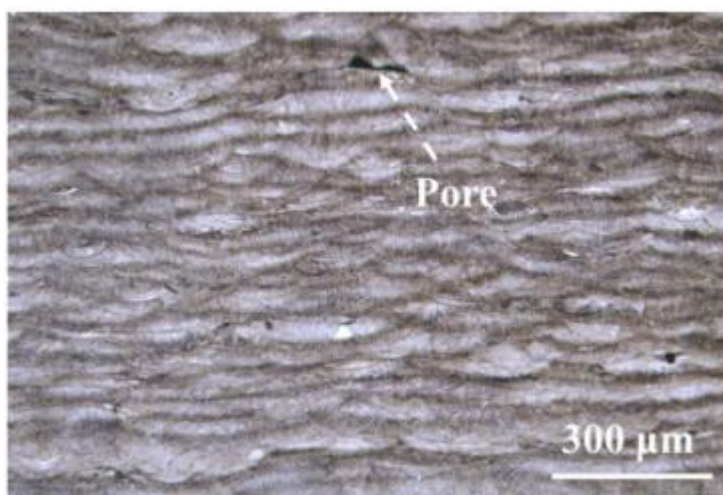


Рисунок 1.5 – Микроструктура полученного по первой схеме термической обработки образца



Микрофотографии растрового электронного микроскопа с использованием сигнала с концентрическим обратным рассеянием показаны на рисунке 1.6 для образцов, изготовленных с различными погонными энергиями для первого метода термической обработки.

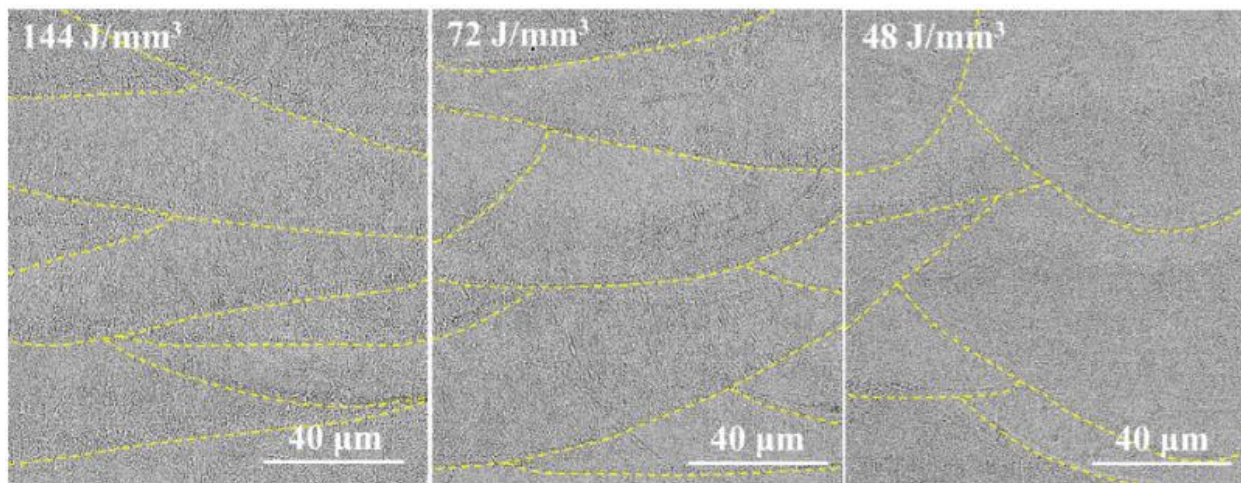


Рисунок 1.6 – Микрофотографии растрового электронного микроскопа для образцов термической обработки первого типа

Общая микроструктура характеризуется равноосной и столбчатой морфологией, при этом размер зерна и ширина столбчатых зерен находятся на микронном уровне. равноосные области расположены на дне слоёв расплава в результате большего градиента температуры во время затвердевания; в то время как столбчатые области находятся в верхней части бассейнов расплава, где температурный градиент относительно меньше. Такая равноосно-столбчатая структура уникальна для штампованных мартенситных сталей и является результатом общей высокой скорости охлаждения. Сравнивая микроструктуры образцов, обработанных различными скоростями видно, что количество областей со столбчатыми структурами становится меньше по мере уменьшения погонной энергии. При заданной мощности лазера более высокая скорость плавки, т.е. более низкая погонная энергия, приводит к более быстрому затвердеванию и охлаждению и, следовательно, к более тонкой микроструктуре.

Так же можно рассмотреть микроструктуры образцов после термической обработки, представленные на рисунке 1.7; где DT первый тип термической обработки, а QT – второй.

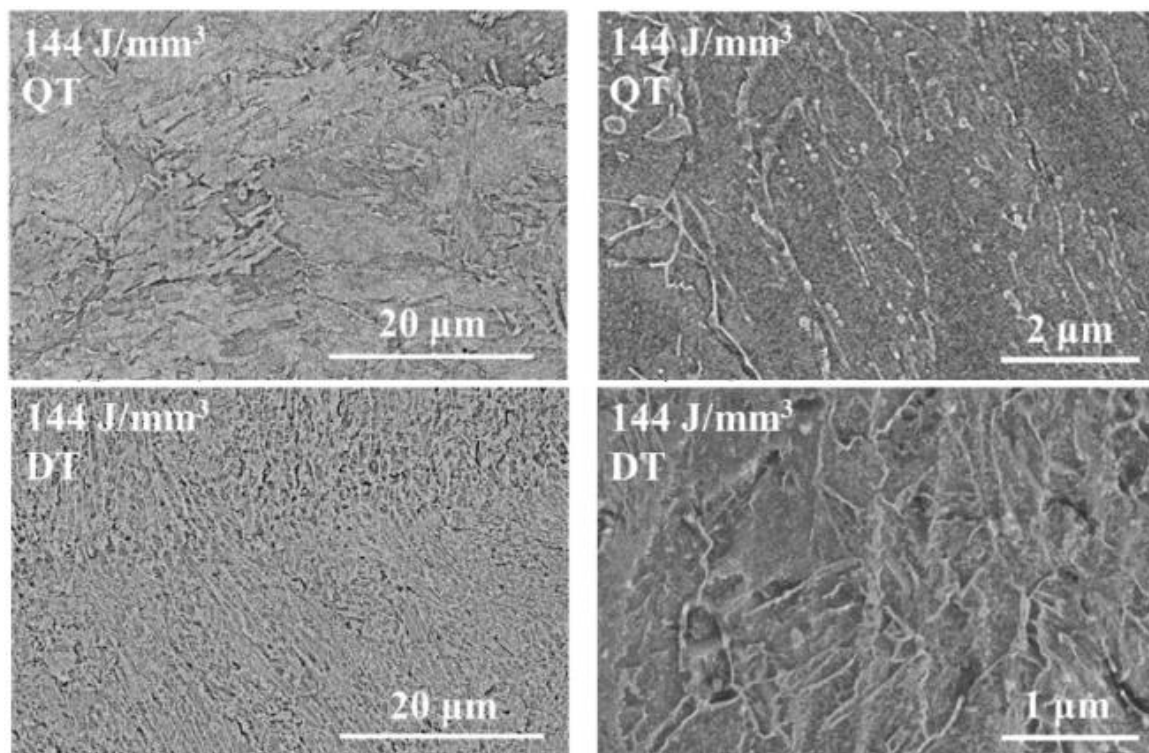
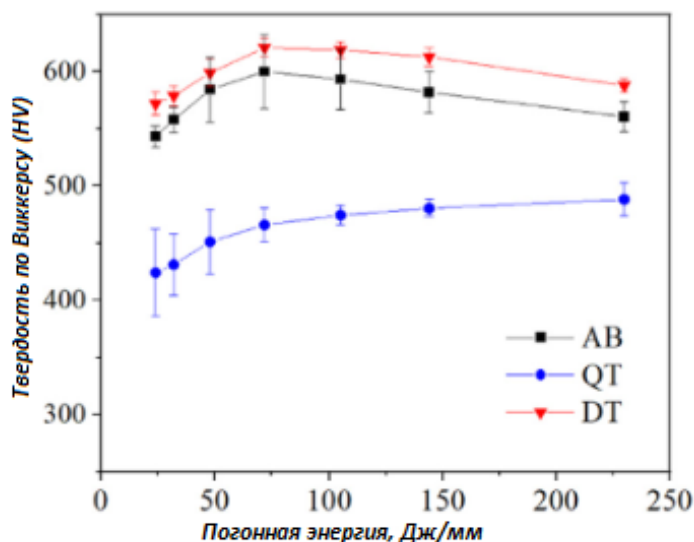


Рисунок 1.7 – Микроструктуры после термической обработки

Состояние QT демонстрирует мартенситную микроструктуру, которая напоминает традиционно обработанный H13, и признаки аддитивной обработки, такие как бассейны расплава и ячеисто-столбчатые структуры, исчезли. Во время QT повторная аустенитизация при 1020°C в течение 70 мин в значительной степени удалила уникальную микроструктуру. Зерна аустенита размером более 10 мкм образовались во время реаустенитизации, и предшествующую границу зерен аустенита все еще можно идентифицировать. Напротив, во время DT, без повторной аустенитизации, отпуск при 585°C существенно не изменил микроструктуру. На микроструктуре DT все еще видны лужи расплава и следы ячеисто-столбчатых структур. Эти эффекты схожи с влиянием последующих слоёв на предыдущие.

Исследование микротвердости по Виккерсу представлены на рисунке 1.8 для образцов без термообработки демонстрирует сначала

тенденцию к увеличению, а затем к уменьшению по мере увеличения погонной энергии. Более низкая твердость при очень низких погонных энергиях (24 и 48 Дж/мм), вероятно, обусловлена высокой пористостью, а снижение твердости при 72 Дж/мм, вероятно, связано с особенностями микроструктуры.



АВ – без термообработки, DT – первый метод, QT – второй метод  
Рисунок 1.8 – Средняя твёрдость от погонной энергии для разных образцов,

Сравнивая твердость в условиях АВ, QT и DT, обработка QT значительно снижает значения твердости по сравнению с состоянием АВ, в то время как DT умеренно увеличивает твердость и поддерживает тенденцию к твердости в состоянии АВ с различными сортами. Более низкая твердость образца QT, вероятно, объясняется тем, что при аустенитизации при 1020 °С мелкая ячеисто-столбчатая микроструктура полностью удаляется и образуются крупные зерна аустенита, что приводит к относительно грубой мартенситной микроструктуре после охлаждения; в то время как образец DT имеет более высокую твердость, поскольку сохраняет мелкую мартенситную микроструктуру. Во время отпуска размягчение мартенсита и вторичное упрочнение в результате осаждения карбида происходят одновременно, и механические свойства при термической обработке являются результатом этих двух конкурирующих процессов.

Испытания на растяжение приведены авторами для образцов без термической обработки с разной погонной энергией (рисунок 1.9) и различными термическими обработками с заданной погонной энергией (рисунок 1.10).

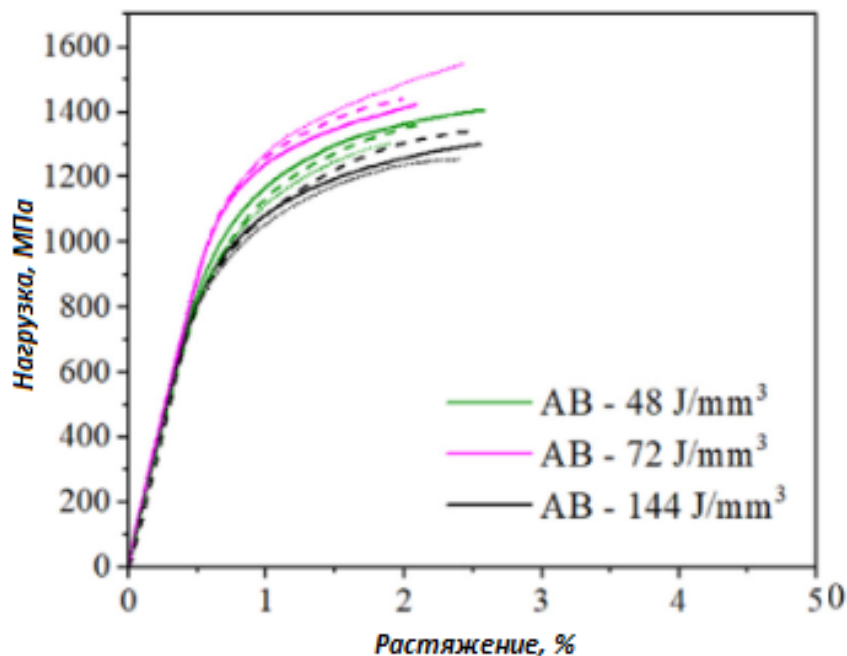


Рисунок 1.9 – Испытания образцов Н13 для разных погонных энергий

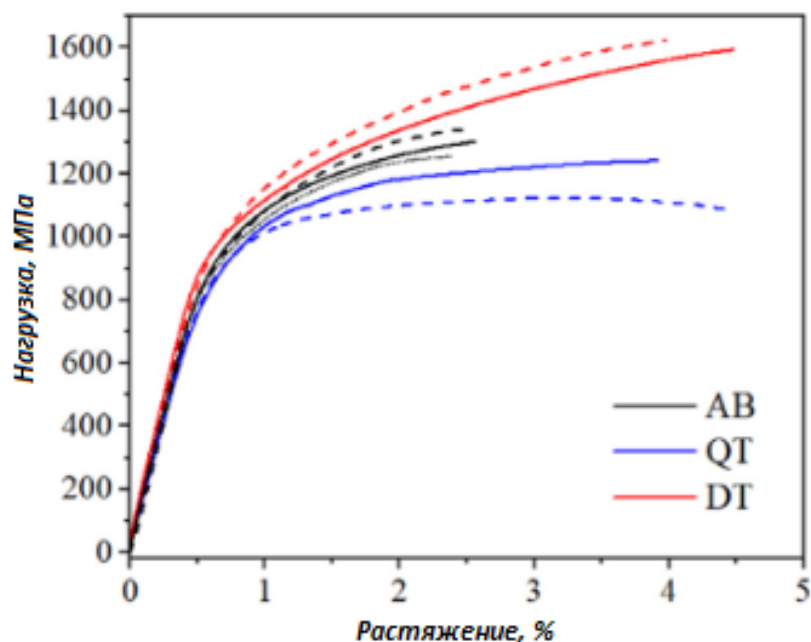


Рисунок 1.10 – Испытания образцов Н13 для разных термических обработок

С увеличением погонной энергии прочность сначала увеличивается, а затем уменьшается. Что касается эффекта термической обработки, то по сравнению с состоянием АВ, обработка QT приводит к незначительному снижению прочности, в то время как DT увеличивает прочность.

Как QT, так и DT увеличивают деформацию при переломе. Результаты испытаний на растяжение обычно совпадают с результатами определения твердости.

Фрактограммы образцов при растяжении показаны на рисунке 1.11. Для образца, изготовленного с низкой погонной энергией (а), на поверхности разрушения, выделенной кружками, можно увидеть большое количество нерасплавленных областей. Образцы, изготовленные средними и высокими погонными энергиями (b,c), содержат не так много расплавленного порошка, но имеют вторичные трещины вдоль границ бассейна расплава, как указано стрелками. Из рисунка 1.11 (d, e) видно, что вторичные трещины все еще присутствуют в образцах QT и DT. Хотя обработка QT, по существу, удаляет структуру расплава, она не устраняет дефекты на границах расплава, и, таким образом, вторичная трещина все еще возникает во время испытания на растяжение.

Таким образом, основываясь на данных о термических и механических свойствах, сравнивающих две стратегии термообработки, можно определить свойства лазерного селективного спекания для инструментальной стали H13: DT предпочтительнее по прочности, но приводит к несколько меньшей теплопроводности. Напротив, QT приводит к меньшей прочности, но большей теплопроводности, что указывает на необходимость компромисса между прочностью и теплопроводностью при выборе стратегии термообработки. Что касается теплопроводности, то влияние погонной энергии сильно только в диапазоне низких значений, когда доминирует влияние пористости, и незначительно в диапазоне высоких значений погонной энергии, когда получаются в целом плотные материалы.

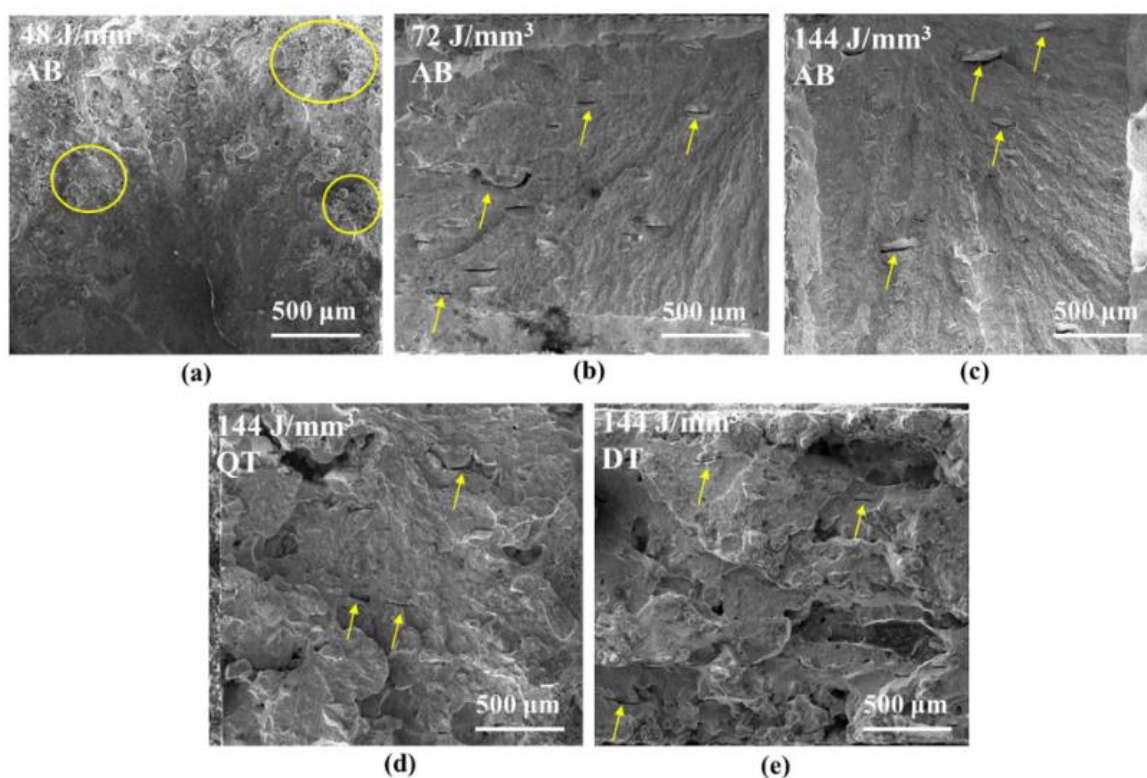


Рисунок 1.11 – Фрактограммы разорванных образцов полученных при растяжении

### 1.3.2 Использование порошков инструментальных сталей с технологией лазерного покрытия в качестве износостойкого слоя

Наиболее популярным и зарекомендовавшим себя порошком для наплавки поверхностных слоёв является порошок стали 10P6M5. Схожий состав имеют аналоги 10P6M5, такие как сталь M2 и быстрорежущая сталь HSS. Однако сталь HSS (Германия) имеет более обширное обозначение и может иметь разный химический состав, поэтому в ходе литературного обзора это было учтено.

Детали HSS обладают превосходным механическим свойствам, демонстрирующим превосходное сочетание прочности, твердости, износостойкости и коррозионной стойкости по сравнению с обычными сортами валков [38]. HSS – это сложные легированные стали, содержащие карбидообразующие элементы, такие как ванадий, вольфрам, молибден и



хром, причем процентное содержание легирующих элементов обычно колеблется в пределах 10-25 %. Детали из HSS обычно изготавливаются литейным способом. Микроструктура таких литых деталей состоит из мартенситной матрицы и разупорядочено распределенных карбидов с более крупными границами зерен (типа  $M_3C$  и  $M_6C$ ) с размером зерен в диапазоне от 20 до 200 мкм.

В процессе работы деталей и инструмента абразивный износ вызывается твердыми оксидными частицами, образующимися в связи с высоким разогревом, которые тверже материала HSS. Чтобы противостоять износу, необходимо повысить твердость мартенситной матрицы и увеличить количество твердых и износостойких карбидов.

В работе [39] рекомендует использовать процессы порошковой металлургии для улучшения микроструктуры. Усовершенствование микроструктуры улучшит термомеханическую усталость и износостойкость рабочих поверхностей, в том числе и при больших температурах. В большинстве исследований усовершенствование микроструктуры может быть достигнуто путем нанесения покрытия с помощью лазера благодаря относительно высоким скоростям охлаждения.

Процесс лазерной наплавки – это технология производства, которая использует поглощенную лазерную энергию в качестве источника тепла для нанесения слоев с улучшенными свойствами на подложку. Во время лазерной наплавки мощный лазерный луч сканирует поверхность подложки, создавая ванну расплава, в которую одновременно вводится порошковый материал для получения наплавленного слоя после затвердевания.

Лазерную наплавку характеризуют как преимущественно лучшую по сравнению с традиционными технологиями благодаря высокому контролю подводимого тепла, ограниченной зоне термического воздействия, минимальным перемешиванием порошкового материала с подложкой.

На данный момент произведены значительные работы по изучению влияния микроструктуры на износостойкость сплавов HSS [21, 22]. При более

высокой твердости (>700 HV) стойкость HSS к абразивному износу в основном зависит от количества, морфологии и распределения карбидов VC.

