

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние термической обработки на структурно-фазовое состояние аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, полученной методом электроннолучевой наплавки УДК 669.15-194.56

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Рудик Андрей Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зам.директора ИФПМ СО РАН	Колубаев Е.А.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Рагозин Д.В	к.и.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Исаева Е.С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	к.ф.-м.н.		

Томск – 2019г.

Планируемые результаты обучения

Код	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять <i>глубокие</i> естественно научные, математические и инженерные <i>знания</i> при разработке наукоемких технологий изготовления и обработки новых материалов и изделий из них	Требования ФГОС (ОК-1, ОПК-4, ПК-2, 3, 11, 12) ¹ , Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий машиностроительного производства для решения <i>междисциплинарных</i> инженерных задач	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, ПК-1, 5, 8, 9, 11, 12, 13), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Ставить и решать <i>инновационные задачи инженерного анализа</i> , связанные с созданием и обработкой материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-14, ПК-9, 11), Критерий 5 АИОР (пп.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Разрабатывать технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое</i> оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на <i>мировом рынке</i>	Требования ФГОС (ОК-7, ПК-5, 6, 11, ОПК-11, 12), Критерий 5 АИОР (п.1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

¹ В скобках указаны коды компетенций ФГОС по направлению 15.04.01 «Машиностроение», квалификация «магистр».

	машиностроительного производства, с подготовкой и анализом технической документации	
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования, расчеты на прочность в области современных технологий обработки материалов, производства узлов, деталей и конструкций в машиностроении	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, 12, ПК-8, 13), Критерий 5 АИОР (п.1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современное высокотехнологичное производство, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ОК-4, ОПК-6, ПК-3, 5, 7), Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
	Универсальные компетенции	
P7	Использовать глубокие знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ОПК-7, 8, ПК-3, 4, 7), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-8, ОПК-3, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Эффективно работать	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-5, 6, 10,

	индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации.	ПК-10), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3,), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Демонстрировать <i>глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов</i> инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i> .	Требования ФГОС (ОК-2, ОПК-5, 6, 9, ПК-5, 10), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	<i>Самостоятельно учиться</i> и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3, 4, 6, ОПК-10, ПК-7), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1.Литературный обзор: методика аддитивного производства , математическая модель процесса электронно-лучевой объемной наплавки, трехмерное электронно-лучевое плавление. существующие технологии Материалы используемые для электронно-лучевой наплавки Основные характеристики нержавеющей стали 12X18H10T 2. Постановка задачи, методика исследования: технологические параметры трехмерной печати, методы подготовки и исследования 3D-напечатанных образцов. 3.Экспериментальная часть: исследование микроструктуры образцов до термообработки, влияние термической обработки на структурное состояние наплавленного металла аустенитной стали 12X18H10T, заключение 4.Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 5.Социальная ответственность. 6.Заключение и выводы.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1.Цель и задачи; 2.Методы проведения исследования; 3. Общая схема процесса выращивания образца; 4.Перечень оборудования; 5.Схема расположения образца; 5.Режимы термообработки; 6.Серия снимков микроструктуры образцов в зависимости от режима термообработки; 7.Показатели твердости; 8.Выводы по работе
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
1.Литературный обзор; 2.Материалы и методы исследования; 3.Экспериментальная часть. Выводы;	Колубаев Е.А.
4.Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Рагозин Д.В.
5.Социальная ответственность.	Исаева Е.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Литературный обзор	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.09.2018

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	к.ф.-м.н.		
Зам.директора ИФПМ СО РАН	Колубаев Е.А.	д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Рудик Андрей Александрович		

Оглавление

Планируемые результаты обучения	2
Задание на выполнение выпускной квалификационной работы	5
Реферат	11
Essay	13
Введение	15
1 Литературный обзор	17
1.1 Методика аддитивного производства	17
1.2 Математическая модель процесса электронно-лучевой объемной наплавки.....	19
1.3 Трехмерное электронно-лучевое плавление. Существующие технологии	31
1.4 Материалы используемые для электронно-лучевой наплавки	37
1.5 Основные характеристики нержавеющей стали 12X18H10T	39
2 Постановка задачи. Материалы и методика исследования.....	44
2.1 Постановка задачи	44
2.2 Технологические параметры трехмерной печати	45
2.3 Методы подготовки и исследования 3D-напечатанных образцов.....	46
3 Экспериментальная часть	50
3.1 Исследование микроструктуры образцов до термообработки	50
3.2 Влияние термической обработки на структурное состояние наплавленного металла аустенитной стали 12X18H10T	51
Заключение.....	55
Задание раздела	57
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	58
4.1 Организация и планирование работ	59
4.1.1 Продолжительность этапов работ.....	60
4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	67

4.2.1 Расчет затрат на материалы	67
4.2.2 Расчет заработной платы	68
4.2.3 Расчет затрат на социальный налог	69
4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	69
4.2.5 Расчет амортизационных расходов	71
4.2.6 Расчет прочих расходов	72
4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки	72
4.2.8 Расчет прибыли	73
4.2.9 Расчет НДС	74
4.2.10 Цена разработки НИР	74
Задание для раздела	75
Социальная ответственность	77
Введение	77
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	77
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	77
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	79
5.2 Производственная безопасность	80
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования	80
5.2.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	81
5.2.2.1 Превышение уровня шума	82
5.2.2.2 Контакт с реактивом для травления образцов	83
5.2.2.3 Отклонение показателей микроклимата	83
5.2.2.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны	84
5.2.3 Анализ опасных факторов	87

5.2.3.1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	87
5.2.3.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	88
5.3 Экологическая безопасность	90
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	92
Вывод по разделу	95
Заключение	96
Список используемых источников	98
Приложение А	101
Chapter 1. Literary Review	102
Methods of additive production	102
Mathematical model of the electron-beam volume surfacing process.....	104

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 114 с., 20 рис., 21 табл., 20 источников.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, аддитивные технологии, электронно-лучевое плавление, термообработка, гомогенизация, микроструктура.

Объектом исследования являются образцы аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T, полученной методом объемного электронно-лучевого плавления.

Целью работы является изучение особенностей формирования структуры после термообработки в виде отжига при различных технологических режимах, при многопроходной вакуумной электронно-лучевой проволоочной наплавке аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T, а также исследование твердости после термообработки полученных образцов.

Методом послойной электронно-лучевой наплавки выращены образцы в виде заготовки бруска из проволоки нержавеющей стали аустенитного класса марки 12X18H10T. Изучены микроструктуры образцов полученных в поперечном сечении заготовки (XZ). Образец можно разделить на две основные зоны заготовки, отличающиеся структурой и свойствами: основа и корневая зона сварных швов. Структура основы представляет собой дендриты (столбчатая структура), главные оси которых ориентированы в направлении теплоотвода при кристаллизации. Структура корневой зоны представляет собой равноосные кристаллы, имеющие так же, как и основа, дендритное, но более дисперсное строение. После гомогенизирующего отжига с различной выдержкой при разных температурных режимах было выявлено, что на третьем режиме термообработки начинают появляться кардинальные изменения микроструктуры, а именно зарождается процесс

рекристаллизации. В ходе исследования было выявлено, что оптимальным режимом гомогенизирующего отжига является режим №6, при котором обнаружена преимущественно структура однофазного твердого раствора.

Области применения: аэрокосмическая, химическая, атомная, пищевая.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании изделий, превышающих механические свойства изделий, полученных традиционными методами.

ESSAY

Final qualifying work with.114, Fig.20 Table.21, Sources 20.

Keywords: austenitic stainless steel, additive technologies, electron beam melting, heat treatment, homogenization, microstructure.

The object of the study is samples of austenitic stainless steel 12X18H10T, obtained by the method of bulk electron beam melting.

The aim of the work is to study the features of structure formation after heat treatment in the form of annealing at various technological modes, with multi-pass vacuum electron-beam wire surfacing of austenitic 12X18H10T stainless steel, and the study of the hardness after heat treatment of the obtained samples as well.

By the method of layer-by-layer electron-beam surfacing, samples in the form of a bar stock from stainless steel wire of austenitic class of grade 12X18H10T were grown. The microstructures of the samples obtained in the cross section of the blank (XZ) were studied. The sample can be divided into two main areas of the workpiece, differing in structure and properties: the base and the root zone of the welds. The structure of the base is dendrites (columnar structure), the main axes of which are oriented in the direction of the heat sink during crystallization. The structure of the root zone is equiaxed crystals, which, like the base, have a dendritic, but more dispersed structure. After homogenizing annealing with different exposures at different temperature conditions, it was revealed that in the third heat treatment mode, cardinal changes in the microstructure begin to appear, namely, the process of recrystallization begins. The study revealed that the optimal mode of homogenizing annealing is mode No. 8, in which the structure of a single-phase solid solution was found predominantly.

Applications: aerospace, chemical, atomic, food.

The economic efficiency / importance of the work lies in the development and creation of products that exceed the mechanical properties of products, obtained by traditional methods.

ВВЕДЕНИЕ

Современные темпы развития промышленности требуют выбора технологий производства, требующих наименьших затрат и выполняемых в кратчайшие сроки. Наряду с новыми и передовыми технологиями можно отметить быстрое развитие аддитивных технологий, позволяющих создавать металлические изделия уникальной формы [1]. Они позволяют пересмотреть весь процесс технологического производства из широкого класса материалов, таких как, металлы, композиционные материалы, неметаллы керамики и т.д. Они позволяют подойти к новым методам конструирования, проектирования производственных процессов.

Технологии послойного синтеза — одно из наиболее динамично развивающихся направлений цифрового производства. Они позволяют значительно ускорить решение задач подготовки производства, а в ряде случаев уже активно применяются для производства готовой продукции и являются прорывными технологиями этого столетия.

Использование электронного луча как источника нагрева и исходного материала в виде металлической проволоки в разрезе аддитивных технологий позволяет обеспечить очень высокую скорость построения изделия, работу с крупными заготовками и огромную номенклатуру металлов и сплавов, с которыми можно работать [1–3]. Исследования возможностей и совершенствование этой технологии предполагает перспективы ее применения в авиа- и машиностроении как в качестве самостоятельного метода изготовления деталей, так и в комплексе с традиционными методами [4].

В данной работе материалом для исследования был сплав из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T, полученный методом электронно-лучевого плавления. Хромоникелевые сплавы на основе стали

являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в настоящее время в разных отраслях промышленности.

Целью работы являлось исследование микроструктуры образцов из сплава нержавеющей стали 12X18H10T, изготовленных послойным выращиванием посредством электроннолучевой проволочной аддитивной технологии.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.2 Методика аддитивного производства

3D-печать, как один из методов «аддитивного производства», основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически 3D-печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала. Хотя технология 3D-печати появилась еще в 80-х 72 годах прошлого века, широкое коммерческое распространение 3D-принтеры получили только в начале 2010-х.

Основным преимуществом данного процесса является возможность создания геометрических форм практически неограниченной сложности.

Основные методы представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные методы аддитивного производства [5].

Метод	Технология	Используемые материалы
1	2	3
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие, как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм методом электронно-лучевой плавки (EBF)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальтхромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий

1	2	3
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Основные преимущества аддитивных технологий заключаются в:

1. В исключении конфликта конструктор-технолог, поскольку обе функции может выполнять один специалист;
2. В возможности изготовления изделий сложной геометрической конфигурации, в т.ч. с внутренними каналами и полостями, с большой площадью поверхности, малым объемом;
3. В отсутствии необходимости изготовления инструментальной оснастки и литейных форм;
4. В минимизации потерь материала и производственных отходов;
5. В сокращении времени поставок сырья, уменьшении объемов склада;
6. В целесообразности при индивидуальном или мелкосерийном производстве;
7. В сокращении комплектующих частей создаваемых узлов и агрегатов;
8. В уменьшении количества технологических операций, автоматизации процесса, сокращения трудоемкости и времени изготовления.