В работе [39] отлично описано исследование механизмов изнашивания, задействованных при горячей прокатке для четырех марок проката HSS, полученных обычным литьем (одна марка) и дополнительным производством (три марки). Исследование проводилось на двух температурах испытания 25 °С и 500 °С, что представляют собой типичные температуры, при которых рабочий инструмент эксплуатируется. Исследовано влияние улучшения микроструктуры, количества карбида, типа и морфологии на трение и износ.

Типичный состав для литого сплава HSS и наиболее популярные порошки для наплавки, использующиеся в работе приведены в таблице 1.1. Порошки для наплавки подбираются путем варьирования количества карбидообразующих элементов V, W и Mo (LC1, LC2 и LC3). Среди сплавов HSS для лазерной наплавки LC2 также содержит Co (3,0–5,0 %), который был добавлен для повышения твердости при повышенных температурах.

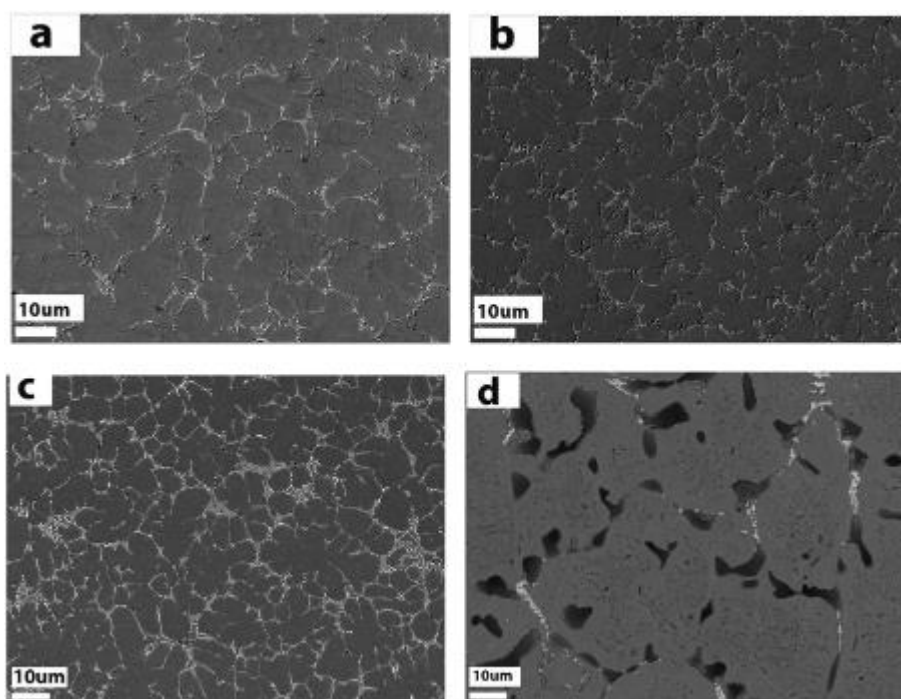
Таблица 1.1 – Химический состав литого сплава и порошков HSS, %

Материал	C	Cr	Mo	W	Co	V	Fe
LC1	1.3	4.3	4.6	5.6	–	4-5	ост.
LC2	1.3	4.3	4.6	5.6	3-5	3-5	ост.
LC3	1.3	4.2	5-6	6-7	–	3-4	ост.
Литой сплав	1.6-2	4.5	5	–	–	4-6	ост.

LC3 содержит большее количество Mo и W, но меньшее количество V по сравнению с LC1 для достижения большего процента карбидов M<sub>2</sub>C. Среди сплавов HSS литой сплав HSS содержит наибольшее количество углерода (1,6–2,0 %), но не содержит W. Литой сплав HSS подвергали двойному отпуску при 520 °С в течение 2 часов и охлаждали на воздухе для осаждения вторичных карбидов, в то время как сплавы HSS, покрытые лазером, испытывались без термической обработки.

Микроструктура покрытых лазером и литых сплавов HSS показана на микрофотографиях с обратным рассеянием электронов (рисунок 1.12).





a – LC1, b – LC2, c – LC3, d – литой сплав

Рисунок 1.12 – Микроструктура сплавов HSS

Микроструктура литейного сплава HSS в основном состоит из первичных карбидов  $MC$  и эвтектики  $M_6C$  наряду с темными вторичными осадками карбидов, обогащенных ванадием. Для сплавов HSS, покрытых лазером, микроструктура с высокой степенью измельчения состоит из непрерывной сетки тонких эвтектических карбидов  $MC$  ( $VC$ ) и  $M_2C$ . Матрица состоит из мартенсита и восстановленного аустенита. Мартенситная матрица обогащена карбидами  $M_7C_3$  и  $M_{23}C_6$  наряду с вторичными осадками сложных карбидов.

Кроме того, LC2 содержит 3-5 % кобальта, распределенного внутри матрицы. Добавление кобальта придает матрице прочность при высокой температуре. Микрофотография растрового электронного микроскопа показывают типичный размер, морфологию и элементный анализ различных карбидов, присутствующих в покрытых лазером сплавах HSS и его обратное рассеивание электронов показано на рисунке 1.13.

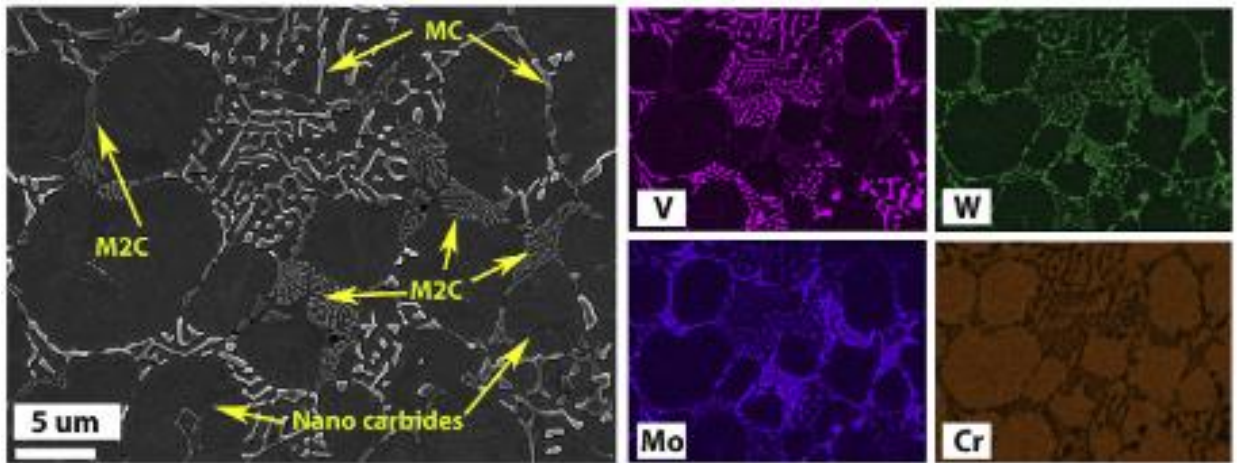


Рисунок 1.13 – Растровое электронное изображение и обратное рассеивание электронов для стали HSS

Обнаружено, что карбиды MC (VC) имеют блочную, круглую и стержнеобразную форму и обогащены V. В то время как карбиды  $M_2C$  имеют кожистую, пластинчатую и слоистую морфологию и обогащены Mo. Во время лазерной наплавки толстых покрытий повторный нагрев промежуточных слоев привел к отпуску существующего пластинчатого мартенсита и превращению оставшегося аустенита в мартенсит. Этот процесс повторного нагрева также влияет на количество вторичных осадков, переходящих из одного слоя в другой. Процентное содержание карбидов, присутствующих в сплавах HSS, приведено в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Фазовый состав стали HSS, %

Материал	Мартенсит	MC	$M_2C$	$M_6C$	$M_7C_3$ и $M_{23}C_6$	$M_3C$
LC1	75	11	8	–	6	–
LC2	72-75	10	8	–	4	–
LC3	70	10	14	–	6	–
Литой сплав	82	12	–	4	1	1

Представленные измерения микротвердости (HV 0,5) покрытых лазером сплавов HSS нанесены на графике по высоте покрытия (рисунок 1.14).

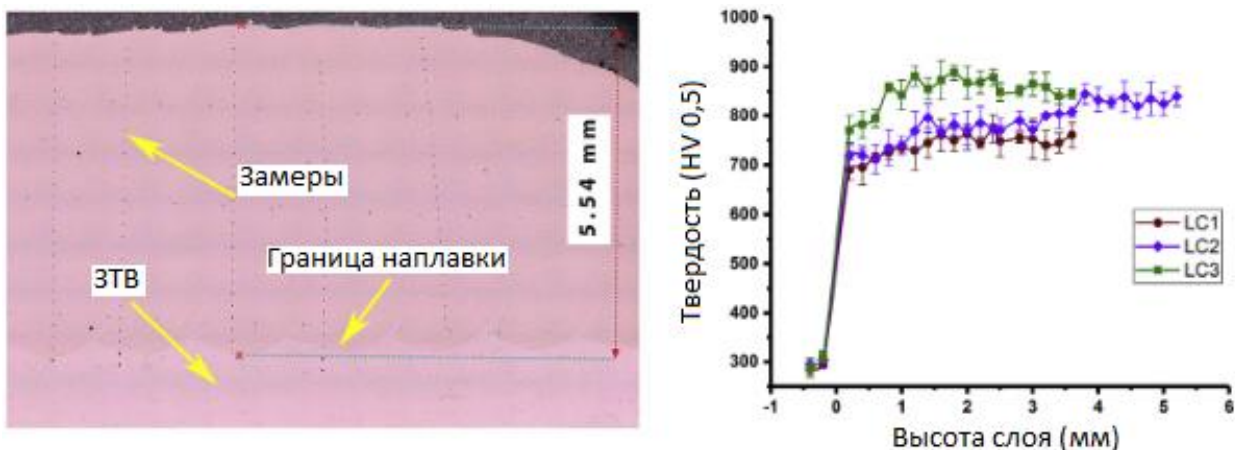


Рисунок 1.14 – Микротвердость наплавков

Микротвердость литого HSS оптимизирована до  $660 \pm 10$  HV путем двойного отпуска при  $520^\circ\text{C}$  с последующим воздушным охлаждением. Это способствовало осаждению мелких вторичных карбидов в матрице и повышало однородность материала за счет превращения остаточного аустенита в мартенсит.

Сигналы коэффициента трения, зафиксированные в данной работе, были проанализированы при  $25^\circ\text{C}$  и  $500^\circ\text{C}$  для литых и покрытых лазером сплавов HSS; они показаны на рисунке 1.15. При  $25^\circ\text{C}$  средний коэффициент трения литого HSS немного выше (0,6) по сравнению со сплавами HSS с лазерным покрытием (0,5–0,55).

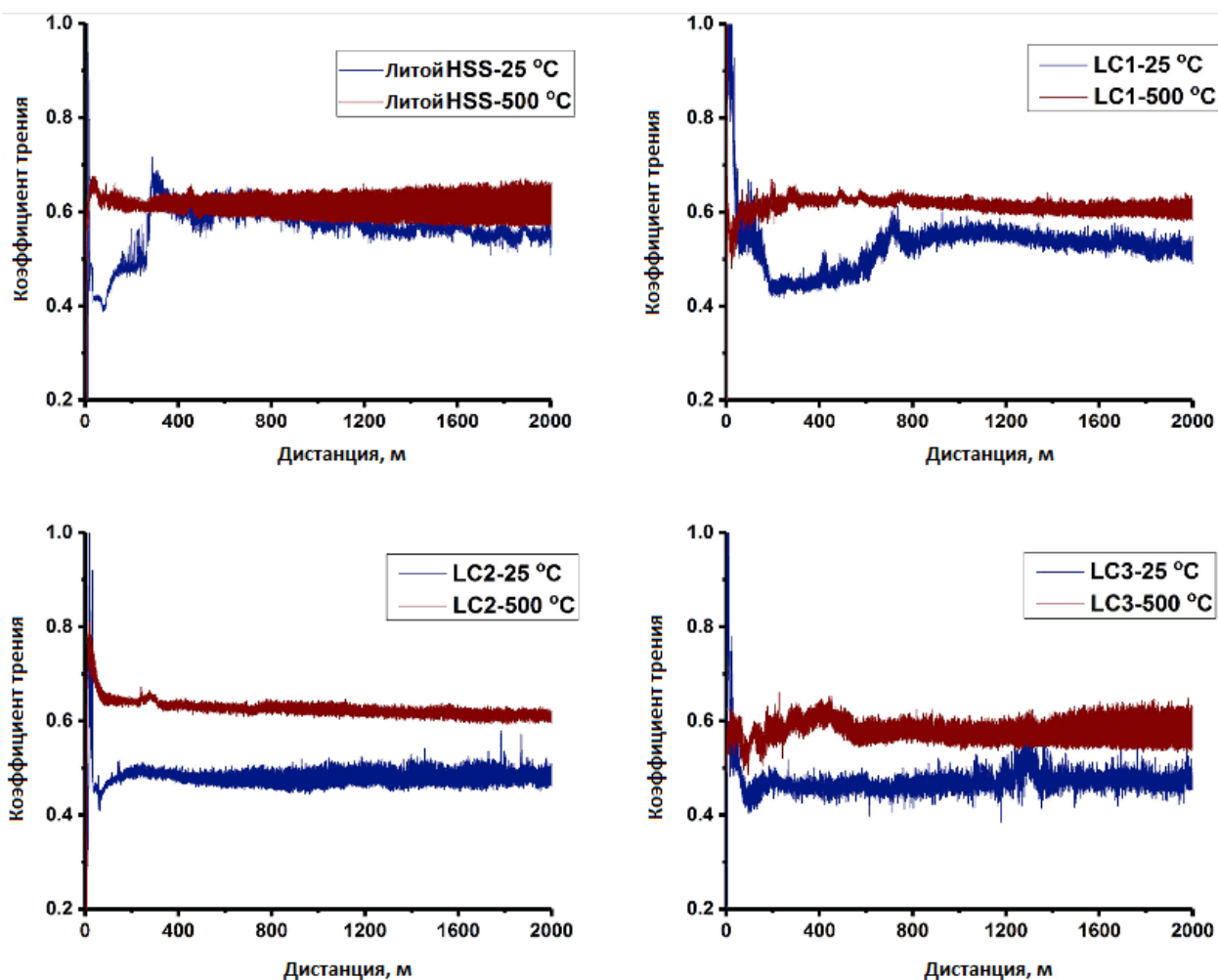


Рисунок 1.15 – Графики зависимости коэффициента трения от пройденной дистанции для разных образцов

Так как данный сплав является износостойким и применяется в том числе и для наплавки поверхностей трения данный параметр является одним из определяющих. Анализ сигналов трения показывает приработку для обоих видов сплавов HSS. Этот процесс представляет собой начальный контакт металл-металл перед стабилизацией, когда происходит образование промежуточного слоя на поверхности трения из-за переноса материала с диска, состоящего из металлических и оксидных остатков (рисунок 1.16). Среди образцов с лазерным покрытием LC2 и LC3 показали стабилизацию сигналов трения в первые 200 м; однако LC1 стабилизировался около 600 м, что можно объяснить количеством остатков оксида металла, образующих межфазный слой.

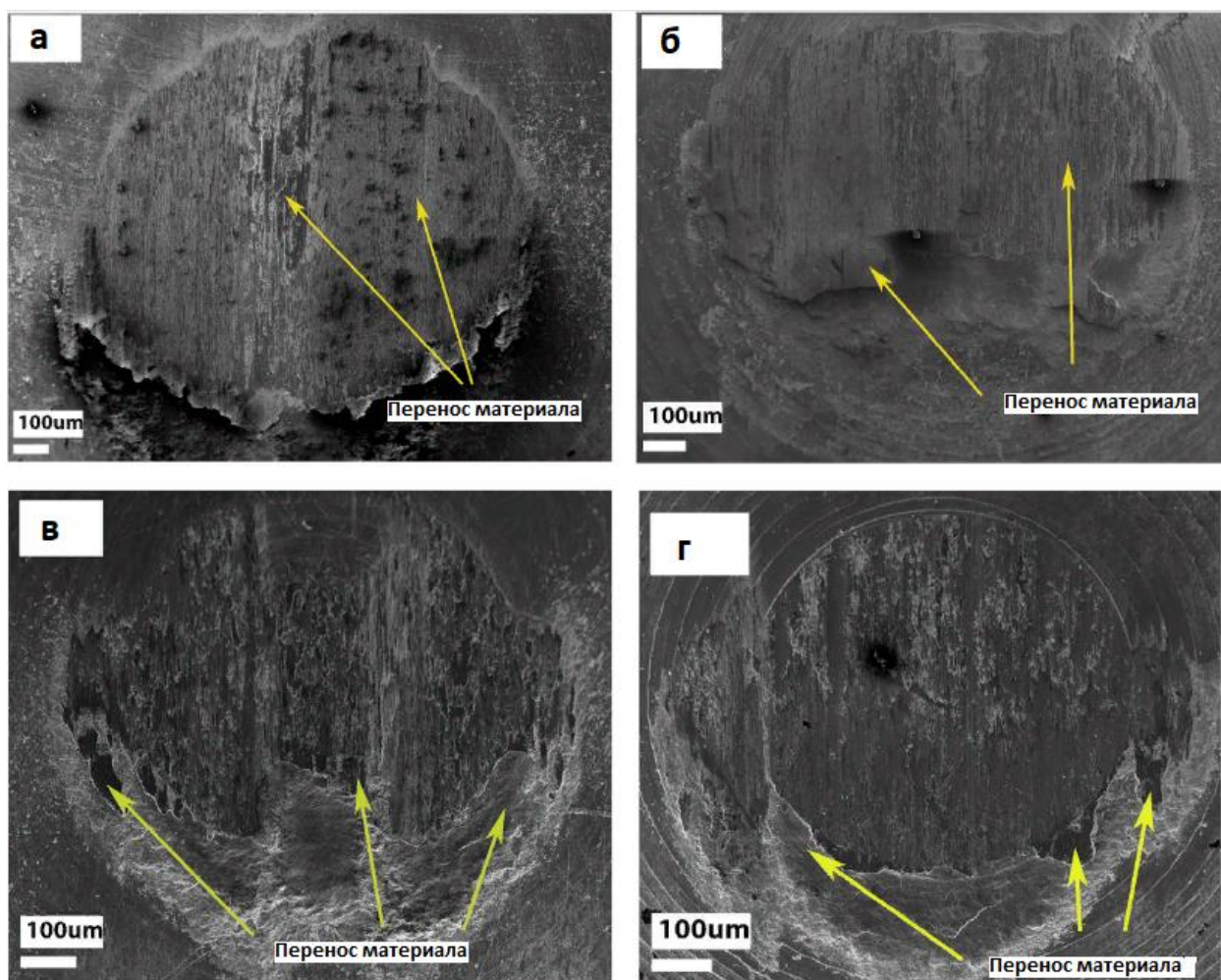


Рисунок 1.16 – Микрофотографии переноса металла с диска на поверхность образцов при 25 °С, а – литой HSS, б – LC1, в – LC2, г – LC3

При температуре 500 °С все четыре сплава HSS демонстрировали стабильное поведение при трении со средним значением 0,6, хотя литые HSS и LC3 со временем демонстрировали увеличение разброса показания в сигналах трения. В экспериментах, проведенных при температуре 500 °С, штифт соприкасался с предварительно окисленной поверхностью диска, нагретой до 500 °С, и сразу же начиналось скольжение. Во время экспериментов наблюдался короткий период приработки как для литых, так и для покрытых лазером сплавов HSS. Период приработки был короче для литого сплава HSS и LC2. Микрофотографии изношенной поверхности представленная на рисунке 1.17.



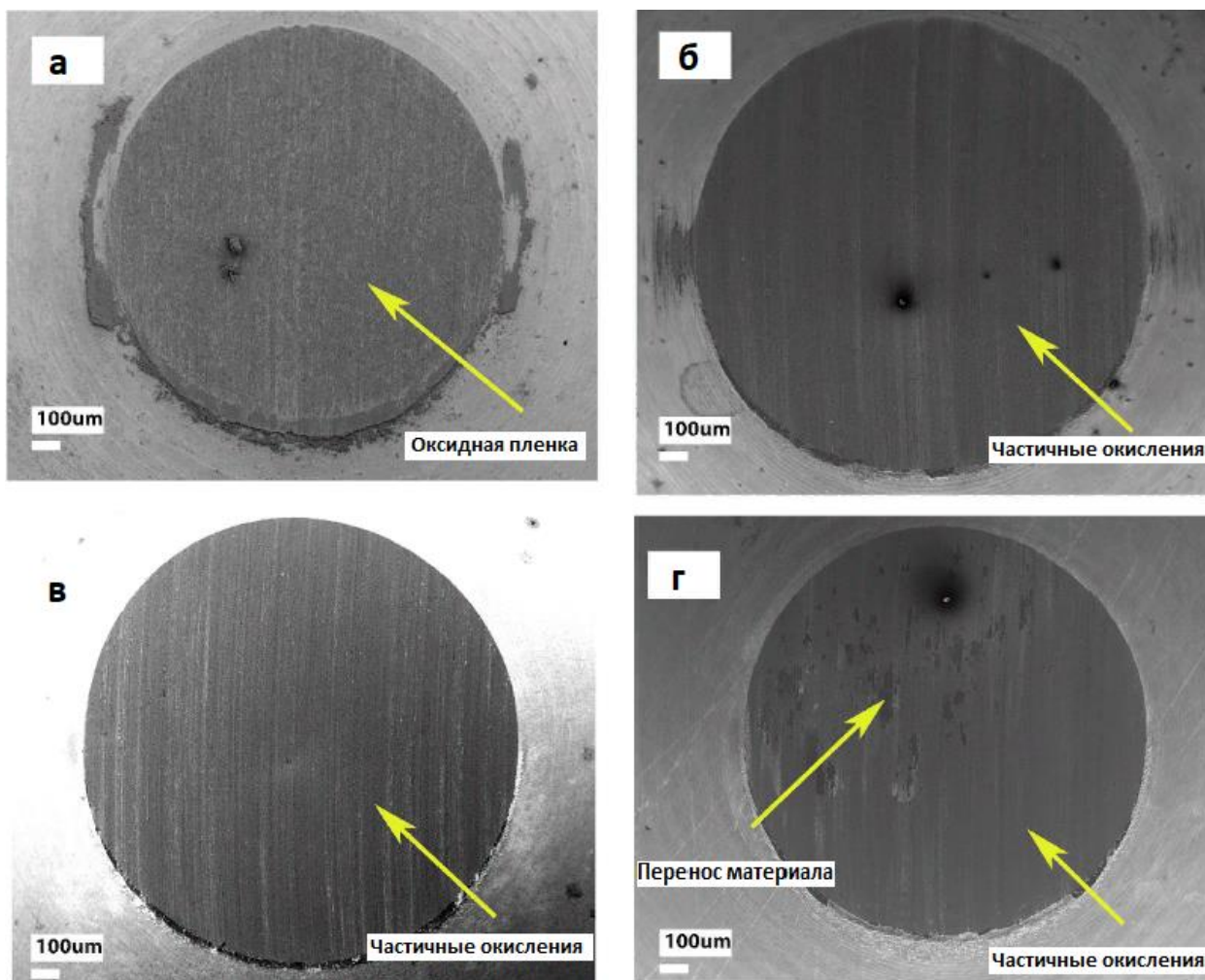


Рисунок 1.17 – Микрофотографии переноса металла с диска на поверхность образцов при 500 °С, а – литой HSS, б – LC1, в – LC2, г – LC3

Микрофотографии SEM показывают, что для литого HSS, кроме карбидов, матрица была полностью окислена. Но для сплавов HSS с лазерным покрытием наблюдалось частичное неоднородное окисление по изношенной поверхности.

Эти сравнения хорошо показывают влияния металлургических свойств и рабочих условий на характер износа поверхности. Определяя эти данные можно прогнозировать скорость износа.

Образец литого сплава HSS при 25 °С показал более высокую скорость износа по сравнению со сплавами HSS с лазерным покрытием (рисунок 1.18). Более тонкая микроструктура сплавов HSS с лазерным покрытием придавала матрице прочность для сопротивления

абразивному износу (истиранию третьего тела), который был доминирующим при комнатной температуре.

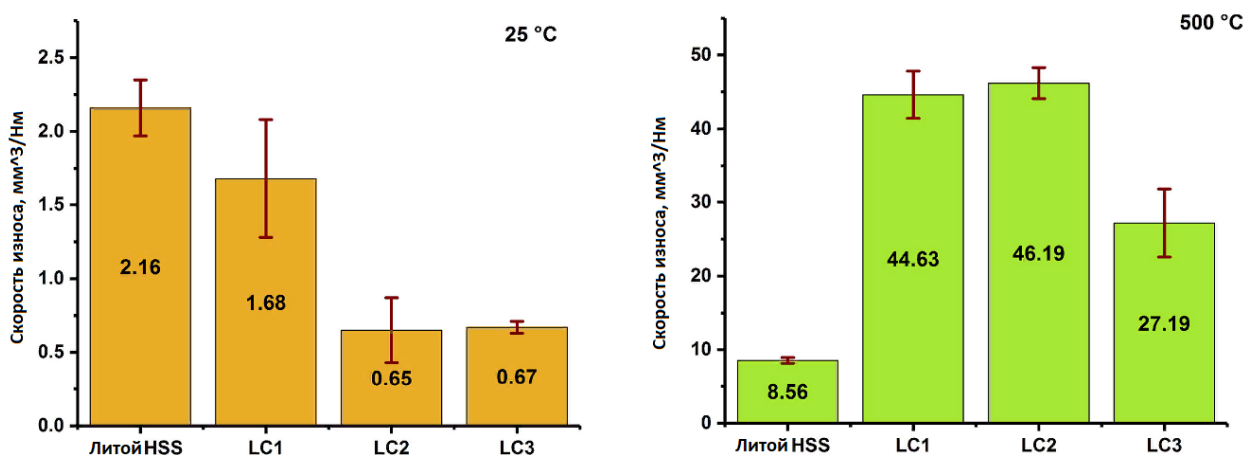


Рисунок 1.18 – Скорость износа образцов стали HSS при разных температурных режимах

Наибольшая скорость износа литых сплавов HSS и более низкие значения для сплавов HSS с лазерным покрытием связаны с самой низкой и самой высокой твердостью соответственно. Более твердые сплавы HSS непрерывно истирали поверхность диска из низкоуглеродистой стали, что приводило к адгезионному износу из-за переноса и соединения частиц износа на поверхность штифта как было показано ранее.

Испытания на износ, проведенные при температуре 500 °C, показали, что износ вызван окислами, которые образовались в контактной области. В процессе износа образуются абразивные частицы в виде комбинации оксидных и карбидных частиц, которые изнашивают матрицу. Поскольку литой HSS образовывал более стабильный и однородный защитный оксидный слой при этой температуре, что отчетливо видно на микроструктуре рисунок 1.16; литой сплав HSS показал меньшие потери на износ, чем образцы HSS, покрытые лазером. В литом HSS образуются более грубые карбиды MC, благодаря их высокой твердости и превосходной связи с матрицей образцы выдержали нагрузку во время испытания. Во время этого процесса карбиды

подверглись растрескиванию, но это помогло матрице окислиться, чтобы противостоять износу, это хорошо наблюдается на рисунке 1.19.

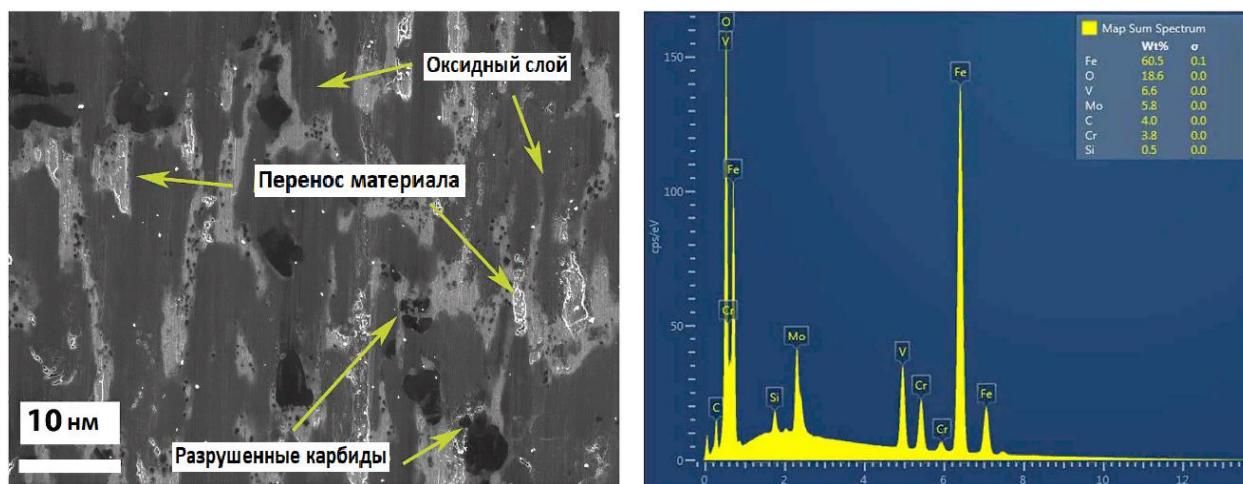


Рисунок 1.19 – Изношенная поверхность литого HSS, показывающая разрушение карбида MC при 500 ° C, со спектром EDS, показывающим окисление поверхности (содержание кислорода 19%)

Карбиды MC очень склонны к окислению, но из-за их несущей способности окисления этих карбидов не наблюдалось. Кроме того, матрица из литого сплава HSS была также защищена стабильной пленкой окисла железа ( $Fe_2O_3$ ), образовавшейся в то время, как карбиды MC несли нагрузку. Сплавы HSS, покрытые лазером при температуре 500 °C, показали частичное и неоднородное окисление, что привело к непрерывному износу мартенситной матрицы. Мелкие угловатые карбиды MC и прерывистая сеть карбидов MC/M<sub>2</sub>C легко удаляются из-за плохого крепления (рисунок 1.19). Это привело к увеличению количества частиц износа, что еще больше облегчило истирание двух и трех корпусов. Хотя LC2 показал наиболее стабильное поведение при трении, но присутствие Co (3-5 %) не привело к существенной разнице в характеристиках износа LC2. Среди сплавов HSS с лазерным покрытием LC3 показал наименьший износ, это связано с большей объемной долей карбида (30-35%), способствующей более высокой средней твердости.

Таким образом можно сказать, что природа изготовления одного и того же сплава HSS характеризует полученные структуры как явно отличающиеся,



особенно в различных условиях работы. При этом многих работ по данным сплавам вообще не было произведено; наилучшие результаты при этом могут дать способы с лучшими металлургическими свойствами, такие как электронно-лучевая, аргонодуговая и прочие.

#### **1.4 Характеристика видов износа**

В зависимости от физических свойств процесса изнашивания можно выделить два основных класса: механическое изнашивание и механохимическое изнашивание. Внутри этих классов можно различать изнашивание при трении скольжения, изнашивание при трении качения, изнашивание при ударе и изнашивание в потоке газа или воздуха. Существует классификация изнашивания по разным принципам, таким как вид среды и условия работы пар трения. Например, выделяют механическое изнашивание, абразивное изнашивание, высокотемпературное окислительное изнашивание, изнашивание под воздействием скоростных струй жидкости и другие [39].

По механизму разрушения поверхностей, которые соприкасаются и изнашиваются друг с другом, можно выделить следующие виды изнашивания: 1) адгезионное изнашивание; 2) абразивное изнашивание; 3) изнашивание при резании (задира, царапании); 4) коррозионное изнашивание; 5) изнашивание в результате поверхностной усталости; 6) ударное изнашивание; 7) кавитационно-эрозионное изнашивание.

Адгезионное изнашивание происходит, когда поверхности металла соприкасаются под действием нагрузки. Реальные поверхности металла обычно имеют неровности и микровыступы, поэтому контакт происходит только в небольших точках выступающих поверхностей. При трении этих поверхностей под нагрузкой происходит пластическая деформация металла в точках контакта, что приводит к сближению поверхностей и активации сил сцепления между атомами металлов на ограниченных участках. Таким образом, возникает адгезия, которая в конечном счете приводит к разрушению

участков сцепления, сопровождающемуся задирами и истиранием менее твердого металла. При соприкосновении металла с пластмассой адгезионное изнашивание полностью отсутствует.

Абразивное изнашивание происходит, когда между трениями поверхностями попадают твердые частицы (продукты износа), которые вызывают истирание поверхностей путем резания или царапания. Для предотвращения абразивного изнашивания необходимо защитить металлические поверхности от попадания абразивных частиц. Обычно считается, что использование материала с высокой твердостью предпочтительно для снижения этого вида изнашивания. Абразивное изнашивание мягких и твердых поверхностей имеет свои особенности. Например, при трении между металлическими поверхностями низкой твердости абразивные частицы встраиваются в металл, в то время как на поверхностях с высокой твердостью они оставляют царапины, делая абразивное изнашивание схожим с процессом задирирования.

Изнашивание при резании (задирирование, царапание) происходит, когда выступающие части поверхности металла высокой твердости вызывают пластическое смещение и местное удаление (микрорезание) поверхностного слоя металла с низкой твердостью при трении. Этот вид изнашивания, подобно абразивному изнашиванию, приводит к образованию задириров и царапин на трениях поверхностях. Однако, при абразивном изнашивании повреждение поверхности вызывается внешними твердыми частицами (песком, стружкой и т.д.), попадающими в зазор между трениями поверхностями, тогда как изнашивание при микрорезании, задирировании и царапании вызывается самими поверхностями трущихся тел. По степени повреждения поверхностей изнашивание при резании может быть в 10 раз более интенсивным, чем изнашивание, вызванное абразивными частицами.

Коррозионное изнашивание происходит, когда детали находятся в агрессивных средах, что способствует ускоренному износу. В условиях трения, которое обеспечивает очистку поверхности от образующихся

продуктов коррозии, коррозия прогрессирует быстрее. Например, сера, содержащаяся в дизельном топливе, и конденсирующаяся влага на стенках дизельных цилиндров, способствуют ускоренному износу цилиндров, который развивается в условиях коррозии.

Поверхностная усталость относится к форме износа, которая проявляется в виде чешуйчатых выбоин на рабочей поверхности рельсов при длительном движении по железнодорожным путям. Этот вид износа связан с тем, что при периодическом воздействии сдвиговых напряжений в поверхностном слое возникают локальные разрушения. Такое явление называется поверхностной усталостью.

Ударное изнашивание происходит при продолжительном воздействии ударной нагрузки, которое приводит к пластической деформации поверхностного слоя и образованию мелких обломков металла, отделяющихся от поверхности.

Кавитационно-эрозионное изнашивание происходит при быстром движении металлического изделия внутри жидкости или при скоростном течении жидкости внутри изделия. В результате колебаний давления образуются пузыри, которые ударно воздействуют на металлическую поверхность, создавая значительную циклическую нагрузку. Это давление приводит к износу, который обычно называется кавитационным изнашиванием.

Детали, подвергающиеся изнашиванию, можно разделить на две группы. Первая группа включает детали, которые образуют пары трения, такие как подшипники скольжения и качения, зубчатые передачи и другие. Вторая группа включает детали, изнашивание которых вызывается воздействием рабочей среды, такой как жидкость, газ и тому подобное.

Характерные виды изнашивания для деталей первой группы включают абразивное изнашивание (при наличии твердых частиц, попадающих в зону контакта), адгезионное изнашивание, окислительное изнашивание и усталостное изнашивание.

Для деталей второй группы типичны следующие виды изнашивания: абразивное изнашивание (например, изнашивание почвой), гидро- и газоабразивное изнашивание (при перемешивании твердых частиц с жидкостью или газом), эрозионное изнашивание, гидро- и газоэрозионное изнашивание (при воздействии потока жидкости или газа) и кавитационное изнашивание (при гидравлических ударах жидкости).

### **1.5 Изнашивание поверхностей трения без смазочного материала**

Изнашивание металлов при трении скольжения без смазочного материала является нежелательным явлением с точки зрения конструктора. Поэтому при проектировании машин стараются исключить такие пары трения или, по крайней мере, свести их число к минимуму, если невозможно обеспечить постоянное смазывание.

Наиболее типичной парой трения при изнашивании без смазки является вал-втулка, причем вал обычно обладает более высокой твердостью по сравнению с втулкой. Механизм взаимодействия поверхностей трения является сложным, и в процессе контакта преобладает упруго-вязкий контакт на небольших участках, значительно меньших по размеру, чем номинальная площадь пары трения.

Фактическая площадь контакта в паре трения является переменной величиной, которая резко изменяется со временем. На формирование частиц изнашивания наибольшее влияние оказывают два фактора: напряжения сжатия и сдвига. Напряжение сжатия обусловлено внешней нагрузкой на поверхности трения, а напряжение сдвига возникает из-за относительного перемещения сопряженных поверхностей. Сдвиг является главной причиной формирования сложного рельефа поверхностей трения и непосредственно влияет на тренировочную мощность, выделение тепла, разрушение поверхностей и, в конечном счете, приводит к отделению частиц металла.

Форма этих частиц зависит от множества факторов, специфичных для каждого конкретного случая.

При трении поверхностей с высокой и одинаковой твердостью продукты изнашивания образуются постепенно при разупрочнении приповерхностных слоев и имеют вид серого порошка. При этом рельеф поверхностей достаточно ровный, без явных следов направленной шероховатости. Однако, если взаимодействуют поверхности с разной твердостью и разной номинальной площадью контакта, поверхность с более низкой твердостью будет иметь большую шероховатость. Эта шероховатость стимулирует изнашивание поверхности с более высокой твердостью. Такая взаимосвязь неизбежна, но степень ее развития существенно зависит от контактной нагрузки и скорости скольжения, которые влияют на условия контакта металлических поверхностей, износ и состав продуктов изнашивания.

При трении металла по металлу при больших нагрузках изнашивание происходит за счет образования и разрушения металлических связей. Разрушение структуры металла усиливается наростообразованиями на поверхности контртела.

Определение температуры в зоне трения с учетом повышенного искрообразования в процессе трения, наличие следов оплавления на поверхности образца в виде темно-синего пятна и заусенцев позволяют предположить, что при больших нагрузках в структуре железоуглеродистых сплавов возможно полиморфное превращение.

### **Выводы по первой главе**

Из обзора литературных данных следует, что для решения задач, связанных с упрочнением рабочих поверхностей, в последнее время очень активно используются способы, связанные с применением концентрированных потоков энергии. Значительный прогресс достигнут в технологии наплавки изделий методом вакуумной электронно-лучевой

обработки. Данная технология позволяет организовать микрометаллургический процесс с минимальным воздействием на основной металл, при этом возможно сформировать упрочненный слой, толщина которого регулируется в широких пределах.

Анализ литературных данных свидетельствует, что для обеспечения износостойкости в парах трения необходимо решать задачу рационального выбора материала трущихся пар и способа его обработки.

Аустенитная и аустенитно-мартенситная структуры матрицы в композиционных покрытиях считаются наиболее благоприятными основами для износостойкого материала. При этом в зависимости от условий эксплуатации, общего строения сплава и наличия избыточных фаз в разных случаях предпочтительной может оказаться разная основа. Перспективным материалом для использования в тяжело нагруженных узлах трения является быстрорежущая сталь.

## 2 ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Материал исследования

Технология селективной электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) в вакууме основана на явлении «вмораживания» металлического порошка в жидкометаллическую ванну расплава, создаваемую электронным лучом с линейной разверткой. Наплавляемая деталь перемещается внутри вакуумной камеры относительно неподвижного электронного источника и порошкового дозатора. Для ЭЛН в вакууме (остаточное парциальное давление не более 0,013Па) использовался порошок быстрорежущей стали 10P6M5 дисперсностью 50...350 мкм, полученный распылением расплава в воду, химический состав представлен в таблице 2.1. В качестве основного металла (подложки) использовали пластины из Стали 20 размером 20·300 мм<sup>2</sup> и толщиной 5 мм. Проплавление основного металла фиксируется только в ходе первого прохода электронного луча, и его толщина не превышает 50 мкм. Таблица 2.1 – Номинальный химический состав порошка быстрорежущей стали 10P6M5, %

Основные компоненты							Примеси, не более			
Fe	C	Cr	W	Mo	V	Si	Mn	Ni	S	O
Осн.	1	4	6,5	5	2	<0,5	0,55	0,4	0,03	0,03

Мощность электронного луча с увеличением числа проходов от 1 до 3 уменьшалась от 4050 до 1800 Вт, а далее с ростом числа проходов не изменялась. Более высокая мощность на первых проходах необходима для прогрева подложки. Диаметр электронного луча, длина развертки и скорость движения подложки не изменялись и составили 1 мм, 13 мм и 2,8 мм/с соответственно. Внешний вид полученных пластин после наплавки представлен на рисунке 2.1.

Наплавку проводили на пластины размером 30×250 мм (толщина основного металла (подложки) изменялась от 5 до 40 мм), изготовленные из стали 20. Ширина наплавочной дорожки не превышала 20 мм



Рисунок 2.1 – Внешний вид пластин после селективной электронно-лучевой наплавки в зависимости от числа проходов электронного луча

## 2.2 Методика исследования

В данной работе применялся традиционный способ приготовления микрошлифов, который заключался в механической шлифовке и последующей полировке на алмазных пастах различной дисперсности. Химическое травление покрытий производилось в 4% спиртовом растворе  $\text{HNO}_3$ . Определение количественных характеристик микроструктуры (количества, размеров, формы, распределения различных фаз) проводили линейным методом по широко известной методике А. Розиваля.

Структуру покрытий после наплавки в объеме металла третьего прохода исследовали с помощью оптического микроскопа (ОМ) *Olympus GX 51* снабженного анализатором *SIAMS 700*, сканирующего растрового электронного микроскопа *JEOL 6000* (РЭМ). Микротвердость (HV) покрытий и основного металла непосредственно прилегающей к наплавке (2 мм) измеряли на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76) с шагом по глубине 100 мкм при нагрузке 0,981 Н. Измерения производили в виде двух параллельных дорожек со смещением уколов индентора между дорожками 50 мкм. Расстояние между



дорожками было 200 мкм. Это позволило построить график изменения микротвердости по толщине с шагом 50 мкм.

Исследования фазового состава исходного покрытия в объеме металла третьего прохода проводили с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 в фильтрованном  $\text{Co}_{K\alpha}$ -излучении в интервале углов  $2\theta$  15...120° с шагом 0,05°. Для количественного фазового анализа использовали значения интегральной интенсивности дифракционных линий (111)  $\gamma$ -фазы и (110)  $\alpha$ -фазы.

Микротвердость на поперечных и косых шлифах определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,981 Н с шагом по глубине 100 мкм (ГОСТ 9450-76). Микротвердость была измерена на двух дорожках, что позволило построить зависимость  $H_{\mu} - L$  через 50 мкм, а на косых шлифах – через 10-15 мкм.

### **2.3 Описание установки**

Электронно-лучевая наплавочная установка (ЭЛН) представляет собой автоматизированную систему, работающую в вакууме и управляемую компьютером. Деталь, которую необходимо наплавить, загружается в камеру и закрепляется на манипуляторах, которые обеспечивают её вращение и перемещение с помощью внешнего электропривода. Камера затем откачивается вакуумной станцией до достижения рабочего давления в пределах 1-10 Па.