Весь процесс аддитивного производства состоит из следующих этапов: разрабатывается 3D-модель детали с помощью программных средств объемного моделирования; объемная компьютерная модель конвертируется в общепринятый формат STL, загружаемый в память установки АП; ПО установки перед началом процесса производства режет виртуальную модель на слои необходимой толщины (алгоритмы нарезки у каждого производителя реализованы на основе собственных программных алгоритмов и запатентованы); затем происходит послойный процесс выращивания изделий на основе данных (обрабатываются «твердые» участки секции). Именно такой последовательный, многоуровневый подход к изготовлению объектов характеризует аддитивный принцип. После завершения процесса выращивания, при необходимости, проводится финишная пост-обработка [4]. Стадии процесса изображены на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Стадии процесса выращивания изделий [3].

1.2 Математическая модель процесса электронно-лучевой объемной наплавки

Для детального исследования процесса наплавки как объекта управления в указанной постановке задачи при исключении неконтролируемых возмущающих факторов и погрешностей измерений приборов предлагается использовать метод математического моделирования. Процесс теплопереноса в наплавляемой конструкции удобно описывать в

виде нестационарной задачи теплопроводности с движущимися во времени краевыми условиями, описывающими процесс введения присадочного материала. В декартовых координатах уравнение теплопроводности примет вид:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_v - \frac{\partial \psi_m(T)}{\partial t} L_m \rho(T), \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $c(T)$ – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); $\rho(T)$ – плотность вещества, кг/м³; q_v – количество теплоты, выделяемое внутренними источниками в единице объема в единицу времени при воздействии электронного луча на материал, Вт/м³; x, y, z – декартовы координаты текущей расчетной точки, м; L_m – скрытая теплота плавления металла, Дж/кг; $\psi_m(T)$ – доля расплава в двухфазной области, рассчитываемая в каждом контрольном объеме в каждый момент времени по формуле:

$$\psi_m(T) = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & T_s < T < T_L \\ 1, & T > T_L \end{cases} \quad (2)$$

Таблица 1.2 - Исходные данные для математической модели процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования

№	Параметр	Показатель	Единица измерения
1	2	3	4
1	Материал	Сталь 12Х18Н10Т	-
2	Теплоемкость при 20°С (1400°С)	110 (800)	Дж/(кг·К)
3	Теплопроводность при 20°С (1400°С)	11 (29)	Вт/(м·К)

1	2	3	4
4	Плотность	7800	кг/м ³
5	Скрытая теплота плавления	260	кДж/кг
6	Температура солидуса, T_s	1673	К
7	Температура ликвидуса, T_L	1729	К
8	Координатный шаг конечно-разностной сетки	0,125	мм
9	Временной шаг	0,0125	с
10	Скорость перемещения луча (и скорость подачи присадочного материала)	10–20	мм/с
11	Ускоряющее напряжение	60	кВ
12	Мощность пучка	0–1000	Вт
13	Эффективный радиус луча	0,25–1,5	мм

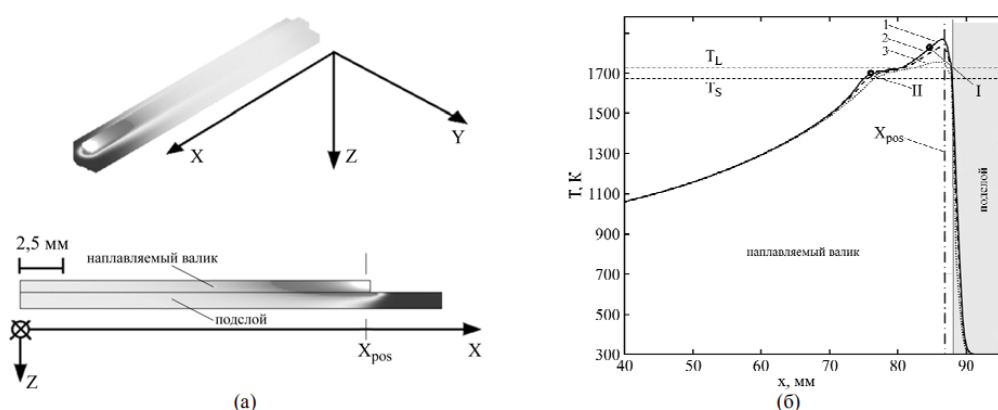


Рисунок 1.2 - Температурное поле (а) и распределения температуры вдоль оси x в квазистационарном режиме наплавки (б) при мощности пучка 800 Вт, эффективном радиусе пучка $r_{\text{eff}} = 1$ мм и скорости перемещения 17,5 мм/с: x_{pos} – x -координата оси пучка; 1 – распределение температуры вдоль оси x при $y = y_{\text{pos}}$ (на оси пучка); 2 – то же на расстоянии 0,5 мм от оси ($y = y_{\text{pos}} + 0,5$ мм); 3 – то же на расстоянии 1 мм от оси ($y = y_{\text{pos}} + 1$ мм); T_s – температура солидуса; T_L – температура ликвидуса; I, II – точки предполагаемого измерения температуры.

В последнем выражении T_s и T_L – соответственно температуры солидуса и ликвидуса присадочного материала, К. Функция распределения количества теплоты, непрерывно выделяющегося в приповерхностном слое

dz с z -координатой поверхности $z_{\text{пов}}$, имеет вид функции нормального распределения и определяется как:

$$q_v(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & z < z_{\text{пов}} \\ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{r_{\text{eff}}^2} \cdot I_b \cdot U_a \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_{\text{пов}}(t))^2 + (y-y_{\text{пов}}(t))^2}{r_{\text{eff}}^2}\right)} \cdot \frac{1}{dz}, & z = z_{\text{пов}}, \\ 0, & z > z_{\text{пов}} \end{cases} \quad (3)$$

где r_{eff} – эффективный радиус пучка; $x_{\text{пов}}(t)$, $y_{\text{пов}}(t)$ – координаты центра электронного пучка. На всех границах расчетной области задавались граничные условия Неймана. Задача, описываемая системой уравнений (1)–(3), решалась методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы и метода дробных шагов, реализованных в Microsoft Visual Studio. Данные, используемые при разработке модели, сведены в таблице. Процесс наплавки моделировался путем добавления на каждом временном шаге в область воздействия луча элемента высотой 1 мм, шириной 2,5 мм и длиной 0,125 мм. На рис. 1.2 а показаны внешний вид и геометрические размеры расчетной области в процессе наплавки, а также картина температурного поля, а на рис. 1.2 б – характерные для применяемых на практике режимов наплавки распределения температуры вдоль оси x на различном расстоянии от оси электронного пучка. Распределения температуры, приведенные на рис. 1.2, хорошо согласуются с экспериментальными данными и, несмотря на наличие областей с малыми производными температуры по координате x , которые соответствуют двухфазной зоне, можно считать, что в целом при постоянном токе луча температура падает монотонно по мере удаления от области торможения электронов. Этот факт является первым подтверждением возможности использования замкнутых систем для стабилизации режима электронно-лучевой наплавки.

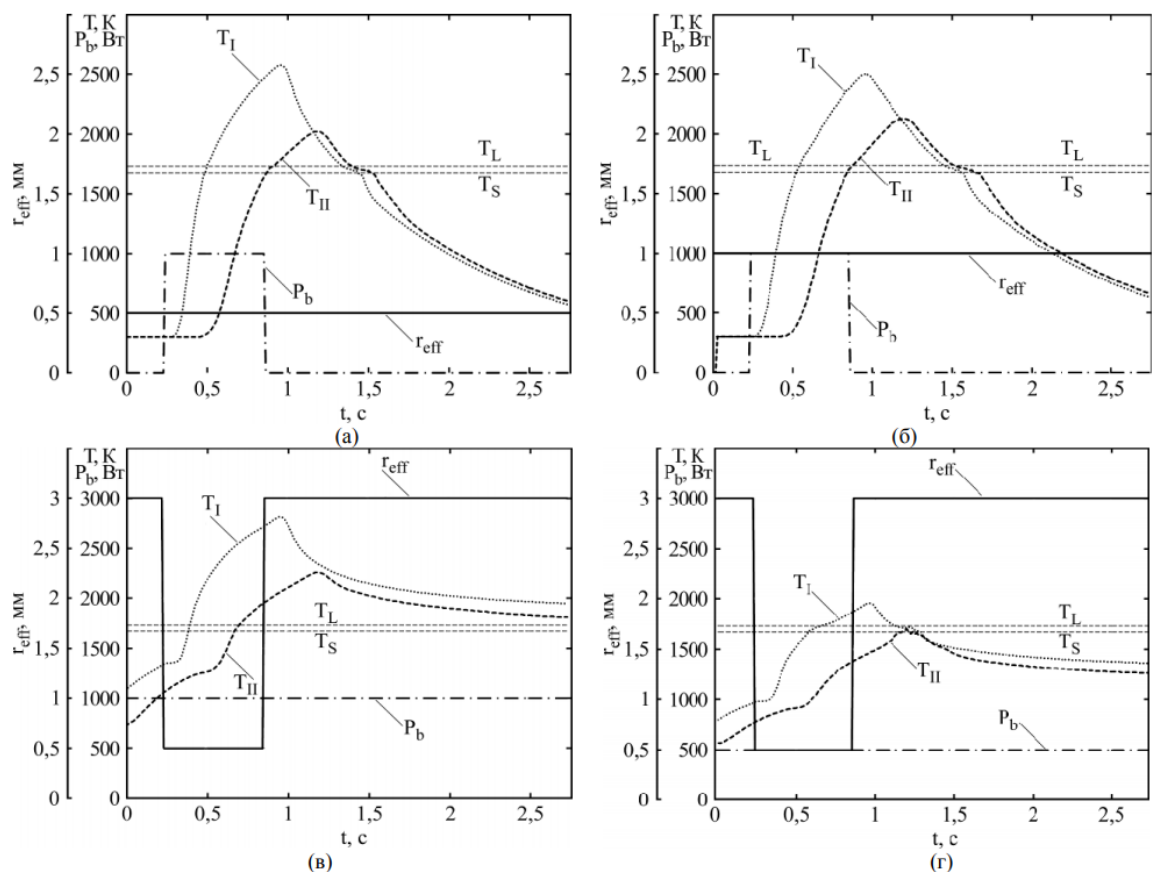


Рисунок 1.3 - Временные зависимости температур в точках I и II при:
 (а), (б) – ступенчатым изменении мощности пучка P_b ; (в), (г) – ступенчатым
 изменении эффективного радиуса пучка r_{eff} .

Более того, очевидно, что для измерения параметров жидкой ванны в процессе наплавки в простейшем случае достаточно проводить измерения температуры в двух характерных точках – точке, расположенной вблизи области воздействия луча (точка I на рисунке), – для измерения усредненной температуры металла, перегретого выше температуры T_L , а также в точке II, расположенной на некотором удалении от первой и соответственно от действующего луча. Температура в этой точке может, например, находиться в диапазоне между T_L и T_S , соответствующей двухфазной области или границе жидкой ванны. Однако для подтверждения технической реализуемости систем управления, использующих сигналы температур в указанных точках в качестве сигналов обратных связей, необходимы

исследования статических и динамических режимов работы описанного выше объекта управления.

Основной интерес представляет реакция объекта на ступенчатые входные воздействия по обоим каналам управления. На рисунке 1.3 показаны характерные изменения температур в точках I и II при ступенчатом изменении мощности пучка P_b , регулируемой за счет тока (рисунок 1.3а,б) и его эффективного радиуса r_{eff} (рис. 1.3в,г), изменяемого за счет тока фокусировки. Вид зависимостей температуры $T_I(t)$ и $T_{II}(t)$ остается практически неизменным при варьировании входных переменных P_b и r_{eff} в довольно широких пределах. Важный вывод, который был сделан в результате анализа временных зависимостей температуры $T_I(t)$ и $T_{II}(t)$ при различных значениях амплитуды P_b и r_{eff} , заключается в том, что постоянные времени нагрева материала в указанных точках не зависят от мощности луча или степени фокусировки, а определяются только поперечными размерами наплавленного валика, теплофизическими свойствами присадочного материала и скоростью перемещения луча. На рисунке 1.3 это подтверждается тем, что максимумы температуры T_I достигаются по истечении одного и того же временного интервала после подачи импульса тока луча (ступенчато возрастающая мощность P_b) или импульса тока фокусировки (ступенчато убывающий r_{eff}) вне зависимости от амплитудных значений второго, неизменяемого воздействия. На рис. 1.3 длительность этого интервала составляет 0,65 с. Аналогично максимум температуры T_{II} достигается спустя 0,95 с после прохождения переднего фронта импульса тока луча при постоянном токе фокусировки или импульса тока фокусировки при постоянном токе луча. Эти значения временных интервалов получены при моделировании наплавки валиков из стали 12X18H10T с поперечным сечением $2,5 \times 1$ мм со скоростью движения луча 17,5 мм/с.

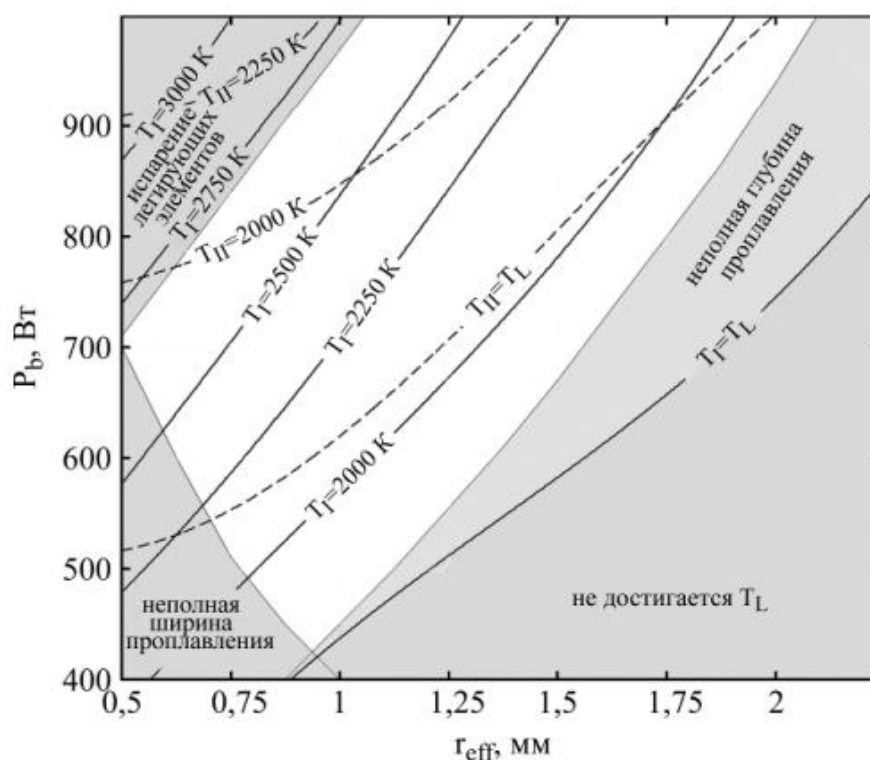


Рисунок 1.4 - Зависимости температуры T_I и T_{II} в точках, расположенных позади движущегося электронного пучка на расстоянии 3 и 8 мм в стационарном режиме жидкой ванны, от мощности луча P_b и его эффективного радиуса r_{eff} .

Ограничения диапазонов изменения мощности луча и его эффективного радиуса определяются необходимостью обеспечения полного проплавления подаваемого присадочного материала. Так, при слишком «острой» фокусировке пучка, то есть при малых значениях r_{eff} , возможна ситуация, при которой подаваемая проволока будет оплаиваться лишь частично, в центральной части. И, наоборот, при слишком «мягкой» фокусировке, то есть при больших значениях r_{eff} плотность теплового потока будет недостаточна для расплавления материала за время воздействия или будет оплаиваться только его приповерхностный слой. На рисунке 1.4 графически показаны полученные в результате проведения вычислительных экспериментов зависимости температуры в точке T_I , расположенной на расстоянии 3 мм позади оси симметрии луча на наплавляемом валике, и температуры в точке T_{II} , расположенной на расстоянии 8 мм позади оси

симметрии луча на наплавляемом валике, от двух основных влияющих факторов – мощности луча P_b и радиуса луча r_{eff} .

Все значения температур T_I и T_{II} рассчитаны для установившегося режима наплавки при исключении каких бы то ни было возмущающих факторов. Время достижения стационарного режима наплавки, при котором температуры T_I и T_{II} перестают изменяться во времени, – 1,75 с. Скорость движения луча – 17,5 мм/с. В результате экспериментов были получены две табличные функции поверхности $T_I = f(P_b, r_{eff})$ и $T_{II} = f(P_b, r_{eff})$. Для облегчения восприятия полученной в результате экспериментов информации на рис. 1.4 показаны только линии равной температуры для значений $T_I = T_L(1729K)$, 2000 К, 2250К, 2500 К, 2750 К и 3000 К, а также для $T_{II} = T_L$, 2000 К и 2250 К. Все промежуточные значения температур в двух точках могут быть получены методом линейной интерполяции.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что область изменения входных переменных является весьма ограниченной. Так, полное плавление присадочного материала обеспечивается при мощности не менее 430 Вт и радиусе луча 0,9 мм. Фокусировка луча при этой же мощности вызывает переход к режиму с неполной шириной проплавления, а расфокусировка – к оплавлению лишь тонкого приповерхностного слоя. Дальнейшее снижение плотности мощности луча (увеличение r_{eff}) приводит к снижению температуры в точке T_I ниже температуры ликвидуса. Следует отметить, что при указанной мощности луча температура T_{II} оказывается заметно ниже температуры ликвидуса и составляет примерно 1520 К. На практике переход к режиму с острой фокусировкой вызывает появление брызг металла и нестабильный режим формирования жидкой ванны, что обусловлено гидро- и газодинамическими процессами, не учитываемыми при моделировании в описываемой постановке.

С увеличением мощности луча диапазон регулирования степени фокусировки луча заметно увеличивается. Так, например, при мощности

луча 700 Вт радиус луча может варьироваться от 0,5 до 1,6 мм. Однако при дальнейшем повышении мощности область допустимых значений управляющих воздействий смещается в сторону увеличения радиуса луча. Это связано с тем, что при высоких мощностях и малых диаметрах луча температура расплава может достигать температуры испарения отдельных легирующих компонентов, что ведет к существенному изменению физико-механических свойств наплавляемого материала. В этом же диапазоне мощностей достижение температуры в точке ТІ выше температуры ликвидуса без перегрева расплава, возможно, за счет сильной расфокусировки пучка – при радиусах r_{eff} до 2 мм. Однако в таком режиме будет наблюдаться существенный разогрев всей наплавляемой конструкции и в примыкающих к месту наплавки областях. Поэтому как увеличение мощности пучка до значений более 1000 Вт, так и дальнейшая расфокусировка пучка оказываются нецелесообразны из-за значительного снижения энергетической эффективности процесса.

Основной результат исследований, представленный на рисунке 1.4, следует из того, что изотермы ТІ и ТІІ не параллельны. Это позволяет сделать важный вывод: перемещение вдоль любой из изотерм ТІ, осуществимое путем совместной регулировки мощности и эффективного радиуса луча, приводит к изменению температуры ТІІ в установившемся режиме наплавки. Данный вывод подтверждает правильность выбранных входных величин, а также техническую реализуемость систем стабилизации температуры и размеров жидкой ванны. Так, например, для движения вдоль изотермы ТІ = 2500 К слева направо необходимо увеличивать как мощность луча P_b , так и его эффективный радиус r_{eff} . При движении в этом направлении температура в точке ТІІ будет непрерывно расти, что связано с увеличением размеров пятна нагрева. При $r_{\text{eff}} = 1,05$ мм температура ТІІ достигает 2500 К, а при дальнейшем увеличении радиуса и мощности луча будет расти и дальше.

Очевидно, что для создания системы управления, обеспечивающей одновременное регулирование тока луча и тока фокусировки магнитной линзы по сигналам температурных датчиков, необходимо решить множество технических задач, связанных с нелинейностью объекта управления, инерционностью локальных регуляторов и некоторыми другими факторами.

Технические рекомендации к построению системы на технологической установке

На первом этапе необходимо убедиться в независимом действии выбранных каналов регулирования – по току луча и току магнитной фокусировки. В типовых конструкциях электронных пушек, применяемых для сварки и наплавки, при регулировании тока пучка за счет напряжения смещения, как правило, наблюдается смещение плоскости фокусировки, связанное с изменением электрического поля вблизи катода. При сварке эффект смещения плоскости фокусировки не всегда принимают во внимание, поскольку уменьшают ток чаще всего при замыкании швов, когда хотят предотвратить образование кратера. Исключение, пожалуй, составляют только тонкостенные изделия. В случае наплавки изделий сложной формы переменного сечения, с учетом влияния зон повторного нагрева, когда может потребоваться довольно «глубокое» регулирование тока, этим эффектом пренебрегать нельзя. На сегодняшний день предельное разрешение для установок электронно-лучевой наплавки составляет 1 мм по ширине и 0,3 мм по высоте валика, а реализованные в коммерческих образцах поперечные размеры валиков составляют порядка 10 мм. Таким образом, очевидна необходимость поддержания неизменности фокусировки пучка в области наплавки при регулировании тока. Для решения этой задачи введение канала динамической коррекции фокусировки нецелесообразно. Это обусловлено тем, что, во-первых, связь между током луча и требуемым током фокусировки нелинейна, а, во-вторых, сам коэффициент передачи по току фокусировки пришлось бы постоянно корректировать из-за изменения

эмиссионных свойств катода в процессе его работы или после его замены. По этой причине наиболее рациональным методом регулирования тока луча является метод двухпозиционного регулирования, при котором напряжение смещения может принимать только две величины – номинальное значение, соответствующее номинальному току луча, и напряжение запирающего, при котором ток луча равен нулю. В таком режиме регулирования коррекция фокусировки не требуется, а эквивалентная мощность, выделяемая в жидкой ванне, может регулироваться за счет частоты и длительности импульсов тока луча.

Период модуляции тока пучка при таком регулировании должен быть примерно на 2 порядка меньше периода установления стационарного режима наплавки. Этот период может составлять от десятых долей секунд до нескольких секунд в зависимости от сечения наплавляемого валика, а частота модуляции соответственно должна варьироваться в диапазоне от сотен герц до килогерц.

Крайне важным техническим обстоятельством является регулирование эквивалентных размеров пятна нагрева в области наплавки. Поскольку в существующих конструкциях пушек радиальное распределение пучка отличается от функции нормального распределения, описываемой уравнением (3), и может иметь резкие периферийные границы и провалы плотности тока, то более рациональным методом регулирования размеров пятна нагрева является динамическое отклонение пучка в магнитном поле, реализуемое с помощью входящих в стандартное оборудование пушки отклоняющих катушек. Частота отклонения луча должна выбираться с учетом тех же рекомендаций, что и частота модуляции тока. Форма траектории перемещения луча практически не ограничена и может представлять собой сложные пространственные линии, перемещаясь по которым луч будет одновременно нагревать и проволоку, и сам валик.