С помощью электронной пушки (позиция 2) формируется сканирующий электронный луч, который попадает на поверхность детали и создаёт зону расплава. Порошковый материал для наплавки поступает в эту зону через дозатор (позиция 3). При заданных параметрах вращения и перемещения детали на её поверхности формируется наплавочное покрытие. Все параметры процесса наплавки, а также вращение и перемещение контролируются компьютером, расположенным в энергоблоке (позиция 6).

В основе электронно-лучевой пушки лежит источник на основе отражательного разряда с полым катодом. Важной особенностью этой установки является применение электронной пушки с плазменным катодом, что позволяет значительно повысить её ресурс и работать в техническом вакууме (давление менее 0,5 Па). Для извлечения электронов из плазмы используется разряд с высокой степенью неоднородности концентрации. Это необходимо для уменьшения тепловой нагрузки на электроды и повышения экономичности системы. Для инициирования разряда с полым катодом применяется дополнительный отражательный или пеннинговский разряд, который является одной из разновидностей разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Основное назначение этого разряда заключается в обеспечении устойчивого зажигания и стабильного горения основного разряда в катодной полости, а также автоматического инициирования основного разряда.

Технические характеристики установки представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики установки для ЭЛН

Ускоряющее напряжение, кВ	Сила тока пучка, А	Сила тока разряда, А	Диаметр электронного луча, мм	Длина развертки, мм	Скорость движения подложки, мм/с	Продолжительность одного прохода наплавки и время между проходами, с/с
до 30	до 0,2	до 1	1	20	2,8	90/90

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рисунке 3.1 представлена макроструктура поперечного сечения ряда исследуемых покрытий. Видно, что на границе сплавления встречаются отдельные крупные поры (а), в самом покрытии трещин и пор не фиксируется. При малом числе проходов (3 и 6) наблюдается различная травимость металла покрытия при переходе от слоя к слою, далее с увеличением проходов данные изменения не фиксируются.

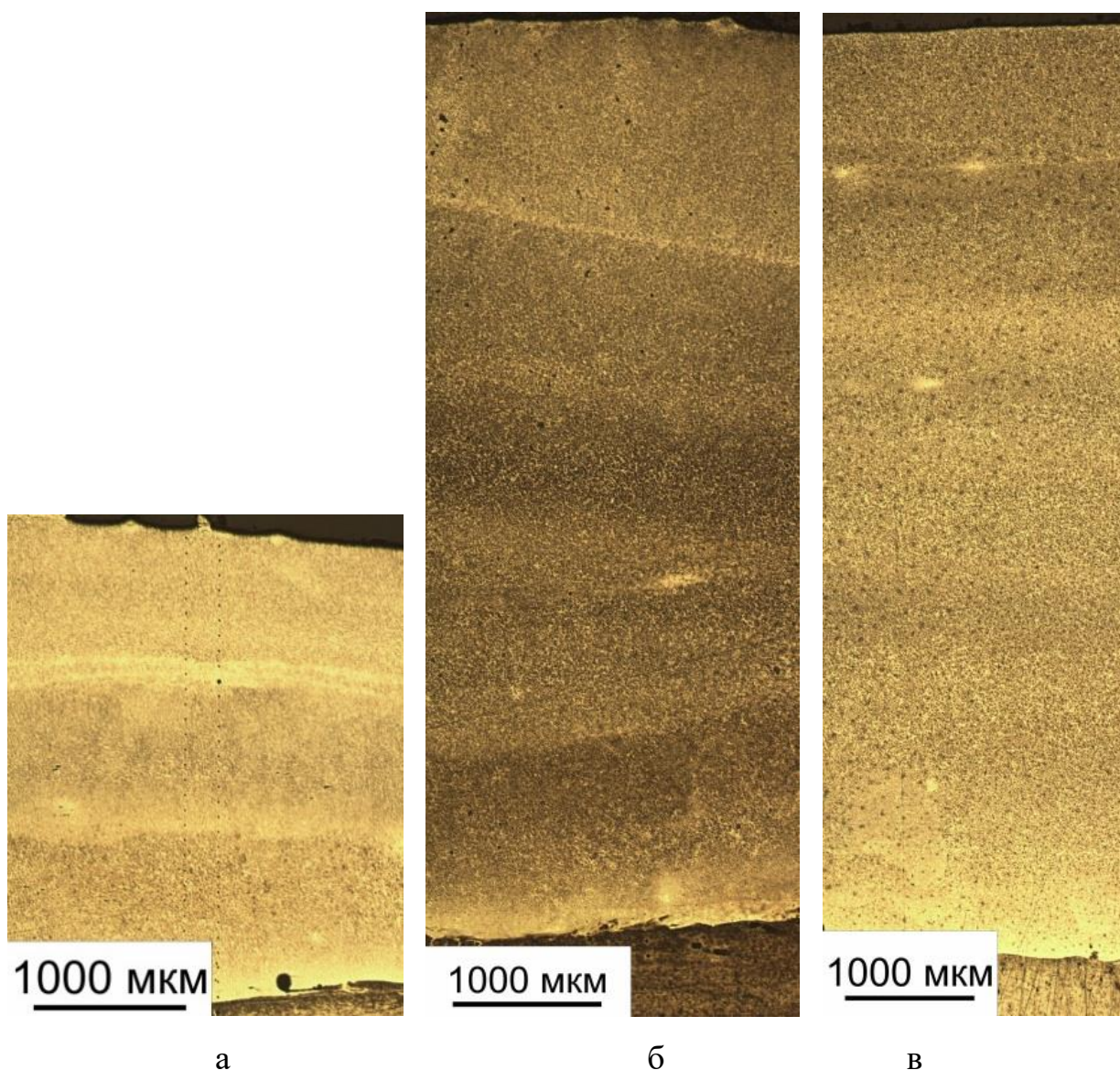


Рисунок 3.1 – Макроструктура поперечного сечения исследуемых покрытий в зависимости от числа проходов: а – 3, б – 6, в – 9



На рисунке 3.2 представлена микроструктура в объеме металла третьего прохода. Матрица представляет собой мартенситно-аустенитную смесь. Мартенситная фаза с увеличением числа проходов электронного луча становится все более грубой (от мелкодисперсного (бесструктурного) мартенсита (а) до крупных игл, распространяющихся через все аустенитное зерно (б)).

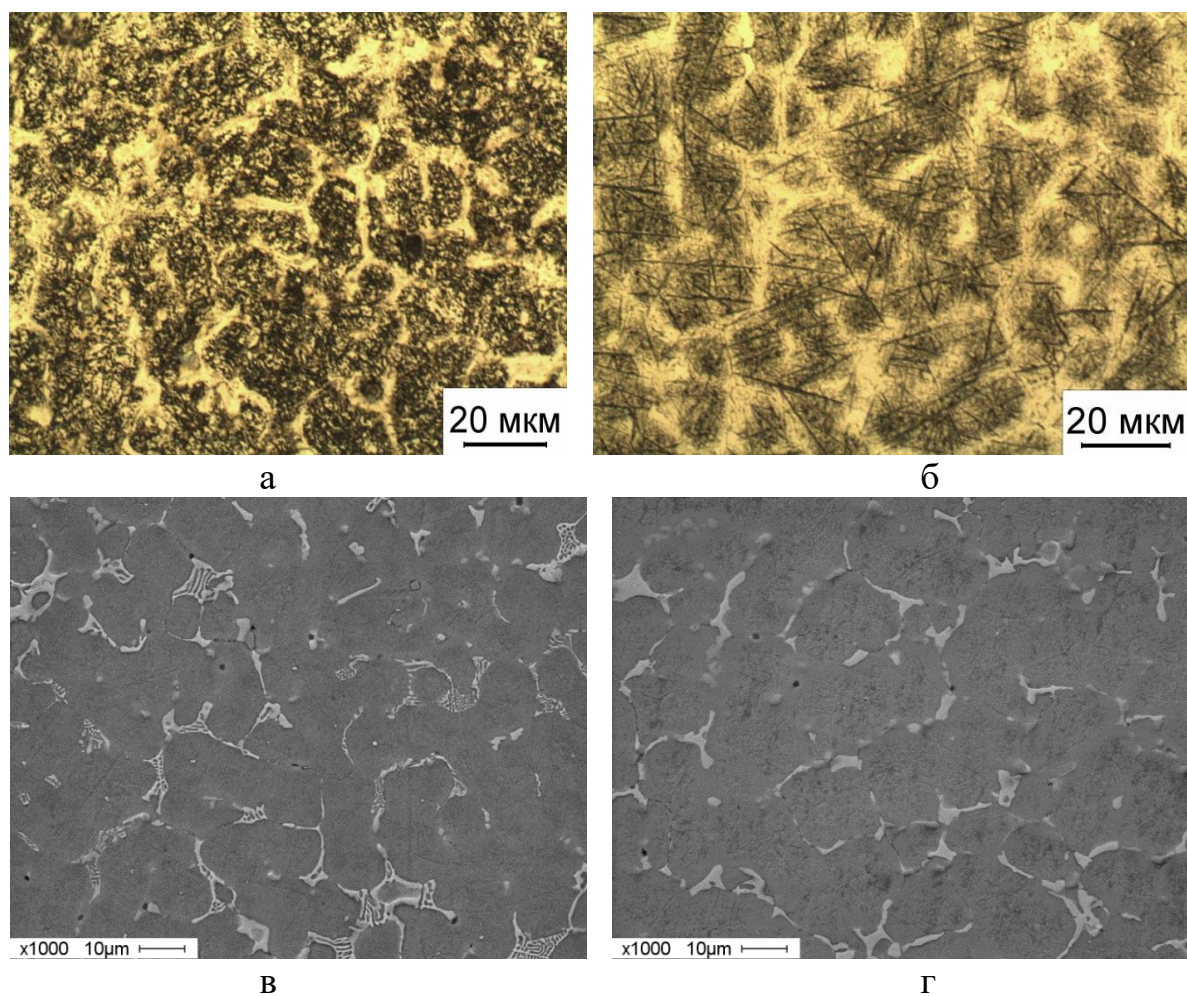


Рисунок 3.2 – Микроструктура покрытий в объеме металла третьего прохода в зависимости от числа проходов электронного луча: а, в – б, б,г – 15 проходов (а,б – ОМ, в,г – РЭМ)

Объемная доля мартенсита в металле третьего прохода увеличивается с ростом числа проходов с 77 до 95 % (рисунок 3.3). Это связано с тем, что в условиях термоциклирования ранее наплавленные слои неоднократно прогреваются до температур выше 500°С и, следовательно, происходит

релаксация термических напряжений, из аустенитной матрицы выделяется большое количество дисперсных ( $d_2 < 250$  нм) карбидов  $M_6C$  и  $VC$  (рисунок 3.4), которые выделяются в подобных покрытиях и оптической микроскопией не фиксируются.

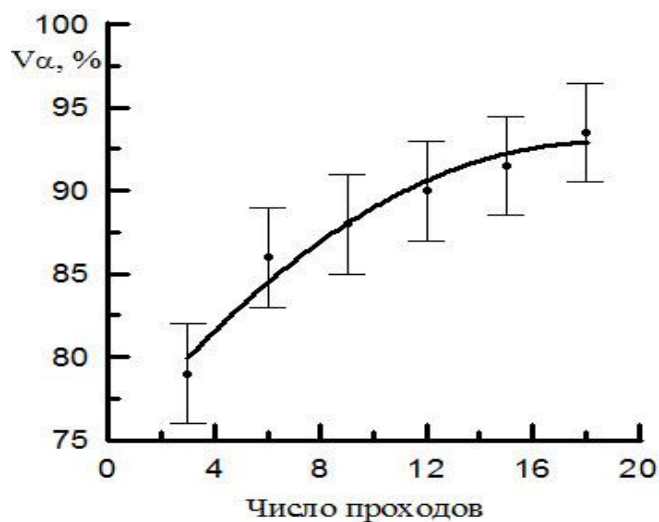


Рисунок 3.3 – Изменение объемной доли мартенсита в объеме металла третьего прохода от числа проходов электронного луча

Микротвёрдость образца приведена на рисунке 3.5. При малом числе проходов (от 3 до 9) меньшая величина микротвердости обусловлена сохранением 15...25 об.% остаточного аустенита.

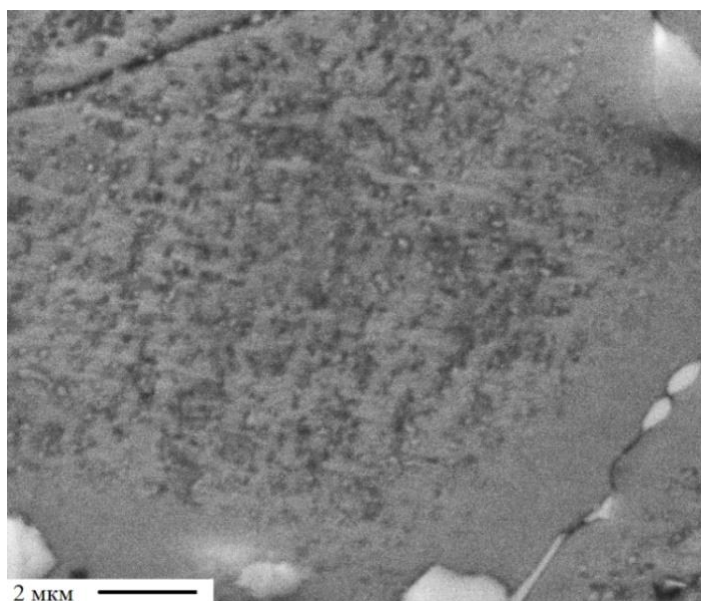


Рисунок 3.4 – Микроструктура покрытия в объеме металла третьего прохода после наплавки 15 проходов

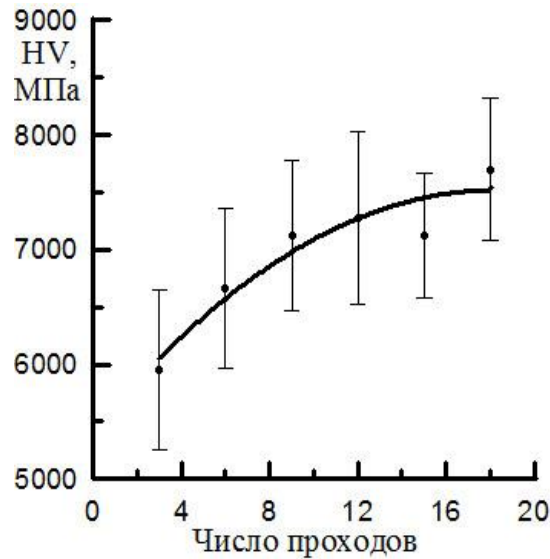


Рисунок 3.5 – Влияние числа проходов электронного луча на величину средней микротвердости покрытий

На рисунке 3.6 показана микроструктура исходного покрытия, полученного электронно-лучевой аддитивной технологией в вакууме на основе стали 10P6M5. Для формирования данного покрытия было проведено 20 проходов электронного луча, и общая высота покрытия составила 8 мм. Из предыдущего исследования было установлено, что микроструктура покрытия состоит из аустенитно-мартенситной матрицы с размером первичного зерна аустенита около 6 мкм и эвтектических карбидов, образующих сетку вокруг зерен. При таком типе наплавки с использованием оптического микроскопа иглы мартенсита не наблюдаются. В литературе такой мартенсит известен как бесструктурный или скрытоигольчатый мартенсит. В карбидной подсистеме покрытия формируются следующие структурные элементы: эвтектический карбид на основе  $M_6C$ , который образует сетку вокруг зерен, равноосные частицы карбида ванадия, расположенные как на границах зерен, так и внутри зерен, а также вторичные дисперсные карбиды внутри зерен на основе карбида типа  $M_6C$ . Рентгеноструктурный анализ показал, что объемная доля мартенсита в покрытии составляет около 70% от общего объема матрицы.



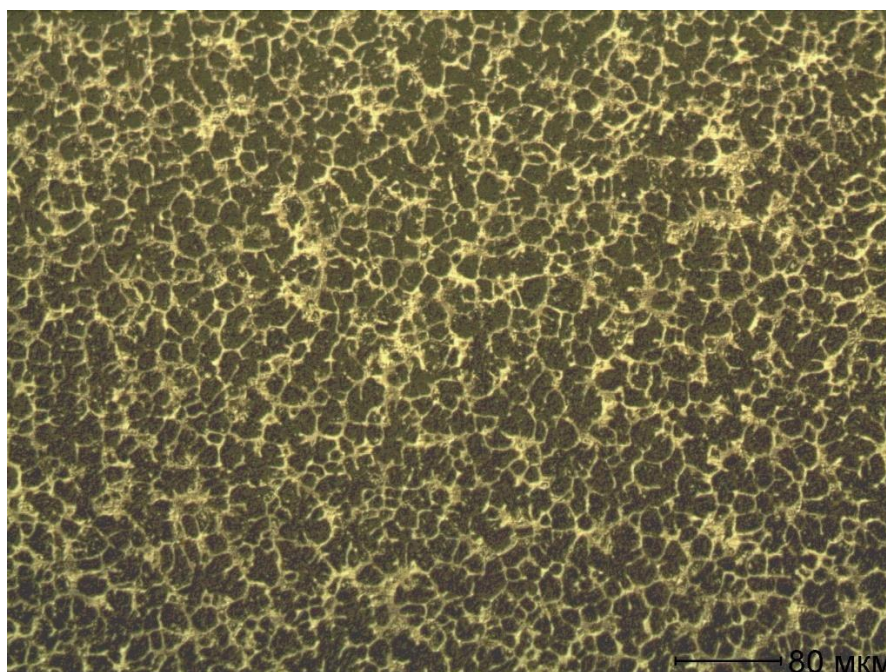
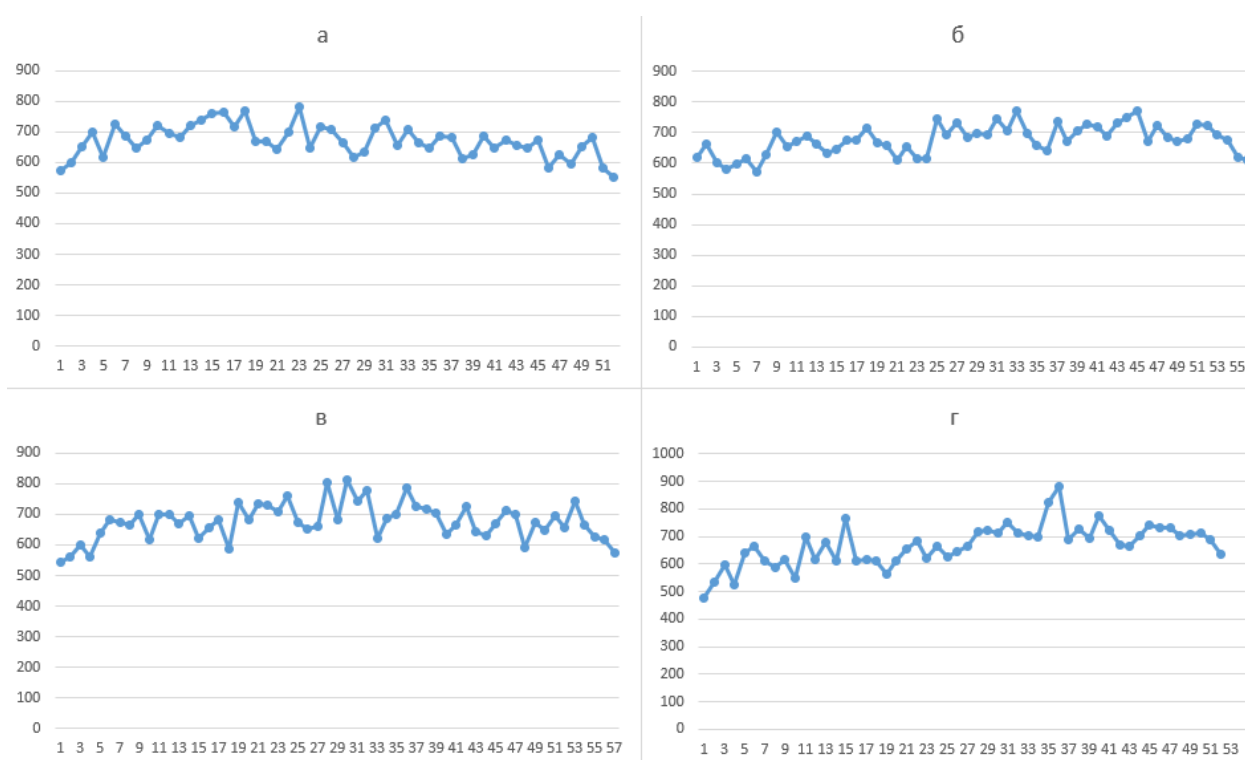


Рисунок 3.6 – Микроструктура образца на основе стали 10P6M5

Исследование образцов на микротвёрдость (рисунок 3.7), показало различные данные по высоте наплавляемого слоя.



а – 40 мА; б – 64 мА; в – 71 мА; г – 95 мА

Рисунок 3.7 – Изменение микротвердости образцов по наплавленному слою при различных значениях тока луча



Как видно из полученных графиков микротвёрдость у подложки резко уменьшается, что связано с перемешиванием металла. Однако у верхнего слоя значения микротвердости так же спадают. Это может быть связано с большим значением остаточного аустенита, что подтверждает плохая травимость образцов на данном участке (рисунок 3.8).

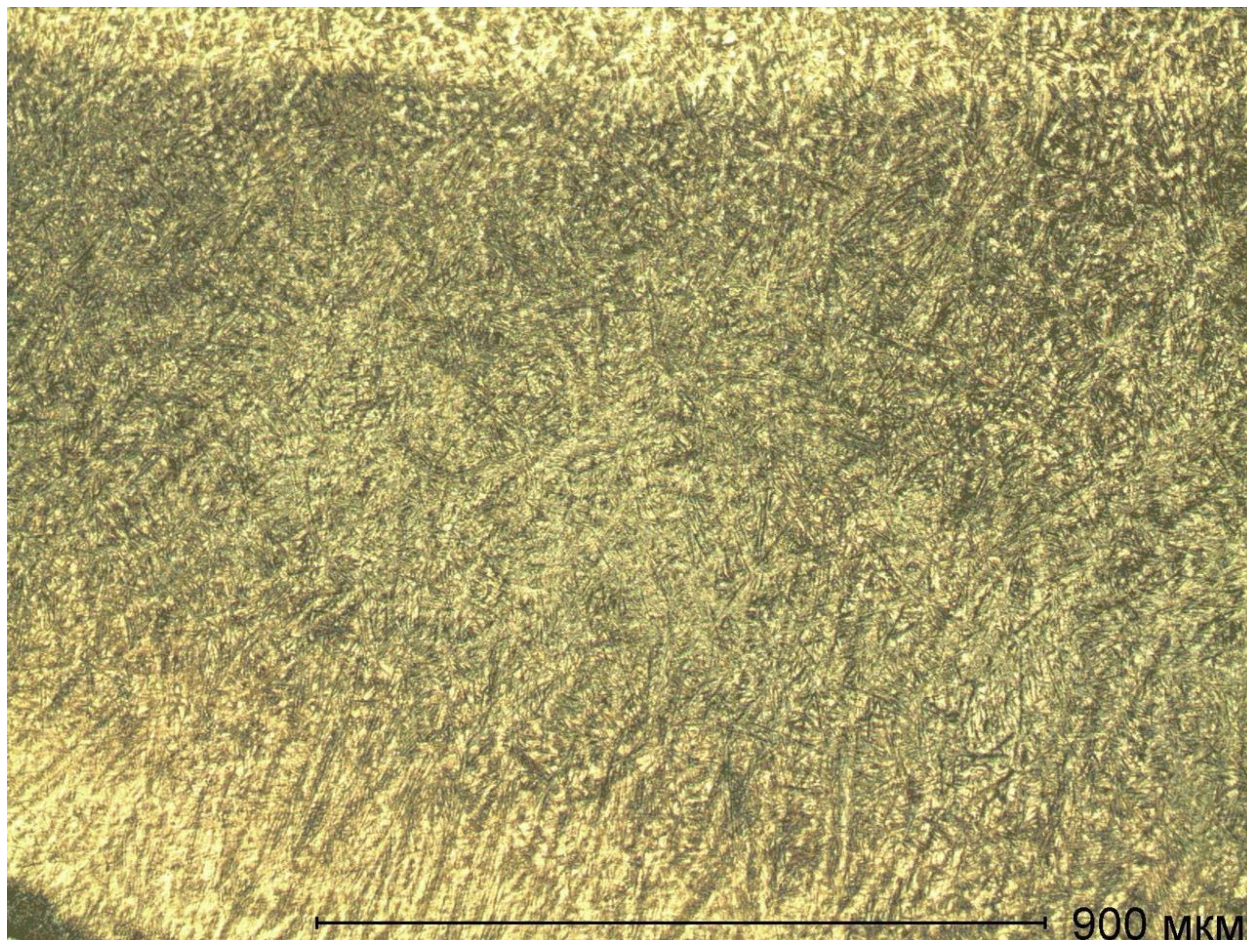


Рисунок 3.8 – Сравнение травимости участков завершающего слоя и  
нижележащих

Это связано с высокой растворимостью эвтектических карбидов и карбидов ванадия, замедляющих процесс мартенситного превращения, а также малым участком расплавления при малых токах, соответственно высокой скоростью охлаждения. При увеличении тока пучка повышается объёмная оплавления (литого ядра), уменьшается скорость охлаждения. Аустенит превращается в мартенсит и повышается твёрдость материала, а также уменьшаются внутренние напряжения.



**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ  
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Электронной инженерии</b>
Уровень образования	магистратура	Направление/ООП/ОПОП	15.04.01 Машиностроение

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оклад руководителя - 43200 руб. Оклад студента - 25000 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Премияльный коэффициент руководителя 30%; Премияльный коэффициент студента 30%; Надбавки руководителя 20-30%; Надбавки инженера 20-30%; Дополнительной заработной платы 12%; Накладные расходы 16%; Районный коэффициент 30%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30,2 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ конкурентных технических решений
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	-Цель и результат НИ.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Гантта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение эффективности исследования.

**Перечень графического материала:**

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i>
2. <i>Сегментирование рынка</i>
3. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
4. <i>Матрица SWOT</i>
5. <i>График проведения и бюджет НТИ</i>
6. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>
7. <i>Потенциальные риски</i>

<b>Дата выдачи задания к разделу в соответствии с календарным учебным графиком</b>	
--	--

**Задание выдал консультант по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Гасанов М.А.	д.э.н.		

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич		

## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Выпускная квалификационная работа по теме «Формирование микроструктуры быстрорежущей стали 10P6M5 в процессе селективной электроннолучевой наплавки» выполняется в рамках научно-исследовательской работы для организации. Заинтересованными лицами в полученных данных будут являться сотрудники организации.

Суть работы заключается в исследовании и разработке процесса сварки наплавки стали 10P6M5 электронно-лучевым способом. Сравнительный анализ сегментирования рынка представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сегментирование рынка

	Показатели		
	Низкий показатель	Средний показатель	Высокий показатель
Производительность	3	2	1
Скорость сварки	2,3	2	1
Возможность наплавки	3	2	1,2

где 1 – электронно-лучевая наплавка; 2 – аргонодуговая наплавка; 3 – ручная дуговая наплавка.

По данным результата сегментирования можно сделать вывод, что уровень конкуренции низок. Автоматически запрограммированная аргонодуговая сварка в импульсном режиме – хороший способ сварки, благодаря которому можно получать качественные сварные соединения при сварке труб малых диаметров.

### 4.2 Анализ конкурентных технических решений

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

для ее будущего повышения. Для этого составлена оценочная карта, приведенная в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Удобство в эксплуатации	0,1	3	4	3	0,5	0,2	0,3
2.Затраты сварочного материала	0,2	5	3	4	1	0,2	1
3.Качество сварного соединения	0,1	5	4	3	0,5	0,3	0,1
Экономические критерии оценки эффективности							
1.Цена	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,25
2.Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,3
3.Конкурентоспособность работы	0,25	5	5	3	1,25	0,5	1
Итого	1	28	26	21	5	2,35	3,75

где сокращения: Б<sub>ф</sub> – наплавка неплавящимся электродом; Б<sub>к1</sub> – электронно-лучевая наплавка; Б<sub>к2</sub> – ручная дуговая наплавка.

Анализ конкурентных технических решений определили по формуле:

$$K = \sum B_i B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таким образом, конкурентоспособность разработки составила 5 в то время, как двух других аналогов 2,35 и 3,75 соответственно. Результаты показывают, что данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной и имеет преимущества по таким показателям, как удобство в эксплуатации, затраты на сварочные материалы, качество сварного соединения, цена и предполагаемый срок эксплуатации. Итогом данного анализа является то, что метод, предложенный в нашей научно-исследовательской работе эффективнее методов конкурентов.

### 4.3 SWOT – анализ

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

Преимущества SWOT анализа заключаются в том, что он позволяет достаточно просто, в правильном разрезе взглянуть на положение компании, товара или услуги в отрасли, и поэтому является наиболее популярным инструментом в управлении рисками и принятии управленческих решений.

Результатом проведения SWOT анализа предприятия является план действий с указанием сроков выполнения, приоритетности выполнения и необходимых ресурсов на реализацию (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"><li>• Отсутствие данного процесса для повышения эффективности сварки неплавящимся электродом (отсутствие конкурентов на рынке).</li><li>• Широкая область применения</li><li>• Использование современного оборудования</li><li>• Актуальность проекта</li><li>• Наличие опытного руководителя</li><li>• Экономия электроэнергии</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Развитие новых технологий</li><li>• Перенастройка оборудования</li><li>• Отсутствие квалифицированного персонала.</li></ul>
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"><li>• Получение качественных сварных соединений</li><li>• Регулирование производительности</li><li>• Повышение стоимости конкурентных разработок</li><li>• Повышение эффективности сварки неплавящимся электродом</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Появление новых технологий</li><li>• Государство не даст средства для реализации темы.</li><li>• Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы.</li><li>• Зависимость, незначительная от поставщика</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Применения для оборудования работающего в полевых условиях.</li></ul>	

Периодичность проведения SWOT анализа. Рекомендуется проводить SWOT анализа минимум 1 раз в год в рамках стратегического планирования и

при формировании бюджетов. SWOT анализ очень часто является первым шагом бизнес-анализа при составлении маркетингового плана.

#### 4.4 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Морфологический подход основан на систематическом исследовании всех теоретически возможных вариантов, вытекающих из закономерностей строения (морфологии) объекта исследования. Синтез охватывает как известные, так и новые, необычные варианты, которые при простом переборе могли быть упущены. Путем комбинирования вариантов получают большое количество различных решений, ряд которых представляет практический интерес (таблица 4.4).

Реализация метода предусматривает следующие этапы:

- 1 – точная формулировка проблемы исследования;
- 2 – раскрытие всех важных морфологических характеристик объекта исследования;
- 3 – раскрытие возможных вариантов по каждой характеристике.

Таблица 4.4 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

	1	2	3
А. Диаметр сварочной проволоки, мм	1	1	1
Б. Марка электрода	ЭВЛ-2 Ø 3-150-ТУ	ЭВЛ-2 Ø 4-150-ТУ	ЭВЧ Ø 3-200-ТУ
В. Плазмообразующий газ	Ar (высший сорт)	Ar (Сорт 1)	-
Г. Стабилизирующий газ	Ar (высший сорт)	Ar (Сорт 1)	-
Д. Защитный газ	Ar	CO <sub>2</sub>	Ar + CO <sub>2</sub>

Возможные варианты решения технической задачи:

– А1Б1В2Г2Д3 – В первом случае, сварка низкоуглеродистых сталей при малых затратах на материал;

– А2Б2В2Г2Д3 – Во втором случае, низкоуглеродистых или низколегированных сталей при малых затратах материал;

– А3Б3В1Г1Д1 – В третьем случае, сварка хромистых (нержавеющих) сталей аустенитного класса, с повышенными требованиями к материалу.

#### **4.5 Планирование научно-исследовательских работ**

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

##### **4.5.1 Структура работ в рамках научного исследования**

В таблица 4.5 представлен перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Таблица 4.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	5	Календарное планирование работ	
	6	Изучение литературы по теме	

Теоретические исследования	7	Подбор нормативных документов	Студент
	8	Изучение установки	

Продолжение таблицы 4.5

Оценка полученных результатов	9	Анализ результатов	Научный руководитель, студент
	10	Вывод по цели	Научный руководитель, студент

#### 4.5.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения трудоёмкости работ воспользуемся формулой:

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

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

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ . Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (3)$$

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

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

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

### 4.5.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Гантта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{кал}} = 365$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 104$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

Все рассчитанные значения вносим в таблицу 4.6.

После заполнения таблицы 4.6 строим календарный план-график (таблица 4.7).

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и



декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 4.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$			Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$			
	$t_{min}$ , чел-дни			$t_{max}$ , чел-дни			$t_{ожi}$ , чел-дни										
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1
Составление и утверждение темы проекта	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3	
Анализ актуальности темы	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Рук.-студ.	1	1	1	2	2	2	
Поиск и изучение материала по теме	1	1	1	5	5	5	2,6	2,6	2,6	Студ.-рук.	1	1	1	2	2	2	
Выбор направления исследований	1	2	2	3	4	4	1,4	2,8	2,8	Руководитель	1	2	2	2	3	3	
Календарное планирование работ	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руководитель	2	2	2	3	3	3	
Изучение литературы по теме	7	7	7	14	14	14	9,8	9,8	9,8	Студент	10	10	10	15	15	15	
Подбор нормативных документов	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Студ.-рук.	3	4	4	5	6	6	
Изучение результатов	1	2	2	2	3	3	1,4	3	3	Студент	2	3	3	3	5	5	
Проведение расчетов по теме	5	6	6	8	9	9	6,2	7,2	7,2	Студент	7	8	8	10	11	11	
Анализ результатов	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студ.-рук.	2	2	2	3	3	3	
Вывод по цели	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Студент	3	3	3	4	4	4	

Таблица 4.7 – Календарный план-график проведения ВКР по теме

№ Ра-бот	Вид работ	Исполнители	Т <sub>кi</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ										
				Март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение темы проекта	Руководитель	3	★										
2	Анализ актуальности темы	Рук.-студ.	2	★	◆									
3	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	2		◆									
4	Выбор направления исследований	Руководитель	2			◆								
5	Календарное планирование работ	Руководитель	3			◆								
6	Изучение литературы по теме	Студент	15				★	★	★					
7	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	5						★	◆				
8	Изучение установки	Студент	6							★				
9	Моделирование сварочной ванны	Студент	3								★			
10	Изучение результатов	Студент	3									★		
11	Проведение расчетов по теме	Студент	10									★		
12	Анализ результатов	Студ.-рук.	2										★	◆
13	Вывод по цели	Студент	1											★

★ – студент; ◆ – руководитель.

#### 4.5.4 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (6)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Данные сведены в таблицу 4.8

Таблица 4.8 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (Z <sub>м</sub> ), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Обечайки труб Ø42-60 мм марки стали Ст3	кг	1	1	1	50	50	50	1300	1300	1300
Сварочная проволока Св-08Г2С Ø1 мм	кг	0,5	0,5	0,5	160	160	160	2080	2080	2080
Защитный газ (высший сорт)	л	–	–	1	–	–	20	–	–	520
Защитный газ аргон (1-ый сорт)	л	–	1	–	–	18	–	–	468	–
Защитный газ в виде смеси аргона с CO <sub>2</sub>	л	1	–	–	15	–	–	390	–	–
Итого								3770	3848	3900

## 4.5.5 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей

### ТЕМЫ

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категори-ям	Трудоемкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Составление и утверждение темы	Руководитель	22	22	22	3,6			8	8	8
2	Анализ актуальности темы	Студ.-рук.	11	1	11	4,4			5	5	5
3	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	11	11	11	4,4			5	5	5
4	Выбор направления исследований	Руководитель	1	2	2	3,6			4	8	8
5	Календарное планирование работ	Руководитель	2	2	22	3,6			8	8	8
6	Изучение литературы по теме	Студент	110	110	110	0,8			8,9	8,9	8,9
7	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	33	4	44	4,4			14,8	19,7	19,7
8	Изучение установки	Студент	44	66	66	0,8			3,6	5,4	5,4
9	Модернизация установки	Студент	2	3	4	0,8			1,8	2,7	3,6

Продолжение таблицы 4.9

10	Анализ результатов	Студ.-рук.	22	22	22	4,4	9,8	9,8	9,8
11	Вывод по цели	Студент	33	33	33	0,8	2,7	2,7	2,7
Итого:							71,6	83,2	84,1

Проведем расчет заработной платы относительно того времени, в течение которого работал руководитель и студент. Принимая во внимание, что за час работы руководитель получает 450 рублей, а студент 100 рублей (рабочий день 8 часов):

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (7)$$

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

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

Максимальная основная заработная плата руководителя (кандидата технических наук) равна примерно 50400 рублей, а студента 31000 рублей.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (8)$$

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

Таким образом, заработная плата руководителя равна 48384 рублей, студента – 28000 рублей.

#### 4.5.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (9)$$

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

Отчисления во внебюджетные фонды приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб			Дополнительная заработная плата, руб		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель	43200	50400	50400	5184	6048	6048
Студент	25000	30000	31000	3000	3600	3720
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30,2 %					
Итого						
Исполнение 1	23068 руб.					
Исполнение 2	27195 руб.					
Исполнение 3	27533 руб.					

#### 4.5.7 Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = \left( \sum \text{статей} \right) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (10)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, наибольшие накладные расходы при первом исполнении равны:  $Z_{\text{накл}} = 103222 \cdot 0,16 = 16516$  руб.

#### 4.5.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Для понимания стоимости проекта необходимо свести все полученные ранее данные в одну общую таблицу 4.11 для получения расчетного бюджета затрат НИИ.

Таблица 4.11 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	3770	3848	3900	Таблица 4.7
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	68200	80400	81400	Таблица 4.8
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8184	9648	9768	Таблица 4.9
4. Отчисления во внебюджетные фонды	23068	27195	27533	Таблица 4.10
5. Накладные расходы	16516	19375	19616	16 % от суммы ст. 1-4
6. Бюджет затрат НТИ	119738	140466	142217	Сумма ст. 1-5

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (11)$$

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

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{119738}{142217} = 0,84; \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{140466}{142217} = 0,99;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{142217}{142217} = 1.$$

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



$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (12)$$

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

$a^i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Сварочный материал	0,25	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации	0,25	5	2	3
3. Защитный газ	0,15	4	4	4
4. Модернизация способа сварки	0,35	4	5	5
ИТОГО	1	4,5	3,15	3,8

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,35 = 4,5;$$

$$I_{p-исп2} = 3 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,35 = 3,15;$$

$$I_{p-исп3} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,35 = 3,8;$$

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

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}}, \quad (13)$$

$$I_{исп1} = \frac{4,5}{0,84} = 5,35; \quad I_{исп2} = \frac{3,15}{0,99} = 3,18; \quad I_{исп3} = \frac{3,8}{1} = 3,8.$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп}i}}{I_{\text{исп}max}}, \quad (14)$$

Таблица 4.13 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,84	0,99	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	3,15	3,8
3	Интегральный показатель эффективности	5,35	3,18	3,8
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,6	0,71

Сравнив значения интегральных показателей эффективности, можно сделать вывод, что реализация технологии первого исполнения наилучшая с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Обучающемуся:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1BM11	Никифоров Илья Игоревич

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Электронной инженерии</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/ООП/ОПОП</b>	15.04.01 Машиностроение

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

<p>Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объект исследования – процесс электронно лучевой наплавки Область применения – машиностроительное производство Рабочая зона: лаборатория Размеры помещения 15x25 м Количество и наименование оборудования рабочей зоны: электронно лучевая установка, электронный микроскоп, компьютер, монитор Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: процесс электронно-лучевой наплавки, работа с микроскопом, шлифование образцов, оформление результатов на компьютере</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	<p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ Р 50923-96 Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в ЧС. Основные положения.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>1. Вредные производственные факторы: 1.1 Недостаточная освещенность; 1.2 Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры;</p>

	<p>1.3 Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</p> <p>1.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ультрафиолетового и инфракрасного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</p> <p>1.5. Факторы, связанные с высокой температурой материальных объектов;</p> <p>1.6. Наличие токсикантов, ПДК, класс опасности, СКЗ, СИЗ;</p> <p>2. Опасные факторы:</p> <p>2.1 Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R<sub>заземления</sub>, СКЗ, СИЗ; Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ;</p> <p>2.2 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.</p>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>Загрязнение атмосферы: выброс газа, задымление.</p> <p>Загрязнение гидросферы: разлив смазывающе-охлаждающих жидкостей, масел.</p> <p>Загрязнение литосферы: металлическая стружка и пыль, окалины, шлак.</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<p>Возможные ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– возникновение пожара, взрыва;</li> </ul> <p>Наиболее типичная ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– возникновение пожара, взрыва.</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания к разделу в соответствии с календарным учебным графиком</b>	
--	--

**Задание выдал консультант по разделу «Социальная ответственность»:**

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

**Задание принял к исполнению обучающийся:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич		

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Основной задачей регулирования проектных решений разрешается за счет соблюдения законов (налоговое законодательство, трудовой и гражданский кодексы). Руководитель (ответственный) принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдение требования безопасности в помещении.

Требования к размещению машин для сварки, организации рабочих мест и к производственным помещениям – в соответствии с ГОСТ 12.3.003–86.

Полы производственных помещений для выполнения сварки должны быть несгораемые, обладать малой теплопроводностью, иметь ровную нескользкую поверхность, удобную для очистки, а также удовлетворять санитарно-гигиеническим требованиям в соответствии с действующими строительными нормами и правилами;

При установке однопостового источника питания у стены расстояние от стены до источника должно быть не менее 0,5 м;

Открытые траектории в зоне возможного нахождения человека должны располагаться значительно выше уровня глаз. Минимальная высоты траектории 2.2.м;

Рабочее место обслуживающего персонала, взаимное расположение всех элементов (органов управления, средств отображения информации, оповещения и др.) должны обеспечивать рациональность рабочих движений и максимально учитывать энергетические, скоростные, силовые и психофизиологические возможности человека;

Следует предусматривать наличие мест для размещения съемных деталей, переносной измерительной аппаратуры, хранение заготовок, готовых изделий и др.;

Установки должны эксплуатироваться в специально выделенных помещениях либо могут располагаться в открытом пространстве на фундаментах или платформах транспортных средств;

Помещения должны соответствовать требованиям пожарной безопасности и иметь необходимые средства предотвращения пожара и противопожарной защиты;

Отделку помещений следует выполнять только из негорючих материалов. Не допускается применение глянцевых, блестящих, хорошо (зеркально) отражающих излучение сварочной дуги (коэффициент отражения рекомендуется не более 0.4);

Двери помещений должны иметь знак ультрафиолетовой опасности;

Высота помещений должна быть не менее 4.2 м. Коммуникации (вода, электроэнергия, воздух, и др.) следует прокладывать под полом в специальных каналах с защитными коробами (возвышение над уровнем пола не допускается) или подвешивать кабели на высоте не менее 2.2 м от пола;

Помещения должны иметь приточно-вытяжную вентиляцию. При необходимости, рабочие места должны быть оборудованы местной вытяжкой с целью исключения попадания в рабочее помещение продуктов взаимодействия ультрафиолетового излучения с обрабатываемыми материалами.