И наконец, наиболее важным аспектом является выбор типов датчиков и методов измерения температур T_I и T_{II} . Следует учесть два фактора. Во-первых, скорость выравнивания температуры в реальности, то есть при учете конвективного теплообмена, может быть выше, чем в рассмотренном случае, поэтому определение минимального времени отклика пирометров и определение точек измерения температуры, а также их значений, остаются задачей, требующей дальнейшей проработки на этапе создания прототипа установки. И во-вторых, как справедливо отмечено в ряде работ, даже детальная информация о распределении температуры по поверхности ванны металла не может дать сведений о ее распределении по глубине формируемого валика. Эта техническая проблема, возникающая при наплавке материалов, подаваемых в виде порошков, в рассматриваемом случае может быть решена за счет переноса точки измерения температуры T_I на подслой перед движущимся лучом непосредственно в область подачи присадочной проволоки. Причем в этом случае все принципиальные результаты, полученные в ходе описанного в статье исследования, остаются актуальными, а структура системы не изменяется.

Следует отметить, что приведенные результаты могут быть масштабированы и для других областей изменения входных величин – скорости наплавки, мощности, диаметра пятна нагрева, скорости подачи проволоки и сечения наплавляемого валика. Качественные отличия зависимостей, полученных для других режимов наплавки, могут быть связаны с изменением режима переноса металла, и в этом случае предоставляется возможность установления соответствующих критериев применяемым в этой области исследователями в настоящее время. Однако для верификации результатов таких исследований необходимо проведение серий экспериментов с использованием тепловизионного оборудования и последующий анализ формы, структуры и свойств наплавляемого материала [5].

1.3 Трехмерное электронно-лучевое плавление. Существующие технологии

Повсеместный интерес к разработке и внедрению в производство технологий трехмерной печати в машиностроительной и прочих областях промышленности во многом обусловлен возможностью производства изделий сложной формы, не осложненного необходимостью корректировки технологического процесса для каждой детали, и экономичностью расходования материала. К настоящему времени печать полностью функциональных металлических изделий осуществляется путем послойного наращивания материала расплавлением металлического порошка или проволоки как лазерным излучением, так и электронным лучом. Стоит отметить, что электронный луч при трехмерной печати обладает рядом преимуществ над лазерным излучением, к которым относятся простота и точность позиционирования электронного пучка, достигаемая за счет отсутствия в устройстве отклонения механически движимых частей; практически полное поглощение энергии электронов пучка в приповерхностном слое материала; нечувствительность электронного источника к запылению продуктами испарения [2]. Рассмотрим подробнее электронно-лучевую аддитивную технологию. Электронно-лучевое сплавление (Electron Beam Melting или EBM) – способ аддитивного производства металлических изделий. В качестве источников энергии для плавки в этой технологии используются электронные излучатели, так называемые электронные пушки.

Свое применение метод электронно-лучевого сплавления может найти практически в любой сфере. В медицине с его помощью можно изготовить идеально подходящие по форме титановые и кобальтовые протезы и имплантаты, которые обладают отличной биосовместимостью с человеческим организмом. В аэрокосмической сфере детали, изготовленные методом электронно-лучевого сплавления, отличаются высокой прочностью

и имеют небольшой вес. Эта технология активно применяется инженерами аэрокосмических предприятий для производства элементов двигателей и корпусов летательных аппаратов.

Технология может применяться в любом мелкосерийном производстве. Например, для изготовления пресс-форм, заготовок или вставок. На стадии проектирования может существенно облегчить процесс изготовления рабочих прототипов [3].

Типичными расходными материалами, используемыми в электронно-лучевой 3D технологии, являются металлический мелкодисперсный порошок сферической формы и металлическая проволока различных конфигураций.

Порошковая технология трехмерной электронно-лучевой наплавки

Изготовление деталей при помощи порошковой электронно-лучевой аддитивной технологии дает возможность получения изделий с высокой геометрической точностью.

Обычно, толщина слоя в технологии порошковой печати 20-100 мкм, а готовые изделия могут получаться с точностью измерения $\pm 0,05$ мм и шероховатостью поверхности 9-16 мкм. Кроме того, возможно изготовление деталей с функционально различными материалами.

С помощью электронных пучков высокой мощности в вакуумной камере послойно сплавляют металлические порошки и в итоге получают контуры цифровой модели.

Последовательно этот процесс можно описать следующим образом:

- на специальную платформу насыпают или распыляют металлический порошок и разравнивают его при помощи ножа или валика;

- по координатам, полученным с компьютерной модели, поверхность материала бомбардируется электронами из электронно-лучевой пушки.

Немаловажным здесь является и то, что в одно время можно «облучать» сразу несколько участков материала. Это существенно ускоряет процесс производства изделия.

Вакуум, созданный в камере, имеет давление меньше 1×10^{-4} Бар и способствует процессу нагрева металла, ведь любая газовая или воздушная среда создает для электронов слишком высокое сопротивление. В такой вакуумной среде сохраняются свойства материала, утрачиваемые во время плавки.

Температура в камере во время печати составляет $640-700^{\circ}\text{C}$. За счёт этого вся деталь разогрета равномерно, и процесс охлаждения происходит одновременно по всей поверхности уже после окончания печати [3].

Однако скорость осаждения порошковой электронно-лучевой аддитивной технологии достаточно низкая, обычно около 10 г / мин, что ограничивает его применение при изготовлении средних и крупных изделий.

Описание технологии

На рисунке 1.5 изображена схема установки ЕВМ, в котором электроны в электронной пушке (1) и ускоряются с потенциалом 60 кВ, фокусируются электромагнитными линзами (2) и направляются с помощью отклоняющей катушки (3) согласно заложенной программе построения. Сфокусированный электронный луч первоначально обрабатывает поверхность в несколько проходов со скоростью сканирования $\sim 10^4$ мм/с и высоким током пучка ~ 30 мА для предварительного подогрева порошкового слоя до 0,8 от температуры плавления сплава. Окончательно слой обрабатывается на скорости $\sim 10^2$ мм/с, ток пучка $\sim 5-10$ мА. Пучок сканирует x-y координату

полностью расплавляя участки слоя. Последующие порции порошковых материалов подаются из бункеров (4) на рабочую зону (6), которая опускается для формирования нового слоя на величину толщины формируемого нового слоя. Слой выравнивается ракелем (5). Добавление гелия в рабочее пространство увеличивает давление до 10-2 мбар, но положительно влияет на теплопроводность и охлаждение компонентов установки. Процессное окно для процесса электроннолучевой плавки, характеризующее область параметров, влияющих на успешное протекание процесса, изображено на рисунке 1.6. Протекание процесса в условиях вакуума является недостатком процесса, поскольку наличие газовых молекул способно рассеивать электронный луч. Поток электронов также генерирует рентгеновское излучение, создающее опасность для операторов, эксплуатирующих установки.

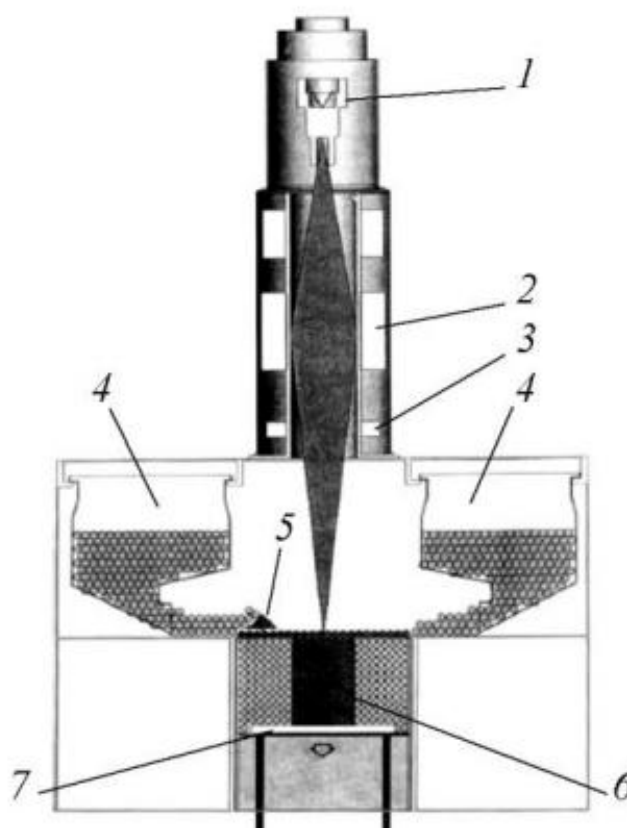


Рисунок 1.5 – Схема ЕВМ-установки

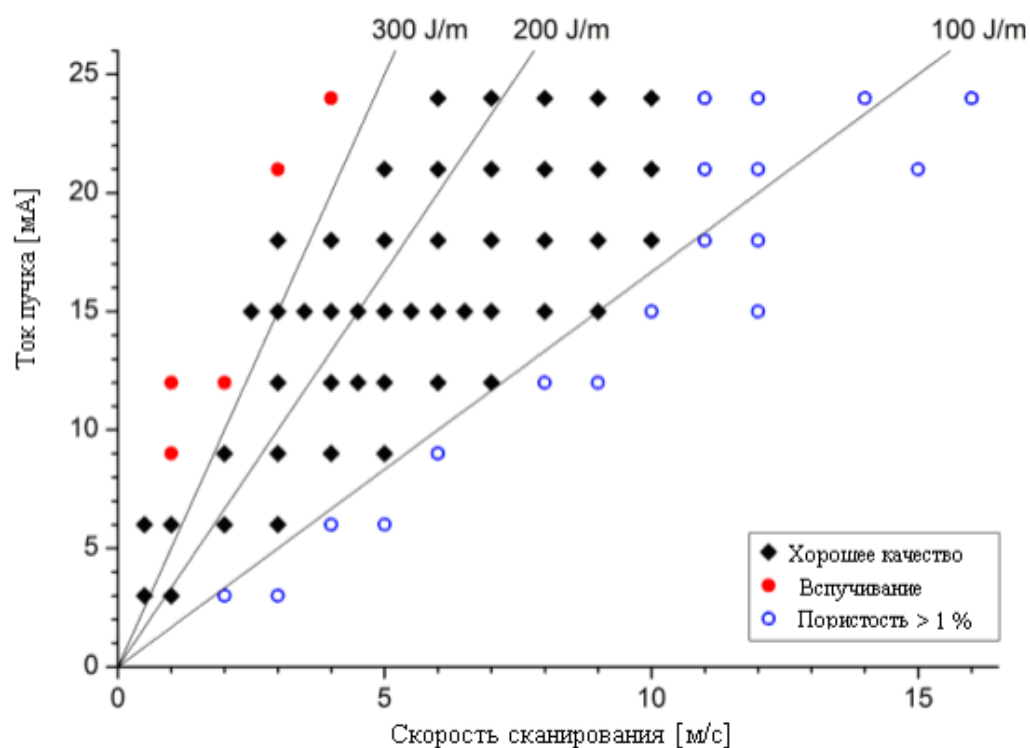


Рисунок 1.6 – Процессное окно для EBM-процесса порошковой технологии (сплав Ti-6Al-4V).

Однако данная технология имеет ряд недостатков:

- ограничения по применяемым материалам (только сплавы на основе титана и кобальта);
- высокая стоимость порошкового сырья;
- применение порошков более высокой фракции обусловлено электростатической нагрузкой при которой происходит отталкивание порошков мелкой фракции, что приводит к нарушению целостности сформированного слоя. Из этого следует, что точность построения будет меньше, чем в лазерных технологиях (минимальный диаметр частиц равен 45 мкм) [3].