## **5.2 Производственная безопасность**

В процессе исследования с точки зрения возникающих вредных или опасных факторов общий этап работ может быть разделен на три основных этапа:

1) разработка установки для автоматической сварки под флюсом: проведение теоретических расчетов и составление принципиальной схемы установки (работа на персональном компьютере);

2) сборка установки: пайка разработанной схемы;

3) эксплуатация образцов: проведение сварки экспериментальных образцов, проведение механических испытаний, изучение структуры образцов с помощью микроскопа.

В таблице 5.1 представлены опасные и вредные факторы с нормативной документацией.

Таблица 5.1 - Опасные и вредные факторы при эксплуатации процесса сварки дугой, горячей в динамическом режиме.

№	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1	Движущиеся (в том числе разлетающиеся) твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего	ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. «Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.»
2	Чрезмерно высокая температура материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека	ГОСТ 12.4.250-2019 «Одежда специальная для защиты от искр и брызг расплавленного металла» ГОСТ 12.2.003-91 «Оборудование производственное. Общие требования безопасности»
3	Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов	ГОСТ 12.1.019-2017 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Электробезопасность»;
4	Отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения	СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»
5	Повышенный уровень локальной вибрации	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий»

6	Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ Вредные вещества. «Классификация и общие требования безопасности»
---	---	---

Продолжение таблицы 5.1

№	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
7	Аномальные микроклиматические параметры воздушной среды на местонахождении работающего	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»
8	Производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (активное наблюдение за ходом производственного процесса, монотонность труда, перенапряжение анализаторов)	MP 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности»;
9	Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)	ГОСТ 12.1.035–81 «Оборудование для дуговой и контактной электросварки Допустимые уровни шума и методы измерений»

### **5.2.1 Движущиеся (в том числе разлетающиеся) твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего**

При работе применяются автомат для сварки под флюсом, то есть имеется опасность нанесения вреда человеку движущимися частями машин.

В качестве защиты необходимо проводить регулярный инструктаж рабочих по технике безопасности, все движущиеся механизмы должны быть аттестованы.

Проходы: между оборудованием, движущимися механизмами и перемещаемыми деталями, а также между постами – не менее 1 м; свободная площадь на один сварочный пост – не менее 3 м.

Для большей безопасности работы необходимо выставить предупредительные таблички о наличии передвигающихся механизмов.



6.2.2 Чрезмерно высокая температура материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека

Термические ожоги возникают вследствие непосредственного контакта с раскаленным металлом сварочной ванны, электрической дугой и пламенем газовой горелки. Для предотвращения термических ожогов кожного покрова необходимо использовать индивидуальные средства защиты.

Спецодежда – костюм и брюки, а также рукавицы, изготавливаются из брезента и служат для защиты тела и рук от брызг сварки, и теплового излучения.

Для защиты ног сварщиков используют специальные ботинки, исключающие попадание искр и капель расплавленного металла ГОСТ 12.4.250-2019.

Для защиты рук от брызг и лучистой энергии применяют брезентовые рукавицы со специальной противопожарной пропиткой.

Для защиты от лучистой энергии рабочих, не связанных со сваркой, наплавкой или резкой металлов, сварочные посты должны ограждаться экранами из несгораемых материалов высотой не менее 1,8 м.

Требования по безопасности согласно ГОСТ 12.2.003-91.

### **5.2.2 Электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов**

При сварке под слоем флюса (как автоматической, так и полуавтоматической) каждый сварочный аппарат должен быть оснащен отдельным заземляющим проводом непосредственно с заземляющей магистралью, все части автоматов и полуавтоматов должны быть надежно заземлены, плавкие предохранители должны соответствовать паспортным данным, шкафы, пульта должны иметь дверцы с блокировкой, отключающей первичное напряжение при их открытии.

Все оборудование должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019-2017.

Основными причинами поражения электрическим током могут послужить следующие факторы: прикосновение к токоведущим частям или прикосновение к конструктивным частям, оказавшимся под напряжением. С целью исключения опасности поражения электрическим током необходимо соблюдать следующие правила электрической безопасности:

– перед включением установки должна быть визуально проверена ее электропроводка на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токопроводящих частей держателей электродов;

– при появлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической сети установку.

К защитным мерам от опасности прикосновения к токоведущим частям электроустановок относятся: изоляция, ограждение, блокировка, пониженные напряжения, электрорезиновые средства.

Среди распространенных способов защиты от поражения электрическим током при работе с электроустановками различают: защитное заземление; зануление; системы защитного отключения; защитное разделение сетей; предохранительные устройства.

К работам на электроустановках допускаются лица, достигшие 18 лет, прошедшие инструктаж и обученные безопасным методам труда. К тому же электробезопасность зависит и от профессиональной подготовки работников, сознательной производственной и трудовой дисциплины. Целесообразно каждому работнику знать меры первой медицинской помощи при поражении электрическим током.

### 5.2.3 Отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения

Рациональное освещение имеет большое значение для высокопроизводительной и безопасной работы. Нормирование значений освещенности рабочей поверхности при сварочных работах помещения составляет 200 лк.

Для освещения цеха необходимо использовать, как правило, газоразрядные источники света: лампы ДРЛ, ДРИ; для освещения высоких цехов (до 4 м) большой площади - люминесцентные лампы. Допускается применение ламп накаливания. Для местного освещения рекомендуются светильники с непрозрачными отражателями, имеющими защитный угол  $\geq 30^\circ$ . Если светильники расположены ниже глаз сварщика, то защитный угол может быть в пределах 10... 30°.

При сварке внутри емкостей освещение осуществляется светильниками направленного света, установленными вне свариваемого объекта, или ручными переносными светильниками, оборудованными защитной сеткой. Освещенность в этих случаях должна быть  $\geq 30$  лк. При этом трансформатор для переносных светильников нужно устанавливать вне свариваемого объекта с обязательным заземлением вторичной обмотки трансформатора. Не допускается применение автотрансформаторов.

Недостаточная освещенность может быть вызвана ошибочным расположением ламп в помещении, отсутствием окон в помещении, не правильным выбором количества осветительных приборов и не рациональной загрузкой на них электрического тока. Данный фактор может 70 стать причиной неадекватного восприятия человека технологического процесса, его утомления, а также вызвать пульсирующие головные боли.

Для производственных помещений, а также научно-технических лабораторий коэффициент пульсаций освещенности (Кп) должен быть не больше 10%. Коэффициент естественного освещения для наших сварочных и

сборочно-сварочных работ должен быть не менее 1.5 % при боковом и 5 % при верхнем или комбинированном освещении.

В целях уменьшения пульсаций ламп, их включают в разные фазы трехфазной цепи, стабилизируют постоянство прохождения в них переменного напряжения. Но самым рациональным решением данного вредного фактора является изначально правильное расположение и подключение источников света в помещении, путем замеров освещенности, при помощи люксметра, и сравнения полученных результатов с нормативными документами.

Проведем расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности методом коэффициента светового потока, учитывающего световой поток, отраженный от потолка и стен. Дано помещение с размерами: длина  $A = 20$  м, ширина  $B = 6$  м, высота  $H = 4,5$  м. Высота рабочей поверхности  $h_p = 1$  м. Требуется создать освещенность  $E_n = 200$  лк. Расчет произведём по формуле:

$$S = A \cdot B, \quad (15)$$

где  $A$  – длина, м;

$B$  – ширина, м.

$$S = 20 \cdot 6 = 120$$

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

Выбираем лампу холодно-белого света ЛХБ, световой поток которой равен ФЛД = 4400 Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-80. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1230 мм, ширина – 266 мм.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_c - h_p = 4,5 - 1 - 1 = 2,5, \quad (16)$$

где  $H$  – высота помещения;

$h_c$  – расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_p$  – высота рабочей поверхности над полом;

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР:  $h_n = 4$  м. Расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 1$  м.

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = h \cdot \lambda = 2,5 \cdot 1,1 = 2,75, \quad (17)$$

Число рядов светильников в помещении:

$$N_b = \frac{B}{L} = \frac{6}{2,75} = 2,18 \Rightarrow 3, \quad (18)$$

Число светильников в ряду:

$$N_a = \frac{A}{L} = \frac{20}{2,75} = 7,27 \Rightarrow 8, \quad (19)$$

Получаем общее число светильников 24.

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется из уравнения:

$$L = N_a \cdot L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + N \cdot L_{lam}, \quad (20)$$

Согласно «Практикум БЖД 2009» равномерность освещения обеспечивается расстоянием от крайних светильников до стенок  $= L/3$ .

Составим уравнения с 1 неизвестной:

$$L_1 = \frac{(L - N \cdot L_{lam})}{N_a + \frac{2}{3}},$$

$$20000 = 7 \cdot L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 8 \cdot 1230,$$

$$6000 = 2 \cdot L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + 3 \cdot 266,$$

$$L_1 = \frac{20000 - 8 \cdot 1230}{7 + \frac{2}{3}} = 1325 \text{ мм},$$

$$L_2 = \frac{6000 - 3 \cdot 266}{2 + \frac{2}{3}} = 1950 \text{ мм}.$$

Расстояние от торцов – 1 получим следующим образом:

$$L_1 = \frac{1325}{3} = 442 \Rightarrow 450 \text{ мм},$$

$$L_2 = \frac{1950}{3} = 650 \text{ мм}.$$

Размещаем светильники в три ряда. На рисунке 5.1 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

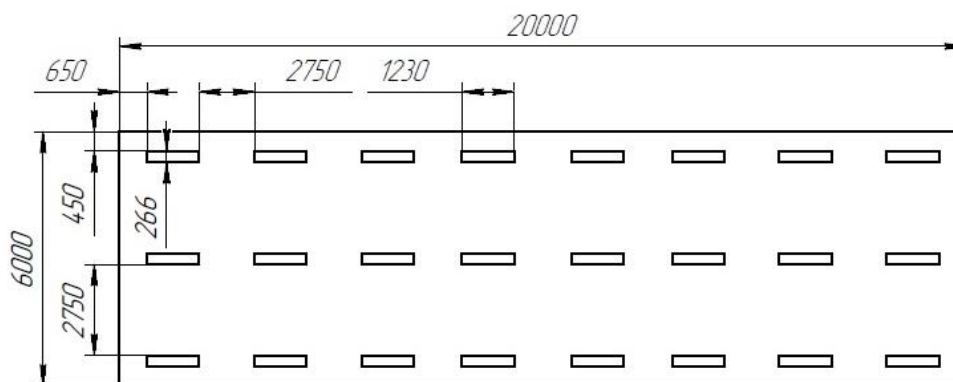


Рисунок 5.1 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h(A + B)} = \frac{120}{4,5(20 + 6)} = 1 \quad (21)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $rП = 70 \%$ ,  $rС = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1$  равен  $\eta = 0,43$ .

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot k \cdot z \cdot S}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 120 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{24 \cdot 0,43} = 3837 \text{ лм.} \quad (22)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% \leq 20\%,$$
$$\frac{4400 - 3837}{4400} \cdot 100\% = 12,8\%.$$

Таким образом:  $-10\% \leq 12,8\% \leq 20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Итак, рационально устроенное освещение создает достаточную равномерную освещенность производственного помещения, сохраняет зрение рабочего персонала, уменьшает травматизм, позволяет повышать производительность труда, влияет на уменьшение процента брака и улучшение качества. Освещение рабочей поверхности и помещения в целом достигается равномерным размещением светильников, при котором на рабочей поверхности отсутствуют резкие тени

## **5.2.4 Повышенный уровень локальной вибрации**

Источником вибрации при эксплуатации является электродвигатель, являющийся составной частью каретки для автоматической сварки под флюсом.

Амплитуда вибрации в помещении должна составлять не более  $0,0072 \cdot 10^{-3}$  м при частотах от 31,5 Гц до 63 Гц. На производстве станки работают в диапазонах близких к 60 Гц. Соответственно, не возникает пагубного влияния на организм человека.

Для того, чтобы снизить уровень вибрации до требуемого уровня используются методы защиты оператора от вибрации. Существуют следующие методы, такие как: правильное размещение специального оборудования устройства и оптимальные режимы работы установки.

Чтобы снизить уровень вибрации в цехе, необходимо своевременно осуществлять ремонт оборудования и вовремя смазывать трущиеся поверхности деталей. При работе с оборудованием используются индивидуальные средства защиты: обувь с амортизирующими подошвами, рукавицы и перчатки с мягкими наладонниками.

## **5.2.5 Чрезмерное загрязнение воздушной среды**

При выполнении сварочных работ атмосферный воздух загрязняется сварочным аэрозолем, в составе которого в зависимости от вида сварки, марок электродов и флюса находятся вредные для здоровья оксиды металлов, а также газообразные соединения. Стационарные автоматические установки для сварки под слоем флюса должны быть оборудованы пылегазоотсасывающими и флюсоуборочными устройствами.

Основными вредными веществами в составе сварочного аэрозоля при автоматической сварке являются фтористые соединения и их выделение резко возрастает с увеличением содержания фтористого кальция во флюсе. Фтористые



соединения относятся ко 2 классу опасности. Нормы и показатели этих соединений должны соответствовать таблице 5.2 (ГОСТ 12.1.007-76).

Таблица 5.2 – Нормы и показатели фтористых соединений

Наименование показателя	Нормы для класса опасности
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/ м	0,1-1,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	15-150
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	100-500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м	500-5000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	300-30
Зона острого действия	6,0-18,0
Зона хронического действия	10,0-5,0

### 5.2.6 Аномальные микроклиматические параметры воздушной среды на местонахождении работающего

Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений (по ГОСТ 12.1.005–88)

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	21-25	60-40	0,1
Теплый	23-25	22-26	60-40	0,1

Микроклимат производственных помещений поддерживается на оптимальном уровне системой водяного центрального отопления, естественной вентиляцией, а также искусственным кондиционированием и дополнительным прогревом в холодное время года.

### **5.2.7 Производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека (активное наблюдение за ходом производственного процесса, монотонность труда, перенапряжение анализаторов)**

Из психофизических факторов, возникающих при ремонте нефтепровода в трассовых условиях, можно отметить повышенную нагрузку на органы чувств (зрение, слух), умственное перенапряжение, стрессовые эмоциональные перегрузки.

Для профилактики возникновения данных факторов предлагается:

- уменьшить плотность рабочего времени;
- исключить случайно возникающие перебои в работе, организовать ритмизацию трудовых процессов;
- организовать правильный режим труда и отдыха, в частности 30 минутный перерыв после каждых двух часов непрерывной работы или 15 минутный перерыв на каждый час работы. Ссылки на нормативные документы.

### **5.2.8 Производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде (повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума)**

Методы установления предельно допустимых шумовых характеристик оборудования для сварки изложены в ГОСТ 12.1.035–81. Шум на рабочих местах также может проникать извне через каналы вентиляции и проем двери из кабинета в коридор. Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в децибелах (дБ), в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром.

По характеру спектра в помещении присутствуют широкополосные шумы. Источник шумов – электродвигатели в системе охлаждения.

Для рабочих помещений административно-управленческого персонала производственных предприятий, лабораторий, помещений для измерительных и аналитических работ уровень звука не должен превышать 50 дБ, ГОСТ 12.1.003-2014.

Уменьшение влияния данного фактора возможно путём изоляции источников шумов, проведение акустической обработки помещения, создания дополнительных ДВП или ДСП изоляционных перегородок.

### **5.3 Экологическая безопасность**

При выполнении работы образовывались следующие отходы: вредные газы, пыль, шлаковые корки и промышленный мусор. При автоматической сварке под флюсом таких отходов, как смазывающе-охлаждающие жидкости и масла не наблюдалось.

Загрязнители атмосферы поступают в воздух через вентиляционные выбросы, их концентрация относительно невелика, однако из-за огромных валовых выбросов через вентиляцию атмосфера получает большое количество загрязнения. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Что касается шлаковых корок: можно механически примешивать к флюсу некоторое количество измельченной шлаковой корки, не ухудшая этим заметно качество металла шва или наплавки.

В помещении необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для стружки, стекла, металлических частей, пластика.

## **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований, и ЧС, которые могут произойти на рабочем месте**

Чрезвычайные ситуации относятся к совокупности опасных событий или явлений, приводящих к нарушению безопасности жизнедеятельности. К ним относятся: высокие и низкие температуры, физическая нагрузка, поражающие токсичные дозы сильнодействующих ядовитых веществ, высокие дозы облучения, производственные шумы и вибрации и многое другое могут приводить к нарушению жизнедеятельности человека. Наиболее типичной ЧС является пожар.

Сварочный пост относится к категории Г по пожарной опасности (умеренная пожароопасность).

### **5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС**

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. Во всех служебных помещениях обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники.

С целью предотвращения пожаров необходимо:

Уходя из помещения проверить отключения всех электронагревательных приборов, электроустановок, а также силовой и осветительной сети.

Куриль только в отведенных для курения местах.

Проверять уровень нормы газа аргона в помещении, проветривать помещение.

В случае возникновения пожара приступить к его тушению имеющимися средствами, эвакуироваться и вызвать по телефону «01», сотовый «010» пожарную службу.

Сотрудники должны быть ознакомлены с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре. План эвакуации должен находиться в каждом помещении и на каждом этаже лестничной площадке.

В производственных помещениях проходит большое количество проводов и большое количество электроприборов. Не правильная изоляция данных проводов, или отсутствие заземления может привести к поражению человека или к возникновению возгораний.

В целях безопасности в помещениях имеются рубильники для полного обесточивания помещения, а также изоляция проводов, защитное состояние сети и применение специальных защитных устройств (сетевые фильтры, автоматические выключатели). Осуществляется дистанционный контроль количества кислорода в окружающем воздухе с помощью автоматических или ручных приборов. Согласно нормам, в воздухе должно присутствовать не меньше 19 % кислорода.

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

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были изучены особенности формирования структуры покрытия на основе стали 10P6M5 после импульсного электронно-лучевого оплавления в диапазоне тока луча 40...95 мА.

Установлено, что в процессе селективной электронно-лучевой наплавки с увеличением числа проходов электронного луча формируется мультимодальное распределение карбидной фазы по размерам (первичный эвтектический карбид типа  $M_6C$ , находящийся по границам зерен, меняет свою морфологию от скелетообразного до отдельных округлых выделений; внутри зерен матрицы выделяются дисперсные вторичные карбиды  $M_6C$  и VC).

Матрица представляет собой мартенситно-аустенитную смесь. Мартенситная фаза с увеличением числа проходов электронного луча изменяется от мелкодисперсного (бесструктурного) до крупногольчатого. Объемная доля мартенсита увеличивается с ростом числа проходов с 77 до 95 %, что приводит к постепенному росту средней величины микротвердости исследуемых покрытий от ~5950 до ~(7200...7700) МПа и более однородному ее распределению. Некоторое уменьшение твердости у границы наплавки – основной металл и в верхней ее части при числе проходов (от 3 до 9) связано с подплавлением основы и сохранением до 15...25 % остаточного аустенита соответственно.

Зона термического влияния состоит из двух участков с разной степенью травимости и дисперсности мартенсита. Микротвердость в ЗТВ соответствует уровню основного покрытия и составляет около 7...7,5 ГПа. При токе электронного луча в 78 мА происходит перекрытие зон термического влияния от соседних дорожек оплавления.

Исходя из полученных данных, можно обосновать два наиболее оптимальных режима обработки ранее наплавленного покрытия с помощью импульсного электронного луча. Первый режим предполагает использование тока луча до 64 мА, что позволяет получить в литом ядре покрытия

дисперсную структуру с большим объемом остаточного аустенита и, следовательно, низкой твердостью. Второй режим, с током луча от 64 до 78 мА, способствует формированию скрытоигольчатого мартенсита в литом ядре с низким содержанием остаточного аустенита.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Robert W.M. Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy. – Hardcover, 1999. – 685 p.
2. Sun Z. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – №59. – P. 257-267.
3. Cooke S., Ahmadi K. Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – №57. – P. 978- 1003.
4. Shi Y. Materials for Additive Manufacturing (3D Printing Technology Series) – Paperback, 2021. – 612 p.
5. Debroy T., Wei H.L. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // Progress in Materials Science. – 2018. – №92. – P. 112- 224.
6. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: Пособие для инженеров – М.: Центральный орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ", 2015. – 220 с.
7. Li J., Li Z., Alkahari M.R. Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing // International Journal of Automation Technology. – 2019. – № 13. – P. 346-353.
8. ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Термины и определения // Стройинф URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146487> (дата обращения: 26.05.2023).
9. Mostafaei A. Binder jet 3D printing–Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges // Progress in Materials Science. – 2021. – №119. – P. 101-107.
10. Mao Y. Binder jetting additive manufacturing of 316L stainless-steel green parts with high strength and low binder content: Binder preparation and



process optimization // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – №291. – P. 117-120.

11. Rodríguez-González P. Heat treatments for improved quality binder jetted molds for casting aluminum alloys // Additive Manufacturing. – 2020. – №36. – P. 115-124.

12. Dahmen T. Densification, microstructure, and mechanical properties of heat-treated MAR-M247 fabricated by Binder Jetting // Additive Manufacturing. – 2021. – №39. – P. 109-112.

13. Singh R. Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview // Materials Today: Proceedings. – 2019. – №26. – P. 305-307.

14. Raj B.A. Studies on SU718 alloy developed using laser sintering on the additive manufacturing process // Optik. – 2021. – №229. – P. 166-171.