Проволочная технология трехмерной электронно-лучевой наплавки

Так же существует технология трехмерной электронно-лучевой печати, в которой вместо порошка используется проволока.

Процесс электронно-лучевой наплавки происходит следующим образом (рисунок 1.7). Электронный пучок с плотностью мощности достаточной для плавления, фокусируется на поверхности подложки 5 или уже выращенного слоя металла 6. В месте обработки образуется ванна расплава 7, в которую вводится проволока 8, тем самым увеличивая объем расплавленного материала. При смещении положения обработки манипулятором 9 путем поворота подложки или ее движением в горизонтальном направлении происходит смещение ванны расплава, в результате чего наплавленный в предыдущий момент времени металл застывает [3].

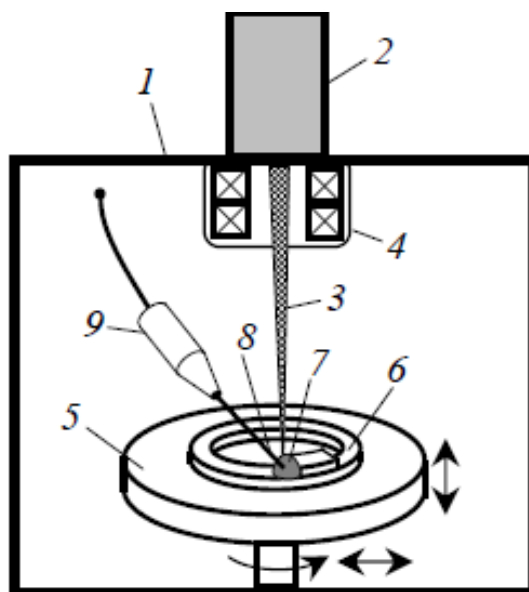


Рисунок 1.7 – Схема установки электронно-лучевого выращивания: 1 – вакуумная камера; 2 – электронный источник; 3 – электронный пучок; 4 – Система магнитной фокусировки; 5 – подложка; 6 – предыдущий наплавленный слой; 7- ванна расплава; 8- подаваемая проволока; 9 – манипулятор подачи проволоки; стрелками показаны направления смещения подложки

Описание технологии

Формирование металлических изделий с использованием плавления проволочного материала является перспективным направлением развития аддитивных технологий. Проволочная технология гораздо целесообразнее с точки зрения эффективности использования материала при изготовлении детали. В сравнении с порошковой технологией, проволочная имеет гораздо более высокую скорость осаждения, порядка до 2500 см³/ч (330 г / мин для нержавеющей стали). А также говоря об экономической вариации, металлическая проволока дешевле, легче и доступнее, чем металлические порошки, имеющие одинаково подходящие свойства для электронно-лучевой трехмерной наплавки, что делает данную технологию подачи проволоки более конкурентоспособной по стоимости.

1.4 Материалы используемые для электронно-лучевой наплавки

Если металл хорошо ведет себя при сварке или отливке, он также подходит для электронно-лучевой наплавки. Существует широкий диапазон металлов и сплавов, которые можно использовать в 3d печати, либо в форме порошка, либо в виде проволоки. К ним относятся:

- Алюминий
- Кобальт
- Медь
- Инконель
- Никель
- Драгоценные металлы (золото, серебро, платина)
- Нержавеющая сталь

- Тантал
- Титан
- Инструментальная сталь
- Вольфрам.

Рассмотрим более подробно три металла из этого списка.

Титан

Титан является одним из наиболее популярных материалов для 3d печати в производстве, особенно в аэрокосмических и медицинских приложениях. Он объединяет легкость алюминия с прочностью стали, и он не токсичен. Однако этим преимуществам противостоит относительно высокая стоимость титана. Поэтому снижение отходов делает аддитивное производство привлекательным вариантом для получения титановых деталей.

Порошковый титан легко воспламеняется и взрывается при контакте с водой, при температурах, превышающий 700о С. По этой причине 3d печать с титановым порошком выполняется в вакуумных или в аргоновых камерах. Также можно выполнять 3d печать, используя плавку титановой проволоки электронным лучом (EBM), что устраняет риски взрывной реакции. К двум наиболее распространенным титановым сплавам, используемым при электронно-лучевой наплавке, относятся 6Al-4V и 6Al-4V ELI.

Алюминий

Алюминий, легкий и универсальный металл, можно использовать для 3d печати аэрокосмических компонентов, и деталей гоночных автомобилей. Хотя он не обладает прочностью стали, алюминий намного легче ее и более устойчив к коррозии. Они также дороже стали, хотя и не настолько, как титан.

Основное преимущество применения алюминия в 3d печати заключается в возможности производства деталей с мелкими элементами и тонкими стенками (до 50 микрон). Алюминиевые детали, изготовленные методами аддитивного производства, имеют более текстурную, матовую поверхность, в отличие от шлифованной поверхности при производстве алюминиевых деталей на станках. Распространенным алюминиевым сплавом для 3d печати является AlSi10Mg.

Нержавеющая сталь

По сравнению с алюминием, титаном и большинством других металлов из приведенного списка, нержавеющая сталь является более доступным вариантом. Она может использоваться для 3d печати водостойких деталей высокой прочности и плотности, и используемых в экстремальной среде, такой как реактивные двигатели самолетов и ракет. Были проведены исследования применимости нержавеющей стали 316L для производства корпусов ядерных реакторов при помощи аддитивных технологий. Несмотря на то, что сталь 316L обычно поддается нетепловой обработке, отчет компании Renishaw предполагает, что процесс электронно-лучевой плавки порождает более прочные сплавы, чем при ковке металла, обеспечивая усилие растяжения, превышающее 600 МПа. Детали из нержавеющей стали изготавливаются на 3d принтере либо путем непосредственного нанесения металла, либо используя композитный материал со связывающим веществом. Детали можно покрывать другими металлами для изменения внешнего вида или свойств поверхности. Распространенными сплавами нержавеющей стали, используемыми в АП, являются 17-4PH, 15-5-PH, ASM 316L, 12X18H10T.

1.5 Основные характеристики нержавеющей стали 12X18H10T

Класс: Сталь конструкционная криогенная.

Использование в промышленности: детали, работающие до 600 °С. Сварные аппараты и сосуды, работающие в разбавленных растворах азотной,

уксусной, фосфорной кислот, растворах щелочей и солей и другие детали, работающие под давлением при температуре от -196 до $+600$ °С, а при наличии агрессивных сред до $+350$ °С. Химический состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т представлен в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Химический состав стали 12Х18Н10Т

С	Cr	Fe	Mn	Ni	P	S	Si	Ti
$\leq 0,12$	17-19,0	Осн.	$\leq 2,0$	9-11,0	$\leq 0,035$	$\leq 0,020$	$\leq 0,8$	5·С-0,8
Сталь 12Х18Н10Т – нержавеющая титаносодержащая сталь аустенитного класса. Химический состав регламентирован ГОСТ 5632-72 нержавеющей сталей аустенитного класса.								

Преимущества: высокая пластичность и ударная вязкость.

Оптимальной термической обработкой для этих сталей является закалка с $1050-1080$ в H_2O , после заковки механические свойства характеризуются максимальной вязкостью и пластичностью, не высокими прочностью и твёрдостью.

Аустенитные стали используют как жаропрочные при температурах до 600°C . Основными легирующими элементами являются Cr-Ni. Однофазные стали имеют устойчивую структуру однородного аустенита с незначительным содержанием карбидов Ti (для предупреждения межкристаллитной коррозии. Такая структура получается после заковки с температур $1050^\circ\text{C}-1080^\circ\text{C}$). Стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов имеют относительно небольшой уровень прочности ($700-850\text{МПа}$).

Незаменимый элемент любых инженерных конструкций. Железо в виде разнообразных высокопрочных нержавеющей сталей — второй по применению металл в ракетах. Везде, где нагрузка не распределена по большой конструкции, а сосредоточена в точке или нескольких точках, сталь выигрывает у алюминия. Сталь жестче — конструкция из стали, размеры которой не должны «плыть» под нагрузкой, получается почти всегда компактнее и иногда даже легче алюминиевой. Сталь гораздо лучше

переносит вибрацию, более терпима к нагреву, сталь дешевле, за исключением самых экзотических сортов, сталь, в конце концов, нужна для стартового сооружения.

Таблица 1.5 - Механические свойства стали 12X18H10T при повышенных температурах

Температура испытаний, °C	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	KCU (кДж / см ²)
Закалка 1050-1100 °C, охлаждение на воздухе					
20	225-315	550-650	46-74	66-80	215-372
500	135-205	390-440	30-42	60-70	196-353
550	135-205	380-450	31-41	61-68	215-353
600	120-205	340-410	28-38	51-74	196-358
650	120-195	270-390	27-37	52-73	245-353
700	120-195	265-360	20-38	40-70	255-353

Таблица 1.6 - Механические свойства 12X18H10T при испытаниях на длительную прочность (ГОСТ 5949-75)

Температура испытания, °C	Предел ползучести, МПа	Скорость ползучести %/ч	Предел длительной прочности, МПа, не менее	Длительность испытания, ч
600	74	1/100000	147	10000
650	29-39		78-98	

Таблица 1.7 - Ударная вязкость стали 12X18H10T KCU, (Дж/см²)

T= +20 °C	T= -40 °C	T= -75 °C	Термообработка
286	303	319	Полоса 8x40 мм в состоянии покоя

Таблица 1.8 – Жаростойкость стали 12X18H10T

Среда	Температура, °C	Группа стойкости или балл
Воздух	650	2-3
	750	4-5

Рассмотрим более тщательно влияние легирующих компонентов на характеристики нержавеющей стали. Ее основными легирующими элементами являются Cr (хром) и Ni (никель). Высокое содержание хрома в марке 12X18H10T (от 17 до 19%) обеспечивает способность металла к пассивации и обуславливает сильные антикоррозийные характеристики стали.

Добавление никеля (от 9 до 11%) переводит сталь в класс аустенитов. Это свойство имеет исключительное значение, позволяя сочетать технологичность нержавеющей стали с расширенным комплексом эксплуатационных характеристик. Такие стали хорошо прокатываются в холодном и горячем состоянии, обладают высокой, по сравнению с ферритными сталями, коррозионной устойчивостью в агрессивных средах, в том числе серной кислоте. Содержание никеля и хрома в сплаве оказывает специфическое влияние на стабильность аустенита при охлаждении температуры обработки (1050–1100 °C) на твердый раствор. Для того чтобы сталь имела полностью аустенитную структуру при температуре, превышающей 900 °C, достаточно присутствия 0,1% углерода (C). Это обусловлено сильным аустенитообразующим воздействием данного химического элемента.

Помимо воздействия основных легирующих элементов следует учитывать наличие в сплаве титана, алюминия и кремния, которые добавляют ему ферритные свойства. Добавление в состав сильного карбидообразующего элемента – титана – (Ti) позволяет устранить склонность стали к межкристаллитной коррозии. Вступая в реакцию с углеродом (C), он образует тугоплавкий карбид TiC, исключая уменьшение концентрации в сплаве хрома (Cr) путем образования его карбидов.

Кремний (Si), содержание которого в 12X18H10T не более 0,8%, повышает плотность стали и дегазирует его. Добавление данного элемента увеличивает прочность материала и предел текучести, однако немного снижает пластичность, что затрудняет холодную прокатку. Введением марганца (Mn) вызывается замедление скорости роста зерна, что способствует получению мелкозернистой стали. Предельное содержание фосфора (P) в стали марки 12X18H10T не может превышать 0,035%. Этот показатель имеет критичное значение, так как данный вид стали

используется в криогенной технике, а фосфор отрицательно влияет на механические свойства сплава. Возникает сильная первичная ликвация при кристаллизации, при низких температурах снижаются пластические характеристики металла. Основными преимуществами стали марки 12X18H10T являются высокая ударная вязкость и пластичность. К недостатку можно отнести относительно низкую устойчивость к коррозии в средах, содержащих ионы хлора, а также серную и соляную кислоты [7].

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Постановка задачи

Из вышеприведенного литературного обзора следует, что проволоочная электронно-лучевая объёмная печать с использованием в качестве исходного материала аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т является наиболее оптимальной с точки зрения высокой доступности материала и селективности процесса. Использование аустенитной нержавеющей стали актуализировано спецификой сфер применения и получения изделий с оптимальными механическими характеристиками.

Целью данной работы является изучение особенностей влияния термической обработки на структурное состояние аустенитной нержавеющей стали, полученной методом электронно-лучевой 3D печати, при различных режимах термической обработки.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- 1) Произвести наплавку образцов аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т на подложку из аналогичного материала с помощью вакуумной электронно-лучевой установки (экспериментальная установка Института физики прочности и материаловедения СО РАН);
- 2) Подготовить образцы для металлографических исследований;
- 3) Произвести металлографические исследования образцов и анализ полученных структур, определить оптимальный режим термообработки;
- 4) Заключение по результатам проведенных исследований.

2.2 Технологические параметры трехмерной печати

Образцы были получены с использованием экспериментальной установки для выращивания изделий из проволоки в вакууме, в качестве источника нагрева с последующим плавлением использовался электронный пучок. В ходе работы электронно-лучевому плавлению подвергалась проволока легированного сплава нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Диаметр проволоки составлял 1,2 мм. На рисунке 2.1 изображен образец. Подача проволоки осуществлялась непрерывно. Остывание образца до комнатной температуры происходило в вакууме.



Рисунок 2.1 – общий вид образца

В камере получают вакуум $\sim 5 \times 10^{-3}$ Па.

Таблица 2.1 - Технологические параметры для создания изделий из проволоки аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Ускоряющее напряжение пучка, кВ	40
Ток луча, мА: - предварительный подогрев - первого слоя - последующих слоев	30 53 44
Диаметр пучка, мм	0,15÷0,18
Ток фокусировки луча, мА	700
Высота слоя, мм	0,4
Количество слоев, шт	5
Скорость подачи проволоки, мм/с	5,2
Угол наклона подачи проволоки к подложке, град	14

Образцы были получены с использованием экспериментальной установки для выращивания изделий из проволоки в вакууме (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН), в качестве источника нагрева с последующим плавлением использовался электронный пучок. Схема получения образцов изображена на рисунке 2.2 (добавить фото получения наплавленного металла)

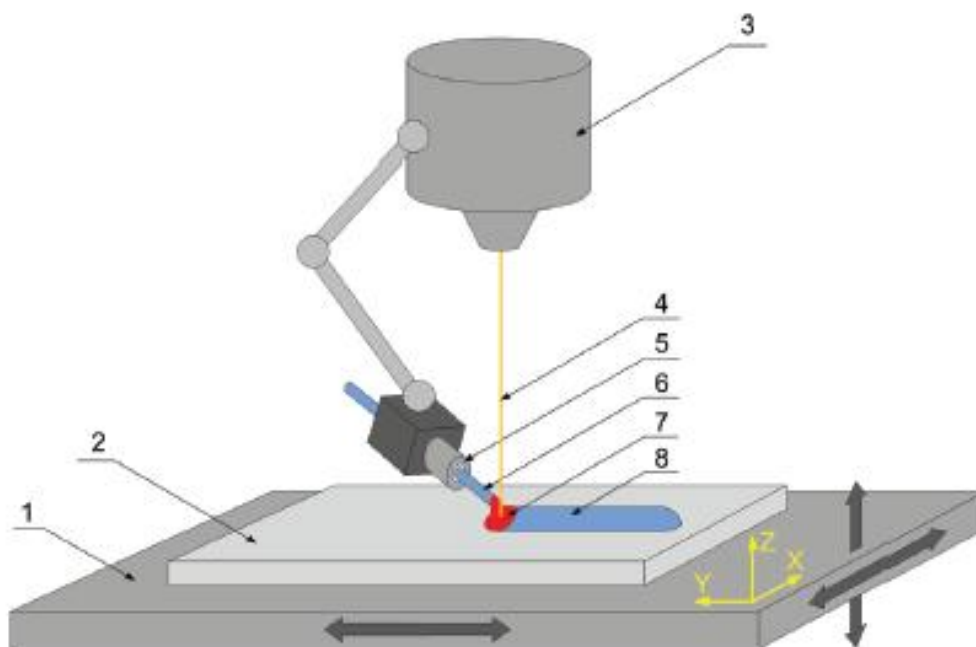


Рисунок 2.2 - Общая схема процесса послойного изготовления образца методом проволоочной электронно-лучевой объемной наплавки 1 – подвижный стол; 2 – подложка; 3 – электронная пушка; 4 – электронный пучок; 5 – устройство для подачи проволоки; 6 – проволока; 7 – ванна расплава; 8 – выращенный материал

2.3 Методы подготовки и исследования 3D-напечатанных образцов

Материалом исследования является сплав аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T, в количестве шести образцов. Металлографические исследования проводились при поддержке АО «СХК», в частности

лабораторией металловедения отдела главного механика. Испытания проводились на оборудовании:

- твердомер ТК-2М, микротвердомер ПМТ-3
- муфельная печь ВЕГА-2;
- шлифовальный станок;
- полировальный станок «НЕРИС» 388515-75;
- оптический микроскоп AXIO VERT.1;
- биологический микроскоп МБС-10
- набор для визуального и измерительного контроля ЛМ-01;



Рисунок 2.3 – Внешний вид оборудования используемого при исследовании

Образцы для анализа микроструктуры вырезались в поперечной плоскости (XZ).

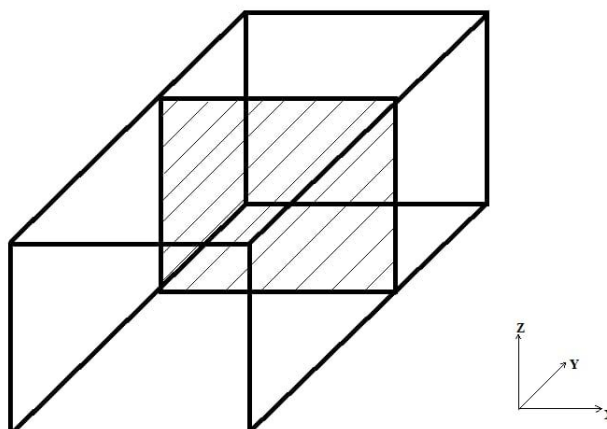


Рисунок 2.4 – Схема расположения образца для металлографических исследований в теле заготовки

Размер образцов для испытаний (д×ш×т) 11,5×11×4 мм. Наплавленный металл образцов выполнен в виде гребенки.

Размер гребней, измеренный на микроскопе МБС-10 с ценой деления шкалы 0,1 мм: основание гребня – 3 мм, высота гребня 1,9 мм.

С целью гомогенизации полученной дендритной структуры наплавленного металла часть образцов была подвергнута термической обработке путем нагрева до заданных температур с различным временем выдержки нагрева, с последующим охлаждением на воздухе (таблица 2). Все образцы помещались в печь после достижения в ней заданной температуры.

Таблица 2.2 - Режимы термической обработки образцов

№ Образца	1	2	3	4	5	6
Время выдержки, мин.	30	60	30	60	30	60
Температура нагрева, °С	800	800	900	900	1000	1000

После термообработки образцы подвергались стандартной процедуре шлифования, полирования и травления.

Травление поверхности шлифов осуществлялось электролитическим методом в 10% растворе щавелевой кислоты.

Металлографические исследования образцов проводили с использованием оптического микроскопа AXIO VERT.

3 ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Исследование микроструктуры образцов до термообработки.

Исследование структуры образца в исходном состоянии после наплавки без термообработки показало, что по структуре образец можно разделить на две основные зоны, отличающиеся разной структурой и свойствами: основа (металл заготовки) и зона наплавленного металла на ней, что отчетливо видно на рисунке 3.1.

Структура основы – аустенит с включениями ферритной фазы в виде небольших продолговатых включений.

На участках наплавленного металла наблюдается зона дендритных кристаллов. Эта зона образована большим количеством последовательных сварочных ванн, корни которых в результате частичного электронно-лучевого проплавления находятся в основе и в каждом предыдущем слое наплавленного металла.

Следует особо подчеркнуть, что полученный наплавленный металл — плотный без дефектов сварки в виде пор, газовых пузырей и трещин. Типичная дендритная микроструктура наплавленного металла изображена на рисунке 3.1, отчетливо просматриваются границы между слоями наплавки (рисунок 3.1 а,б,в,г).

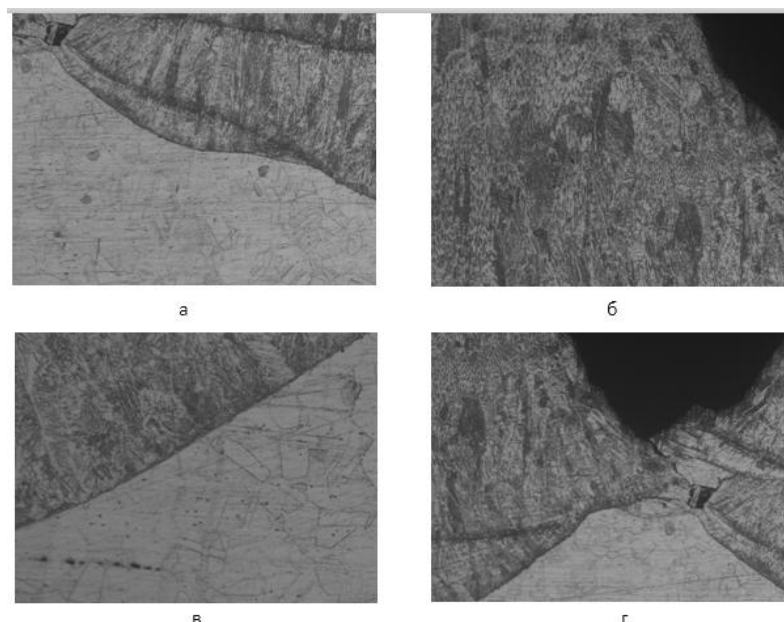


Рисунок 3.1 – Микроструктура наплавленного металла исходного образца, x100

Главные оси дендритов ориентированы в направлении теплоотвода при кристаллизации и остывании наплавленных слоев и образуют некоторый угол осью z (рисунок 3.1 а). Этот угол можно контролировать изменением скорости движения подложки при изготовлении отливки. Хорошо различимы отдельные границы наплавленных слоев, толщина которых колеблется от 500 до 1000 мкм.

Таким образом, структура наплавленного металла образца в исходном состоянии столбчатая, дендритная характерная для наплавленного металла сварных швов без термообработки.

3.2 Влияние термической обработки на структурное состояние наплавленного металла аустенитной стали 12X18H10T.

Проведено металлографическое исследование микроструктуры образцов после термообработки (гомогенизации) при различных температурах нагрева и время выдержки согласно таблицы 2.2.

В структуре образца №1 и №2 после термообработки по режиму 1 и 2 перекристаллизации наплавленного металла не наблюдается. Структура

наплавленного металла сохранила дендритное строение. Видны границы наплавленных слоев, но тем не менее структура стала более равноостной в сравнении со структурой исходного образца.