15. Campos F. The influence of additive manufacturing on the micromilling machinability of Ti6Al4V: A comparison of SLM and commercial workpieces // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – №60. – P. 299-307.

16. Majeed A. Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2019. – №2. – P. 288-295.

17. Stašić J. The effect of NiB additive on surface morphology and microstructure of 316L stainless steel single tracks and layers obtained by SLM // Surface and Coatings Technology. – 2016. – №307. – P.407-417.

18. Anand M. Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review // Optics and Laser Technology. – 2021. – №139. – P. 106-109.

19. Rafieazad M. On microstructure and early stage corrosion performance of heat-treated direct metal laser sintered AlSi10Mg // Additive Manufacturing. – 2019. – №28. – P. 107-119.

20. Masoomi M. Laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V parts: Thermal modeling and mechanical implications // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2017. – №118-119. – P. 73-90.
21. Gu D. Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS // *Applied Surface Science*. – 2008. – №255. – P. 1880-1887.
22. Galati M. Surface roughness prediction model for Electron Beam Melting (EBM) processing Ti6Al4V // *Precision Engineering*. – 2021. – №69. – P. 19-28.
23. Hashmi S. *Comprehensive materials processing*. – Elsevier, 2014. – 552 p.
24. Bournias-Varotsis, A. Ultrasonic Additive Manufacturing as a form-then-bond process for embedding electronic circuitry into a metal matrix // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – №32. – P. 664-675.
25. Friel R.J. Ultrasonic additive manufacturing A hybrid production process for novel functional products // *Procedia CIRP*. – 2013. – №6. – P. 35-40.
26. Janaki G.D. Effect of process parameters on bond formation during ultrasonic consolidation of aluminum alloy 3003 // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2006. – №25. – P. 221-238.
27. Shimizu S. Mechanism of weld formation during very-high-power ultrasonic additive manufacturing of Al alloy 6061 // *Acta Materialia*. – 2014. – №74. – P. 234-243.
28. Levy A. Ultrasonic additive manufacturing of steel: Method, post-processing treatments and properties // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – №256. – P. 183-189.
29. Sridharan N. Microstructure and mechanical property characterisation of aluminium–steel joints fabricated using ultrasonic additive manufacturing // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2017. – №22. – P. 373-380.

30. Wolcott P.J. Characterisation of Al–Ti dissimilar material joints fabricated using ultrasonic additive manufacturing // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2016. – №21. – P. 114-123.
31. Hehr A. Interfacial shear strength estimates of NiTi-Al matrix composites fabricated via ultrasonic additive manufacturing // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – №77. – P. 199-208.
32. Hahnen R. NiTi-Al interface strength in ultrasonic additive manufacturing composites // *Composites Part B: Engineering*. – 2014. – №59. – P. 101-108.
33. Wang C. Wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti-6Al-4V // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – №293. – P. 117080.
34. Xia C. A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2020. – №57. – P. 31-45.
35. Baufeld B. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – №211. – P. 1146-1158.
36. Norstrom L.A. Thermal-fatigue behavior of hot-worktool steels // *Metals Technol.* – 1981. – №8. – P. 376–381.
37. Wang Li, Chen Y. High-temperature properties and microstructural stability of the AISI H13 hot-work tool steel processed by selective laser melting // *Metall. Mater. Trans.* – 2019. – №50. – P. 531–542.
38. Zhou Y., Zeng X., Yang Z. Effect of crystallographic textures on thermal anisotropy of selective laser melted Cu-2.4Ni-0.7Si alloy // *J. Alloy. Compd.* – 2018. – №743. – P. 258–261.
39. Dilip G.D. Selective laser melting of HY100 steel: process parameters, microstructure and mechanical properties // *Addit. Manuf.* – 2017. – №13. – P. 49–60.

## Приложение А

(справочное)

### Formation of microstructure of high-speed steel 10P6M5 during selective electron beam cladding.

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ11	Никифоров Илья Игоревич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Першина А.А.	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Щеголихина Ю.В.	к.ф.н.		

## ABSTRACT

Final qualifying work 116 p., 29 fig., 20 table., 39 sources, 1 adj.

Keywords: ZTV, cast core, microstructure, microhardness.

The object of the study are 10P6M5 steel samples obtained by electron beam additive technology.

The purpose of the work is to study the structure and properties of products based on 10P6M5 steel during vacuum additive cultivation.

In the course of the work, studies of properties in different layers of the sample, according to the height of the surfacing, were carried out.

As a result of the study, based on the data obtained in the work, it is possible to justify the 2 most rational modes of processing a previously deposited coating with a pulsed electron beam. The first: this is a processing mode with a beam current of up to 64 mA, which makes it possible to obtain a dispersed structure in a cast core with a large volume of residual austenite and, consequently, low hardness. The second mode is at a beam current of 64...78 mA. It promotes the formation of latent-needle martensite in the cast core with a low content of residual austenite (~7...7.5 GPa).

The final qualifying work was done in a MicrosoftWord7.0 text editor, the photos were obtained using an OLYMPUS GX51 microscope.

The microhardness of the samples was measured on the PMT-3 device.

## **1.1 Analysis of the current state of additive manufacturing. Formation of volumetric objects and coatings using direct energy and metal deposition methods**

Additive manufacturing is a digital manufacturing technology that combines equipment, computers, software control, and materials used in advanced industrial sectors over the past 30 years. This method allows for the creation of complex geometric objects that are impossible to produce using traditional methods and enables rapid prototyping [3]. Currently, metallic, polymer, and ceramic materials are used for additive manufacturing of products [4].

The use of additive technologies can significantly reduce the number of components, eliminating the need to assemble multiple parts together and allowing for the production of complex multi-component parts. Additionally, parts can be produced on-demand, reducing inventory of spare parts and lead time for critical or obsolete component replacement. That is why additive manufacturing is widely recognized as a new paradigm for producing high-performance components in various industries, such as aviation, medical, energy, and automotive [5].

The basic concept of the additive manufacturing process can be illustrated by a simple diagram shown in Figure 1.1.

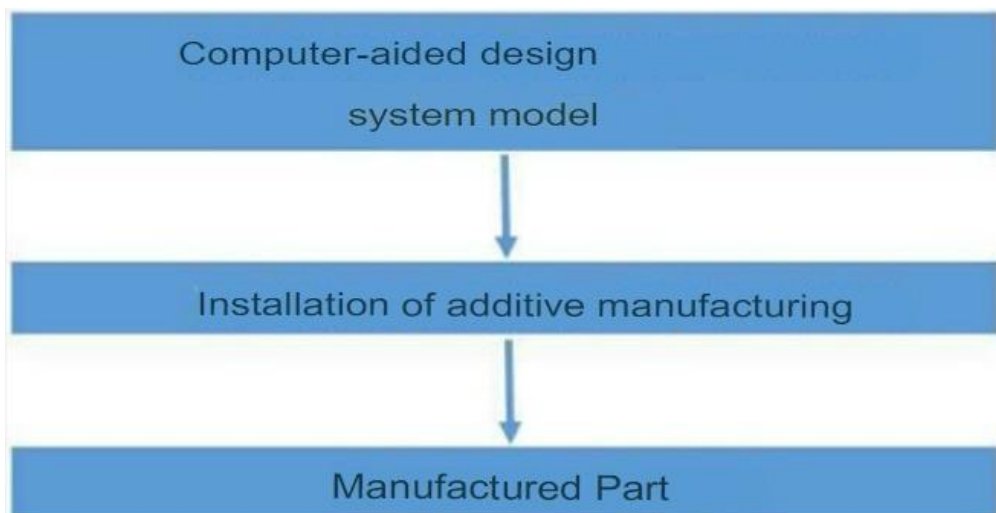


Figure 1.1 – Diagram of the additive manufacturing process [6].

The system of metal additive manufacturing is based on melting metal raw material (wire, rod, or powder) and depositing it onto a substrate through melting to create the desired geometry and properties. However, each type of technology has its unique features. During the printing process, phase transformations occur due to the repeated deposition of layers and rapid solidification, which depend on the equipment, geometry, and printing parameters.

These variables influence the microstructure, which can contain elongated columnar grains, pores, and cracks, thereby affecting the mechanical properties of the material. Nevertheless, metal products manufactured using additive technologies generally have a finer microstructure compared to traditionally manufactured counterparts, and thus, they can exhibit higher tensile strength and yield strength [3].

According to the diagram presented in Figure 1.2, four technologies of metal additive processes can be identified: binder jetting, substrate synthesis, sheet lamination, and direct energy and material deposition.

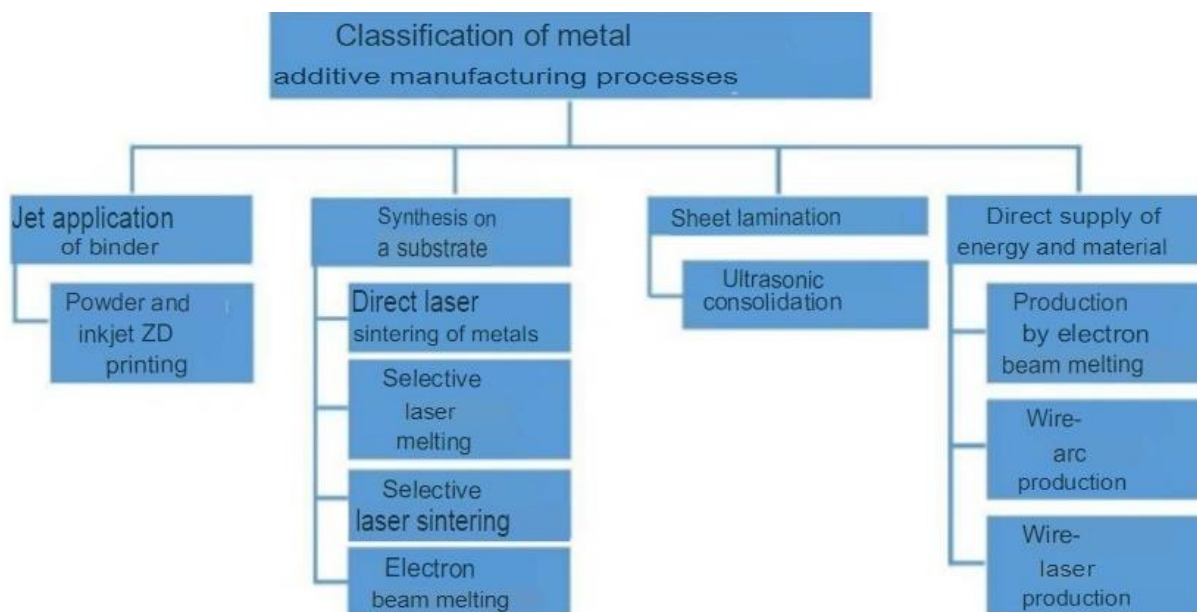
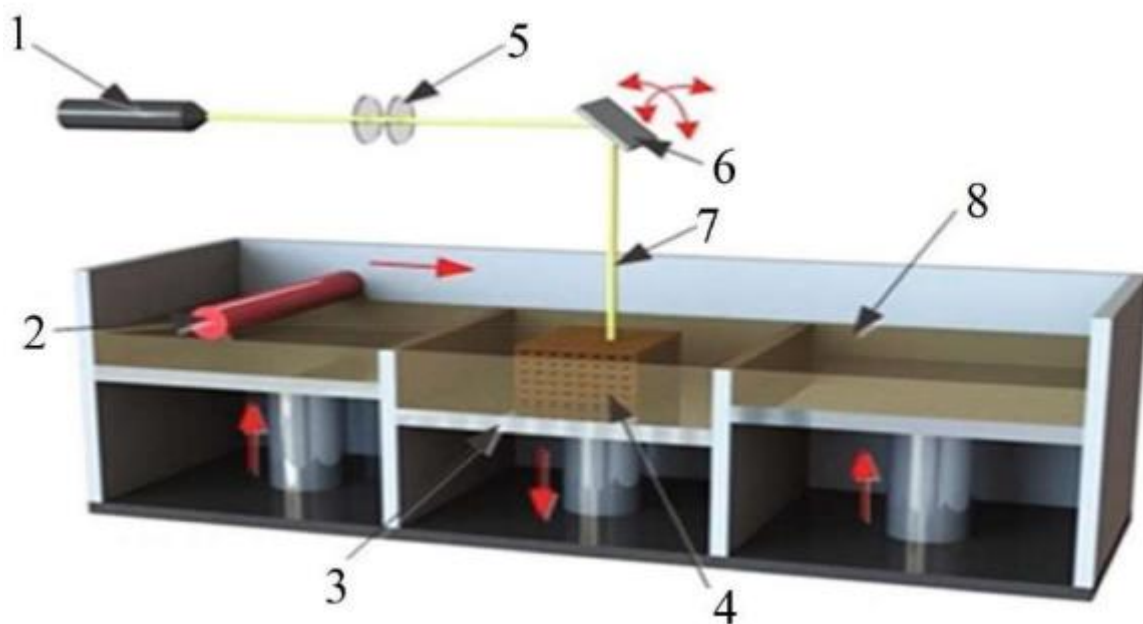


Figure 1.2 – Classification of metal additive manufacturing technologies [7, 8]

The principle of the binder jetting technology includes the following: a sticky binder agent is selectively applied to thin layers of powdered material. The printing head moves over the platform, depositing drops of the binder agent onto the layer of material. After the first layer is applied, the platform is lowered by the thickness of

one layer, and a new layer of powder is spread. This process is repeated until the completion of the object [9]. Stainless steel [10], aluminum [11], nickel [12], and heat-resistant alloys [9] have gained particular popularity as metallic materials manufactured using this method.

Selective laser melting is another method of additive manufacturing, in which the surface of a previously applied layer of powdered material is selectively or fully melted using a laser or an electron beam [13]. Figure 1.3 illustrates the selective laser melting process. An external heat source is required during the selective laser melting process to melt or fuse the powder and form the desired components.



1 – laser, 2 – leveling roller, 3 – build platform, 4 – scaffold, 5 – lenses, 6 – X-Y scanning mirror, 7 – laser beam, 8 – substrate

Figure 1.3 – Additive Manufacturing Process by Selective Laser Melting [13]

One of the substrate synthesis technologies is selective laser sintering. In this method, a powdery material is used and fused together using a laser. The powder is heated to a temperature close to the melting point of the metal/ally, leveled by a roller, and the laser beam sinters the desired layer contour. This method is used for manufacturing products from a nickel alloy [14].

Selective laser melting differs from selective laser sintering in that it is faster but requires inert gases for the laser. The key difference is that in the printing



process, the powder is not melted but fused together. In selective laser sintering, a laser with a set of lenses focused on the powdery material is positioned from the top. Once the layer solidifies, the assembly platform is lowered, and a recoating lever creates a new layer on top. This entire process is repeated until the entire part is completed. This method is used for manufacturing parts from Ti6Al4V alloy [15], AlSi10Mg [16], Inconel 718, and 316L steel [17].

Direct metal laser sintering is an additive manufacturing method in which the heat source is a laser, and the object is created using metallic powders. The setup places the object on a movable platform by applying additional layers of material, each with the same thickness. A high-power laser directly impacts the powder layer, melting the metal according to the trajectory defined by the computer-aided design system. This process continues layer by layer until the object is fully manufactured according to the desired design. In this printing method, it is possible to control the porosity of each layer. The key drawback is that parts produced by laser sintering lack homogeneity and therefore do not achieve the same strength properties as cast samples or parts produced by subtractive methods [13, 18]. This method is used for manufacturing parts from aluminum alloy [19], titanium [20], and stainless steel [21].

Electron beam melting is a type of additive manufacturing where the energy source for the melting process is an electron beam emitted by a tungsten filament and controlled by a coil to create a three-dimensional object from metal powder [13]. This technology has been patented by Arcam since 1997. The main drawback of this technology is the roughness and waviness of the overall surface structure. In the article [22], an attempt was made to predict the surface roughness of the titanium alloy Ti-6Al-4V using this method. Based on the conducted research, analytical models were proposed, showing that different surface roughness values can be achieved by changing the orientation or inclination angle of the surface. Currently, electron beam melting is used to produce parts from Ti-6Al-4V, Ti-48Al, Co-Cr-Mo, Inconel 625 and 718, and copper [23].

Ultrasonic consolidation utilizes the principle of ultrasonic welding with layer-by-layer bonding of thin metal foils and periodic treatment (continuous cleaning of metal foils) to create the desired three-dimensional shape. During the joining stage, a textured machine, which serves as a sonotrode, is pressed with a constant force against the metal foil, held in place by a clamping mechanism. The sonotrode moves across the foil, vibrating at a constant frequency (approximately 20 kHz) perpendicular to the direction of movement, as shown in Figure 1.4. This leads to the formation of a solid-state bond between the interface surfaces of the foil and the metal substrate. The process is then repeated until the desired height of the object is achieved. This technology is applicable to aluminum alloys [24-27], steel [28], Al-Fe [29], Al-Ti [30], as well as NiTi-Al composites [31, 32].

## **1.2 Electron beam technology and its application**

Electron beam deposition and additive manufacturing overcome some of the disadvantages associated with arc and laser processes, as they are not dependent on the reflectivity of the metal or subject to oxidation due to the printing process being carried out in a vacuum chamber. Furthermore, it is expected that the preheating commonly used in electron beam wire-based additive technology will help reduce residual stresses caused by rapid cooling. This technology has been successfully applied to the production of parts made from steel, aluminum alloys, pure copper, copper, and titanium alloys [33]. A high-power electron beam is used in a vacuum to selectively heat and melt the substrate material and the wire filament. Both standard powders and specially formulated mixtures can be used as the filament.

Working in a vacuum provides a clean manufacturing environment and eliminates the need for consumable shielding gas typically used in laser deposition systems. The electron beam wire-based production process is nearly 99% efficient in terms of raw material consumption and approaches 95% efficiency in energy utilization. The electron beam interacts effectively with any electrically conductive material, including highly reflective alloys such as aluminum and copper.

Currently, the company Sciaky has mastered the carefully refined process of electron beam additive manufacturing, taking into account research trends and challenges in part production. Sciaky helps a major automobile manufacturer reduce the time required for tool creation and repair, as well as providing the capability to print large-scale, batch-produced parts.

### **1.2.1 Selective electron beam melting**

Selective laser melting (SLM) and selective electron beam melting (SEBM) are relatively new and rapidly advancing additive manufacturing technologies that enable the production of highly complex parts, even from materials that are difficult to process using traditional methods. These technologies operate by selectively melting a powdered material based on a computer model. By adjusting the build parameters, it is possible to create non-equilibrium material structures.

During the manufacturing process of a part using electron beam melting, a powerful electron beam scans the surface, selectively melting the powdered material. As new layers are added, previous layers are remelted or subjected to multiple heating and cooling cycles. This can lead to significant changes in the material structure depending on the number of heating and cooling cycles.

In the case of alloyed steels processed using electron beam melting, thermal cycling conditions can lead to the precipitation of dispersed carbide phases from a supersaturated solid solution matrix. This, in turn, affects the structural and phase composition, as well as the overall properties of the material.

## **1.3 Tool steels in additive manufacturing and surfacing**

Currently, the production of tools and parts from tool steel has a wide scope. This is due to the convenience of reproducing various geometric designs without the

need for casting molds, which is important for the production of small-batch tools. Additionally, the printing speed and the quality of the resulting structure are favorable. It can be said that instead of developing a technological process for tool manufacturing or complex deposition of the cutting edge onto the substrate, it is sufficient to master the selective melting technology, which allows for the rapid and cost-effective modeling and production of the necessary components.

While the production of new units and the restoration of cutting edges are well understood, the application of a tool steel coating to increase the wear resistance of friction surfaces has been poorly studied. The most relevant topics related to the deposition of tool steels and the investigation of their properties are presented in this subsection.

### **1.3.1 Properties, microstructure and influence of subsequent heat treatment of products obtained by laser selective melting of tool steels, and its current state on the example of steel H13**

H13 is one of the most widely used hot work tool steels (the closest analogue being 4X5MΦ1C), possessing excellent strength at high temperatures, resistance to thermal shocks, and thermal stability [34]. Additive manufacturing for these steels allows for the design and production of hot work dies with cooling channels, which enhances cooling efficiency and speeds up the working cycle of processes such as die casting and forging. Therefore, in recent years, there has been increasing interest in H13 parts processed using additive methods, used in industrial dies.

Typically, H13 is used in a quenched and tempered state with a microstructure consisting of a plate martensitic matrix and secondary carbide precipitates. The microstructure of additively manufactured H13 significantly differs from that of cast parts. Taking selective laser melting as an example, the microstructure of H13 usually consists of alternating strips of martensite and quenched martensite, standing perpendicular to the build direction. This is a result of the remelting and reheating effects of the laser beam on neighboring layers during the deposition [35].

Additionally, a unique cellular structure with a significant amount of retained austenite (up to 25%) has been found in H13 due to the extremely high cooling rate during processing.

In terms of mechanical properties, H13 exhibits equal or superior strength compared to forged counterparts and demonstrates property anisotropy when subjected to tensile loading in different planes.

For hot work dies, thermal properties of the material also play a significant role, such as cooling efficiency and thermal stability of the matrix. However, the thermal properties of quenched tool steels are still not well-studied. For an alloy like H13 steel, thermal conductivity strongly depends on the microstructure, which is further influenced by the processing method.

As mentioned earlier, selective laser melting results in H13 microstructures that are significantly different from those processed using conventional methods. Moreover, subsequent heat treatment further modifies the microstructure in the final form and, consequently, the thermal conductivity. Reports on the thermal properties of SLM aluminum alloys, copper-based alloys, and Ni-based superalloys indicate the presence of such effects [36]. However, little is known about the thermal conductivity of H13.

The present study describes the effects of selective laser melting on the thermal and mechanical properties of the obtained samples. The thermal conductivity of H13 tool steel is correlated with the unique microstructures in the as-built and post-heat-treated conditions.