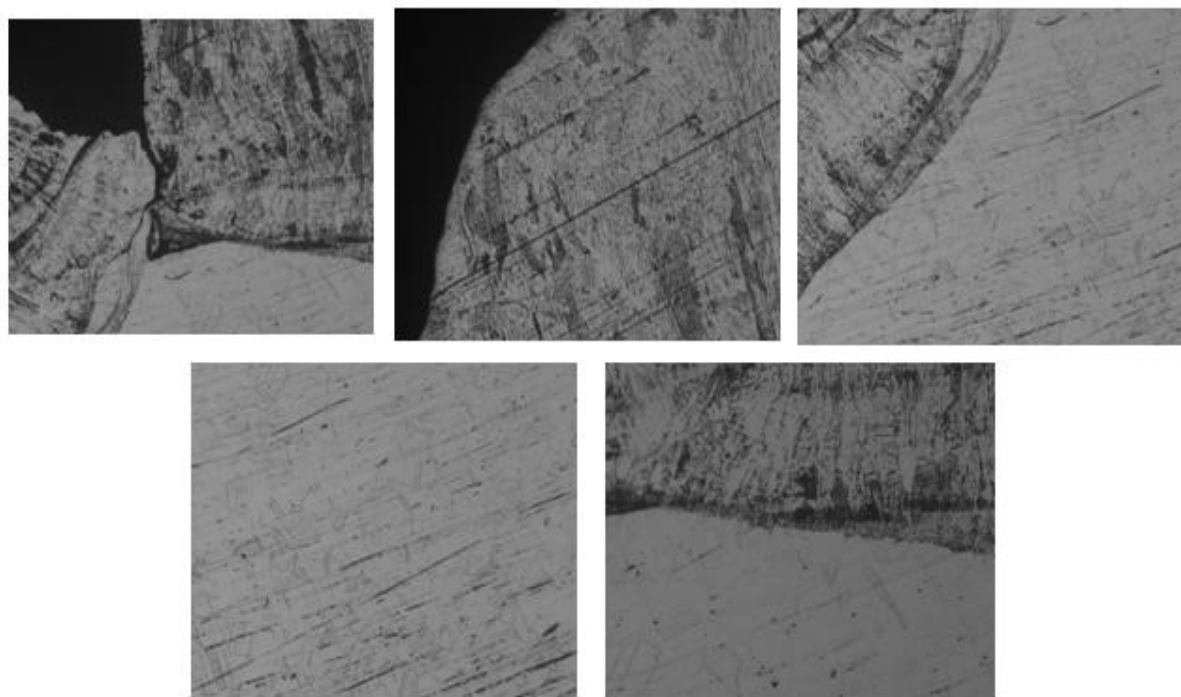


Рисунок 3.2 – Структура наплавленного металла образцов №1 и №2 после термообработки по режимам №1 и №2 (800°C)

В наплавленном металле образцов №3 и №4, термообработанных по режимам №3 и №4, наблюдается частичная перекристаллизация дендритной структуры. Однако дендритная направленность зерен сохранилась, но границ между слоями наплавки уже не наблюдается. Структура наплавленного металла образцов представлена на рисунке 3.3.

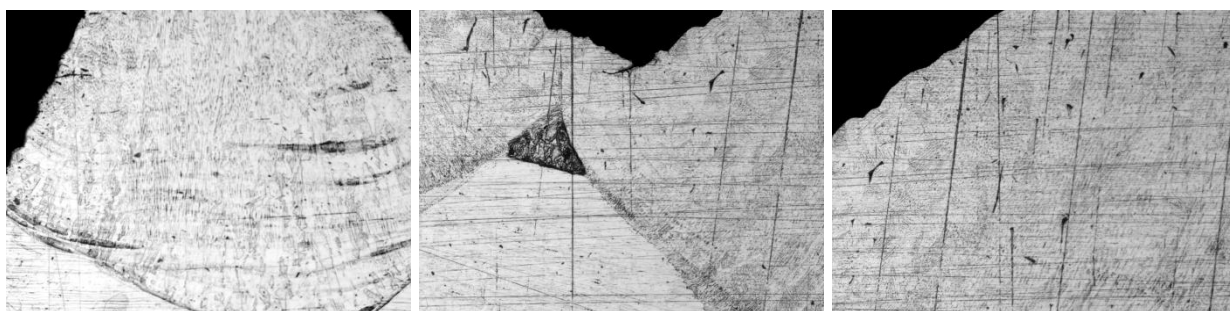


Рисунок 3.3 – Структура наплавленного металла образцов №3 и №4 после термообработки по режимам №3 и №4 (900°C, 30 мин., 60 мин.)

В структуре наплавленного металла образца №5, термообработанного по режиму №5, произошла полная перекристаллизация. Структура шва стала аустенитной. Четко наблюдается сохранившаяся граница между основным металлом и наплавкой. Структура наплавленного металла образца представлена на рисунке 3.4.

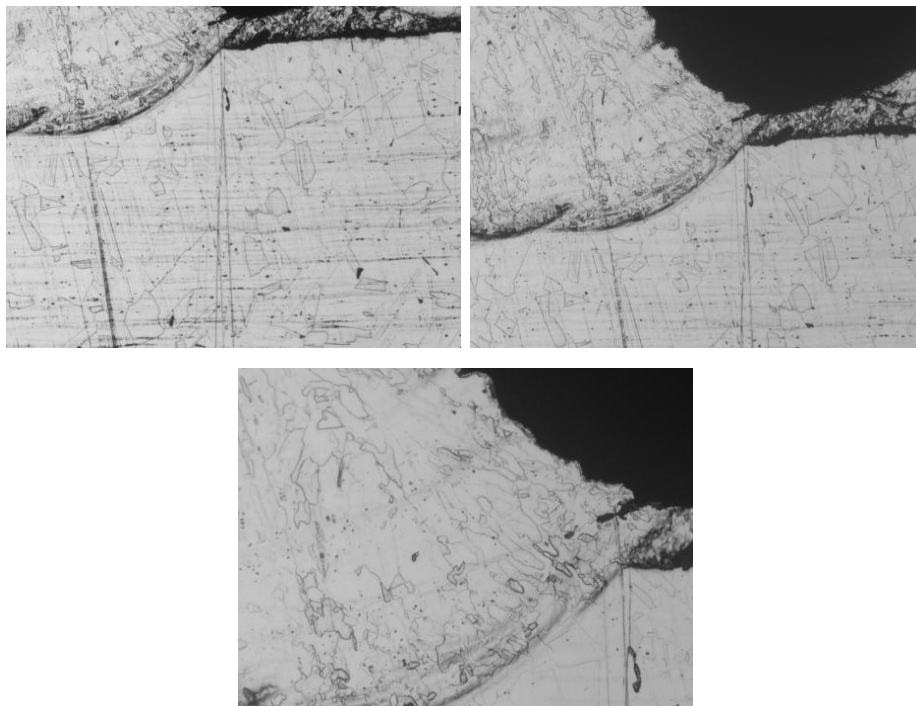


Рисунок 3.4 – Структура наплавленного металла образца №5 после термообработки по режиму №5, $\times 100$ (1000° , 30 мин.)

В структуре наплавленного металла образца №6, термообработанного по режиму №6, произошла полная перекристаллизация. Структура шва стала аустенитной. Граница между основным металлом и наплавкой практически не наблюдается. Величина зерна структуры образца №6 и №5 соизмеримы, что указывает на отсутствие роста зерна при термообработке по режиму №6. Структура наплавленного металла образца представлена на рисунке 3.5.

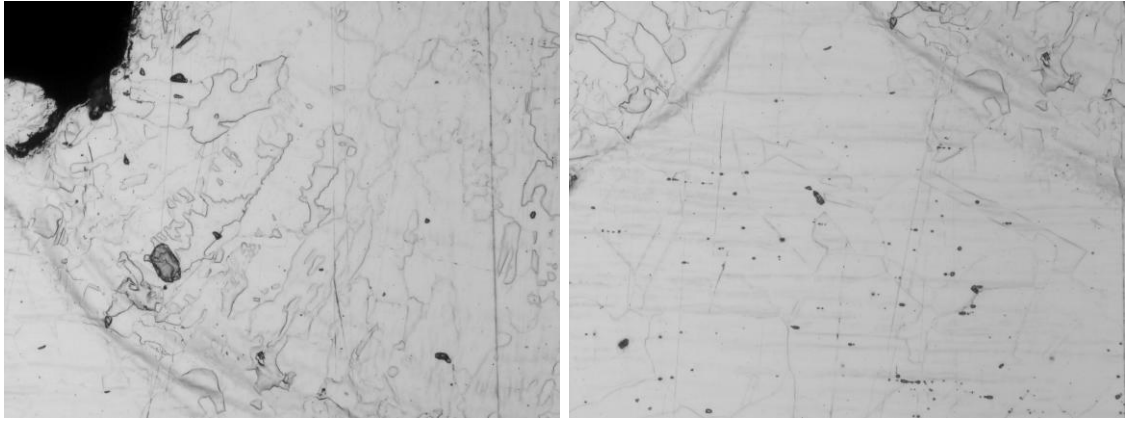


Рисунок 3.5 – Структура наплавленного металла образца №6 после термообработки по режиму №6, х200 (1000°, 60 мин.)

Твердость металла образца в исходном состоянии до термообработки:

- основной металл - 175 НВ;
- металл наплавки – 192 НВ.

Твердость металла образца после термообработки по режиму №6:

- основной металл – 148 НВ;
- наплавленный металл – 152 НВ.

Заключение

Методом послойной электронно-лучевой наплавки выращены образцы в виде заготовки бруска из проволоки нержавеющей стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т. Изучены микроструктуры образцов полученных в поперечном сечении заготовки (ХЗ). Образец можно разделить на две основные зоны заготовки, отличающиеся структурой и свойствами: основа и зона наплавленного металла. Структура наплавленного металла представляет собой дендриты (столбчатая структура), оси которых ориентированы в направлении теплоотвода при кристаллизации. Структура корневой зоны наплавленного металла представляет собой более равноосные кристаллы, имеющие так же, как и наплавленный металл, дендритное, но более дисперсное строение.

После гомогенизирующего отжига с различной выдержкой при разных температурных режимах было выявлено, что на третьем и четвертом режимах термообработки начинают появляться кардинальные изменения микроструктуры, а именно зарождается процесс рекристаллизации. На образцах №3 и №4 еще просматриваются остатки дендритной структуры в наплавленном металле. При пятом и шестом режимах термообработки происходит полная рекристаллизация наплавленного металла. Структура наплавки стала аустенитной.

В ходе исследования было выявлено, что оптимальным режимом гомогенизирующего отжига является режим №6, при котором структура наплавленного металла становится аустенитной и практически исчезает граница между основным и наплавленным металлом. Роста зерна при термообработке по режиму №6 не наблюдается.

А так же наблюдается эффект выравнивания твердости основного и наплавленного металла в результате термообработки. После оптимального режима отжига (режим №6) значение твердости наплавленного металла

максимально приближается к значению твердости основного металла и составляет соответственно 152 и 148 НВ.

Получение при отжиге в наплавленном металле аустенитной структуры позволяет снять сварочные напряжения в наплавленном металле, что должно положительным образом сказываться на стойкости сварных соединений, выполненных с помощью вакуумной электронно-лучевой установки, к межкристаллитной коррозии (МКК) и ножевой коррозии в агрессивных средах.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4AM7K	Рудик Андрей Александрович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»/ Технологии космического материаловедения

Тема ВКР:

Влияние термической обработки на структурно-фазовое состояние аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T, полученной методом электроннолучевой наплавки

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов, стоимость спецоборуживания, тарифные ставки исполнителей научно-исследовательского проекта</i>
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Общая ставка взносов во внебюджетные фонды</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>1.Потенциальные потребители результатов исследования 2.Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>1. Составление перечня этапов и работ 2. Распределение исполнителей 3. Определение трудоемкости выполнения работ 4. Разработка графика проведения научного исследования 5. Бюджет научно-технического исследования</i>
1. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений*
2. *Линейный план-график проведения работ научных исследований*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	11.03.2019
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Рагозин Дмитрий Валерьевич	Кандидат исторических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM7K	Рудик А.А.		