In the investigation of H13 properties, H13 steel powders with a particle size range of 15-53  $\mu\text{m}$  were used. The samples were cut from the as-built parts on an erosion machine, resulting in dimensions of 10x10x10 mm. Various laser scan speeds, controlled by line energy, were applied to the samples. Two different heat treatments were performed: austenitization at 1020°C for 70 minutes followed by quenching, and double tempering at 585°C for 2.5 hours, as well as a dual direct thermal treatment at 585°C for 2.5 hours.

The average porosity, calculated from optical micrographs, and relative density of the obtained samples are presented in Figure 1.4.

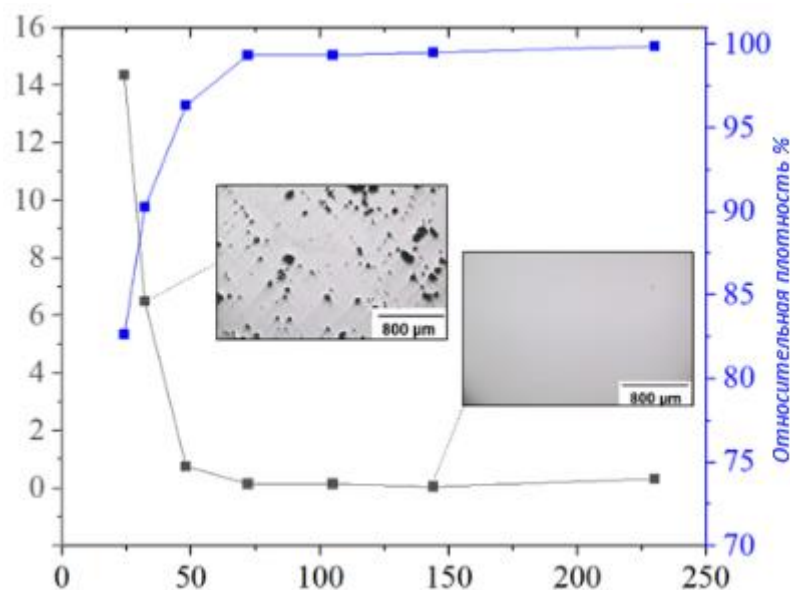


Figure 1.4 – Porosity and relative density of H13 steel samples for different line energies of selective laser melting

The general trends in porosity and relative density variation with line energy are consistent. The lowest line energy of 24 J/mm results in high porosity of 14.4% and low relative density of 82.6%, likely due to insufficient melting. For samples with line energies above 48 J/mm, the porosity levels are less than 1%, and with 105 J/mm, the relative density exceeds 99%.

The optical micrograph for the first type of thermal treatment is shown in Figure 1.5, demonstrating the typical morphology of melted pools. Interlayer pores following the boundaries of the melt pool can be observed in the highlighted area. Alternating bright and dark regions revealed by etching correspond to fresh martensite and quenched martensite, respectively. Similar banded features have been widely observed in martensitic steels, which result from thermal cycles during the additive process. During processing, the solidified layer is melted and reheated when scanning adjacent areas and subsequent layers with the laser beam, leading to its own heat treatment effect and causing martensite softening and carbide precipitation.

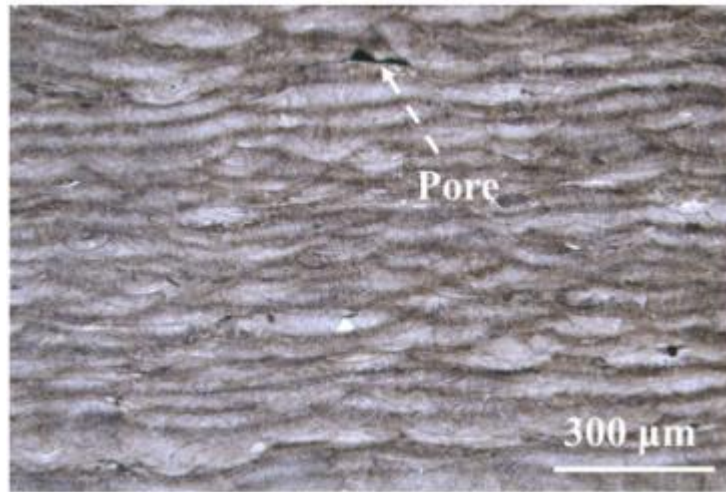


Figure 1.5 – Microstructure of the sample obtained using the first thermal treatment method

Micrographs obtained from scanning electron microscopy using backscattered electron signal are shown in Figure 1.6 for samples fabricated with different line energies for the first thermal treatment method.

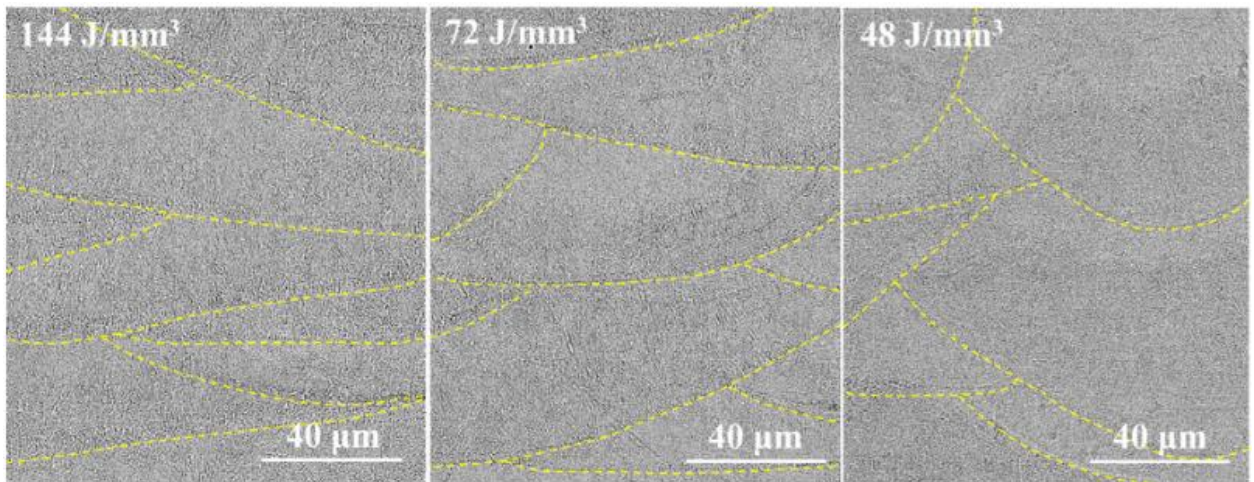


Figure 1.6 – Scanning electron microscope micrographs of the samples with the first type of thermal treatment.

The overall microstructure is characterized by equiaxed and columnar morphology, with grain size and width of columnar grains at the micron level. Equiaxed regions are located at the bottom of the melt layers due to a higher temperature gradient during solidification, while columnar regions are found at the top of the melt pools where the temperature gradient is relatively smaller. Such an equiaxed-columnar structure is unique to forged martensitic steels and is a result of

the overall high cooling rate. Comparing the microstructures of samples processed at different speeds, it can be observed that the number of areas with columnar structures decreases as the line energy decreases. With a given laser power, a higher melting speed, i.e., lower line energy, leads to faster solidification and cooling, thus resulting in a finer microstructure.

Additionally, the microstructures of samples after thermal treatment can be examined, as shown in Figure 1.7, where DT refers to the first type of thermal treatment, and QT refers to the second type.

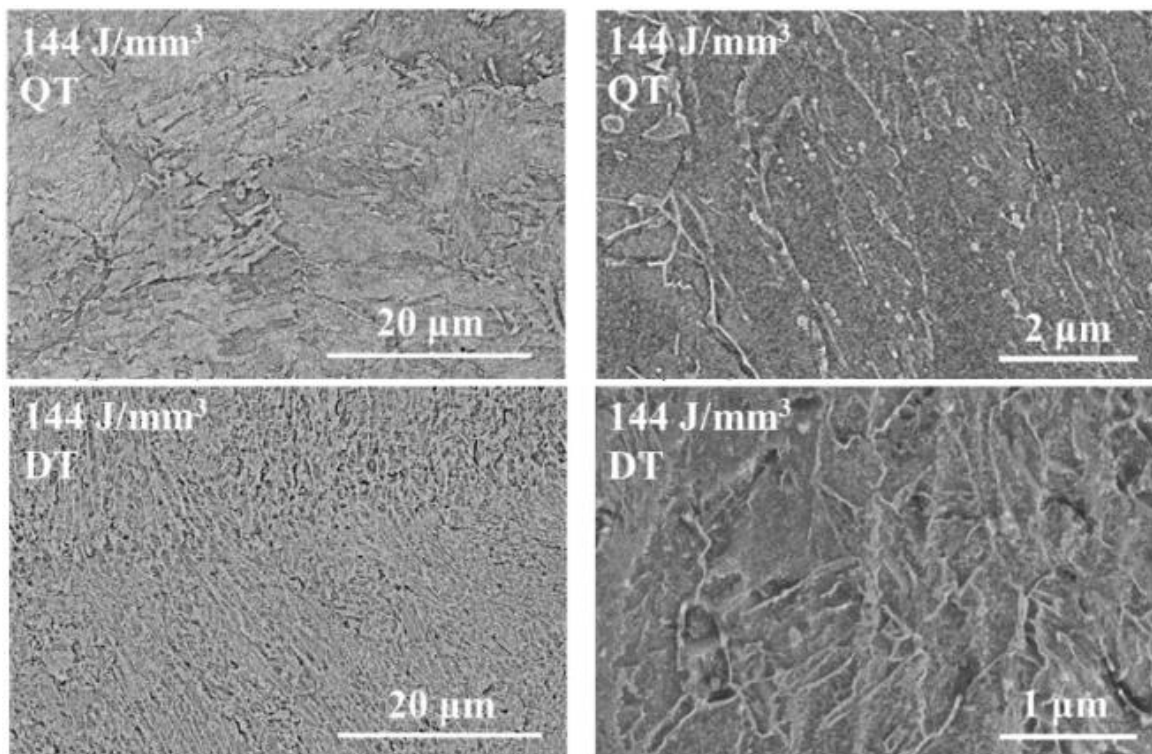
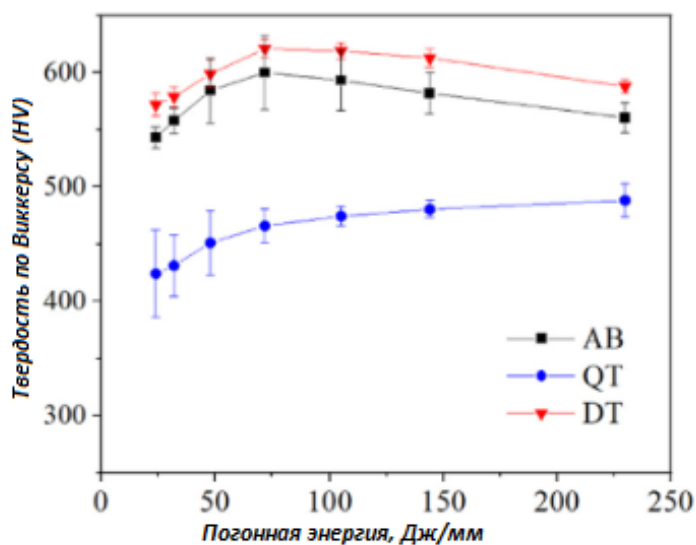


Figure 1.7 – Microstructures after thermal treatment

The QT condition demonstrates a martensitic microstructure that resembles traditionally processed H13, and the features of additive processing, such as melt pools and cellular-columnar structures, have disappeared. During QT, the subsequent austenitization at 1020°C for 70 minutes largely removed the unique microstructure. Austenite grains larger than 10 μm formed during re-austenitization, and the prior grain boundaries of austenite can still be identified. In contrast, during DT, without subsequent austenitization, the tempering at 585°C did not significantly alter the microstructure. Melt pools and traces of cellular-columnar structures are



still visible in the DT microstructure. These effects are similar to the influence of subsequent layers on previous ones. Microhardness investigation using Vickers hardness is presented in Figure 1.8 for samples without thermal treatment, demonstrating an initial increasing trend followed by a decrease with increasing scan speed. The lower hardness at very low scan speeds (24 and 48 J/mm) is likely due to high porosity, and the decrease in hardness at 72 J/mm is probably related to microstructural features.



AB – without thermal treatment, DT – first method, QT – second method

Figure 1.8 – Average hardness as a function of scan speed for different samples

Comparing the hardness in AB, QT, and DT conditions, the QT treatment significantly reduces the hardness values compared to the AB state, while DT moderately increases the hardness and maintains the hardness trend of AB with different grades. The lower hardness of the QT sample is likely due to the complete removal of the fine cellular-columnar microstructure during the austenitization at 1020°C, resulting in the formation of large austenite grains and relatively coarse martensitic microstructure after cooling. On the other hand, the DT sample exhibits higher hardness as it retains a fine martensitic microstructure. During tempering, martensite softening and secondary hardening due to carbide precipitation occur simultaneously, and the mechanical properties in the thermal treatment are the result of these two competing processes.

Tensile tests are presented by the authors for samples without thermal treatment with different scan speeds (Figure 1.9) and different thermal treatments with a specific scan speed (Figure 1.10).

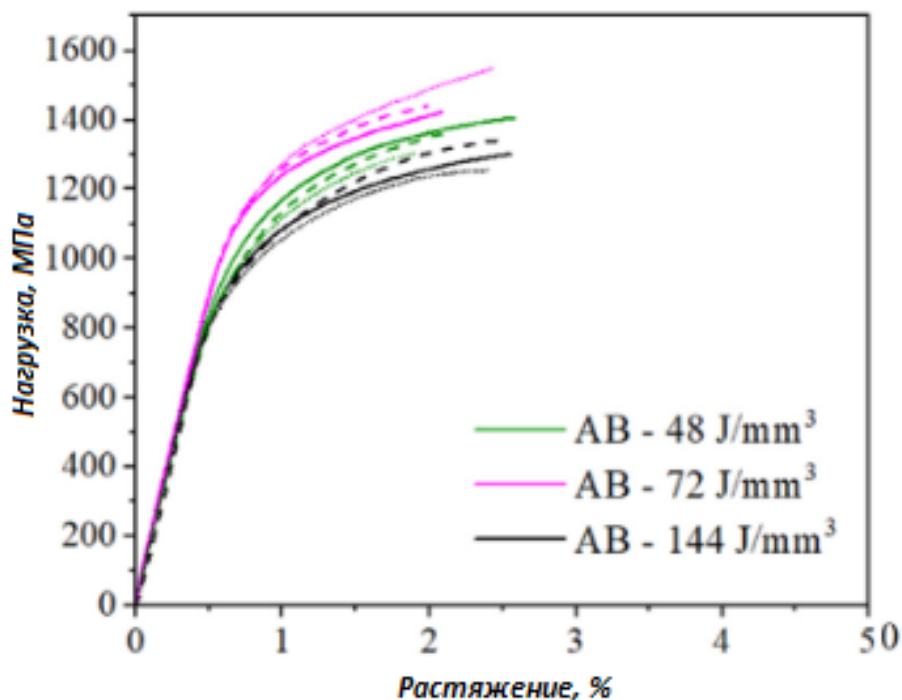


Figure 1.9 – Testing of N13 specimens at different scan speeds

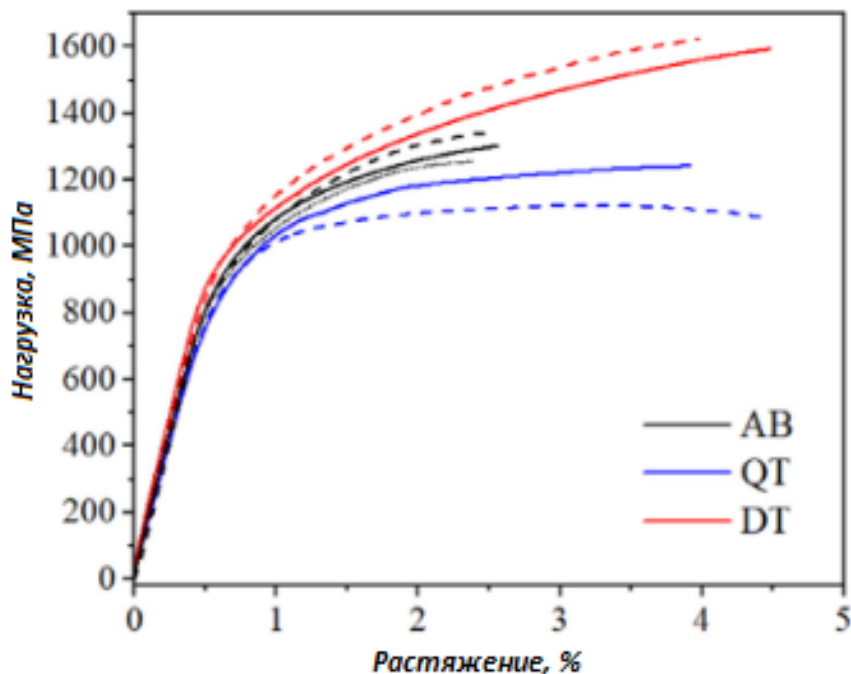


Figure 1.10 – Testing of N13 specimens for different thermal treatments

As the scan speed increases, the strength initially increases and then decreases. Regarding the effect of thermal treatment, compared to the AB state, the QT treatment leads to a slight decrease in strength, while the DT treatment increases strength.

Both QT and DT treatments increase deformation at fracture. Tensile test results generally correlate with hardness determination results. Fractographs of the specimens under tension are shown in Figure 1.11. For the specimen manufactured with low scan speed (a), numerous unmelted regions can be observed on the fracture surface, highlighted by circles. The specimens manufactured with medium and high scan speeds (b, c) contain less melted powder but exhibit secondary cracks along the boundaries of the melt pool, indicated by arrows. From Figure 1.11 (d, e), it can be seen that secondary cracks are still present in the QT and DT specimens. Although the QT treatment essentially removes the melt structure, it does not eliminate defects at the melt boundaries, thus secondary cracking still occurs during the tensile test.

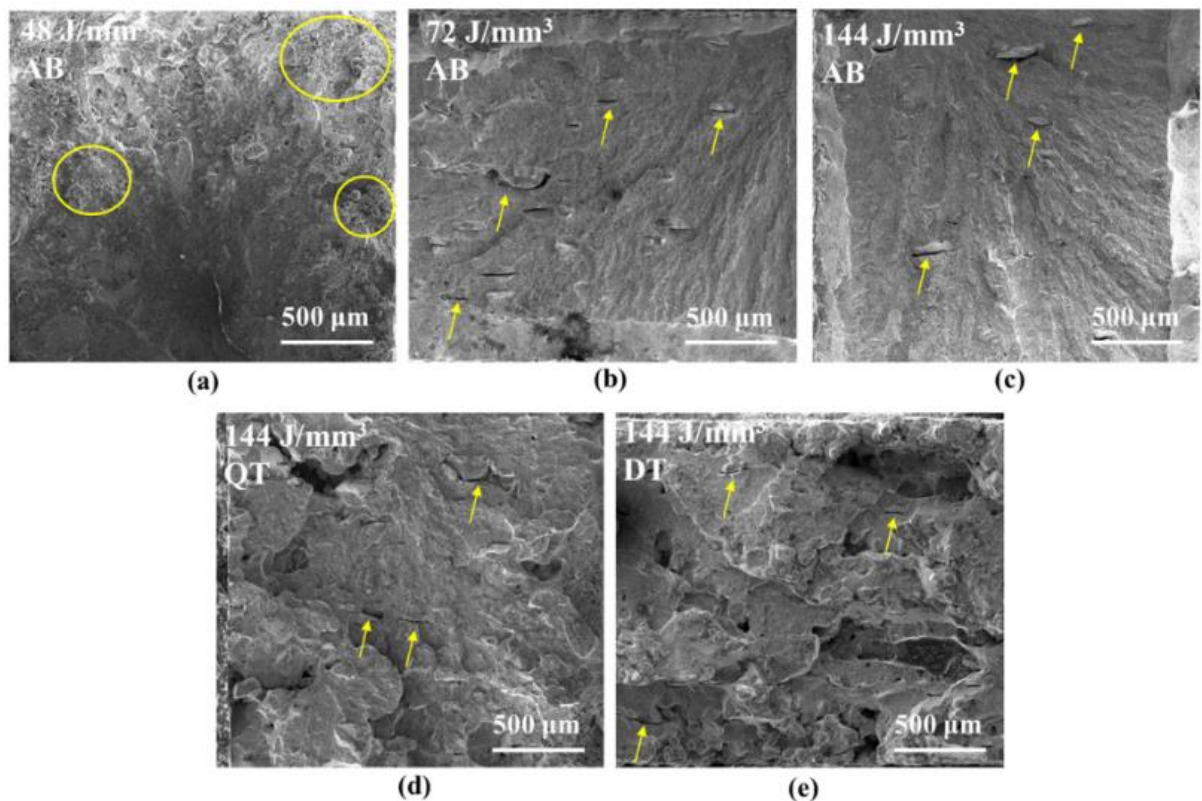


Figure 1.11 – Fractographs of fractured specimens obtained during tensile testing.

Thus, based on the data on thermal and mechanical properties comparing two heat treatment strategies, the properties of laser selective melting for H13 tool steel can be determined: DT is preferred for strength but results in slightly lower thermal conductivity. On the other hand, QT leads to lower strength but higher thermal conductivity, indicating the need for a compromise between strength and thermal conductivity when choosing the heat treatment strategy. As for thermal conductivity, the influence of scan speed is significant only in the low range values where porosity dominates and is negligible in the high range of scan speeds where overall dense materials are obtained.