2.9 Дать оценку разработки НИР.

4.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации проекта необходимо рационально спланировать занятость каждого из его участников и сроки проведения работ. Наглядно представим линейный график реализации проекта.

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность.

Таблица 4.1

Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор методов исследования	НР, И	НР – 100% И – 70%
Подготовка образцов для исследования	НР, И	НР – 20% И – 100%
Проведение исследования	И	И – 100%
Анализ полученных данных, выводы	И	И – 100%
Оценка эффективности полученных результатов	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	НР, И	НР – 30% И – 100%

4.1.1 Продолжительность этапов работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож}$ используется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (4.1)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.;

Для выполнения перечисленных в таблице 4.1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} \quad (4.2)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{ВН} = 1$;

K_d – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_d = 1-1,2$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{KD} = T_{PD} \cdot T_K, \quad (4.3)$$

где T_{KD} – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

T_K – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (4.4)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 101$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 14$).

$$T_K = \frac{365}{365 - 101 - 14} = 1,46$$

Приведем расчет основных показателей:

$$t_{ож1} = \frac{3 * 3 + 2 * 7}{5} = 4,6$$

$$t_{ож2} = \frac{3 * 8 + 2 * 25}{5} = 14,8$$

$$t_{ож3} = \frac{3 * 7 + 2 * 12}{5} = 9,0$$

$$t_{ож4} = \frac{3 * 3 + 2 * 4}{5} = 3,4$$

$$t_{ож5} = \frac{3 * 3 + 2 * 7}{5} = 4,6$$

$$t_{ож6} = \frac{3 * 6 + 2 * 13}{5} = 8,8$$

$$t_{ож7} = \frac{3 * 11 + 2 * 25}{5} = 16,6$$

$$t_{ож8} = \frac{3 * 9 + 2 * 12}{5} = 10,2$$

$$t_{ож9} = \frac{3 * 8 + 2 * 16}{5} = 11,2$$

$$t_{ож10} = \frac{3 * 6 + 2 * 11}{5} = 9,2$$

$$t_{ож11} = \frac{3 * 12 + 2 * 15}{5} = 13,2$$

Продолжительность этапов в рабочих днях для научного руководителя:

$$T_{РДНР1} = \frac{4,6}{1} * 1,1 = 5,06$$

$$T_{РДНР2} = \frac{14,8}{1} * 1,1 = 16,28$$

$$T_{РДНР3} = \frac{9,0}{1} * 1,1 = 9,90$$

$$T_{РДНР4} = \frac{3,4}{1} * 1,1 = 3,74$$

$$T_{РДНР5} = \frac{4,6}{1} * 1,1 = 5,06$$

$$T_{РДНР6} = \frac{8,8}{1} * 1,1 = 9,68$$

$$T_{РДНР7} = \frac{16,6}{1} * 1,1 = 18,26$$

$$T_{РДНР11} = \frac{13,2}{1} * 1,1 = 14,52$$

Продолжительность этапов в рабочих днях для исполнителя:

$$T_{РДИ2} = \frac{14,8}{1} * 1,2 = 17,76$$

$$T_{РДИ3} = \frac{9,0}{1} * 1,2 = 10,80$$

$$T_{РДИ4} = \frac{3,4}{1} * 1,2 = 4,08$$

$$T_{РДИ5} = \frac{4,6}{1} * 1,2 = 5,52$$

$$T_{РДИ6} = \frac{8,8}{1} * 1,2 = 10,56$$

$$T_{РДИ7} = \frac{16,6}{1} * 1,2 = 19,92$$

$$T_{РДИ8} = \frac{10,2}{1} * 1,2 = 12,24$$

$$T_{РДИ9} = \frac{11,2}{1} * 1,2 = 13,44$$

$$T_{РДИ10} = \frac{9,2}{1} * 1,2 = 11,04$$

$$T_{РДИ11} = \frac{13,2}{1} * 1,2 = 14,4$$

Продолжительность этапов в календарных днях для научного руководителя:

$$T_{КДНР1} = 5,06 * 1,46 = 7,39$$

$$T_{КДНР2} = 16,28 * 1,46 = 23,77$$

$$T_{\text{КДНР3}} = 9,9 * 1,46 = 14,45$$

$$T_{\text{КДНР4}} = 3,74 * 1,46 = 5,46$$

$$T_{\text{КДНР5}} = 5,06 * 1,46 = 5,39$$

$$T_{\text{КДНР6}} = 9,68 * 1,46 = 14,13$$

$$T_{\text{КДНР7}} = 18,26 * 1,46 = 26,66$$

$$T_{\text{КДНР11}} = 14,52 * 1,46 = 21,19$$

Продолжительность этапов в календарных днях для исполнителя:

$$T_{\text{КДИ2}} = 17,76 * 1,46 = 25,57$$

$$T_{\text{КДИ3}} = 10,80 * 1,46 = 15,77$$

$$T_{\text{КДИ4}} = 4,08 * 1,46 = 5,95$$

$$T_{\text{КДИ5}} = 5,52 * 1,46 = 8,05$$

$$T_{\text{КДИ6}} = 10,56 * 1,46 = 15,41$$

$$T_{\text{КДИ7}} = 19,92 * 1,46 = 29,08$$

$$T_{\text{КДИ8}} = 12,24 * 1,46 = 17,87$$

$$T_{\text{КДИ9}} = 13,44 * 1,46 = 19,62$$

$$T_{\text{КДИ10}} = 11,04 * 1,46 = 16,11$$

$$T_{\text{КДИ2}} = 15,84 * 1,46 = 23,12$$

В таблице 4.1 приведены данные определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. Величины трудоемкости этапов по исполнителям $T_{\text{КД}}$ (данные столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта – см. в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Трудовозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{рд}$		$T_{кд}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	3	7	4,6	5,06	–	7,39	–
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	8	25	14,8	16,28	17,6	23,77	25,57
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	7	12	9,0	9,9	10,80	14,45	15,77
Разработка календарного плана	НР, И	3	4	3,4	3,74	4,08	5,46	5,95
Обсуждение литературы	НР, И	3	7	4,6	5,06	5,52	7,39	8,05
Выбор методов исследования	НР, И	6	13	8,8	9,68	10,56	14,13	15,41
Подготовка образцов для исследования	НР, И	11	25	16,6	18,26	19,92	26,66	29,08
Проведение эксперимента	И	9	12	10,2	–	12,24	–	17,87
Анализ полученных данных, выводы	И	8	16	11,2	–	13,44	–	19,62
Оценка эффективности полученных результатов	И	6	11	9,2	–	11,04	–	16,11
Оформление расчетно-пояснительной записки	НР, И	12	15	13,2	14,52	15,84	21,19	23,12
Итого:				105,6	82,5	120,5	120,4	175,55

Таблица 4.2

Линейный график работ

Этап	НР	И	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1	7,4	–																		
2	23,8	25,6																		
3	14,5	15,8																		
4	5,5	6,0																		
5	7,4	8,1																		
6	14,1	15,4																		
7	26,7	29,1																		
8	–	17,9																		
9	–	19,6																		
10	–	16,1																		
11	21,2	23,1																		

НР – ; И



4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

При планировании бюджета должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

4.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых

материалов, как правило, это $5 \div 20 \%$. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах.

Таблица 4.3

Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Дистиллированная вода	60	1 л	60
Технический этиловый спирт	200	1 л	200
Реактив для травления	500	200 мл	500
Проволока	6500	1 ролик	3500
Алмазная паста для шлифования	250	1 уп.	250
Наждачная бумага	1500	1 уп.	1350
Ткань полировочная	300	1 м.	250
Итого:			9860

Допустим, что ТЗР составляют 5% от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны $C_{\text{мат}} = 9860 * 1,05 = 10353$ руб.

4.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/20,833 \quad (4.6)$$

$$ЗП_{\text{дн-тНР}} = 33664,00/20,833 = 1615,90 \text{ руб.}$$

$$ЗП_{\text{дн-тИ}} = 15470,00/20,833 = 742,57 \text{ руб.}$$

В данной формуле учтено, что в году 250 рабочих дней и,

следовательно, в месяце в среднем 20,833 рабочих дня (при пятидневной рабочей неделе).

Пример расчета затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.4. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 4.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{ПР} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,113$ (при пятидневной рабочей неделе); $K_p = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{и} = 1,1 * 1,113 * 1,3 = 1,592$.

Таблица 4.4

Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33 664	1615,90	83	1,592	213518,56
И	15 470	742,57	121	1,592	143042,74
Итого:					356561,30

4.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{соц.} = C_{зп} * 0,3$. Итак, в нашем случае $C_{соц.} = 356561,30 * 0,3 = 106968,39$ руб.

4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

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

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}} \quad (4.7)$$

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

$Ц_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

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

Для ТПУ $Ц_{\text{э}} = 5,748$ руб./кВт·час (с НДС).

ПК - Персональный компьютер

СП – Струйный принтер

$$C_{\text{эл.об.ПК}} = 0,3 \cdot 1742,4 \cdot 5,748 = 3004,59$$

$$C_{\text{эл.об.СП}} = 0,1 \cdot 30 \cdot 5,748 = 17,24$$

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4.2 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (4.8)$$

$t_{\text{об}} = 121 \cdot 0,6 = 72,6$ в днях, умножим на 24 для перевода в часы и получим 1742,4.

Для принтера $t_{\text{об}}$ примем равным 30 часам, так как он использовался эпизодично.

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ.}} * K_{\text{С}} \quad (4.9)$$

где $P_{\text{НОМ.}}$ – номинальная мощность оборудования, для персонального компьютера 0,3, для струйного принтера 0,1, кВт;

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

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты $C_{\text{элОБ}}$, руб.
Персональный компьютер	1742,4	0,3	3004,59
Струйный принтер	30	0,1	17,24
Итого:			3021,83

4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены.

В данной работе использовалось уже имеющееся оборудование, и закупка специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют.

Однако в ходе эксплуатации основного оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями.

Так, расчет амортизационных отчислений производился линейным методом, результаты расчетов сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Амортизационные расходы

№	Наименование оборудования	Стоимость. руб.	Срок полезного использования. лет	Норма амортизации. %	Амортизационные расходы. руб.
1	ЭЛУ	4500000	10	64	114741,0
2	Микротвердомер	740000	7	45	18573,7
3	Оптический микроскоп	145000	10	59	3408,4
Итого:					136723,1

4.2.6 Расчет прочих расходов

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

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1$$

Для нашей работы это

$$C_{\text{проч.}} = (9860,00 + 356561,30 + 106968,39 + 3021,83 + 136723,10) \cdot 0,1 = 61313,46 \text{ руб.}$$

4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно

определить общую себестоимость проекта «Влияние термической обработки на структурно-фазовое состояние аустенитной нержавеющей стали (12X18H10T), полученной методом электронно-лучевой объемной наплавкой».

Таблица 4.6

Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	9860,00
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	356561,30
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	106968,39
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	3021,83
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	136723,10
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	61313,46
Итого:		674448,06

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 674448,06$ руб.

4.2.8 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере $5 \div 20$ % от полной себестоимости проекта. В нашем примере она составляет 134889,61 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

4.2.9 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это (**674448,06**+134889,61) * 0,2 = 161867,53 руб.

4.2.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$C_{\text{НИР(КР)}} = \mathbf{674448,06} + 134889,61 + 161867,53 = 971205,2 \text{ руб.}$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ7К	Рудик Андрей Александрович

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»/ Технология космического материаловедения

Тема ВКР:

Влияние термической обработки на структурно-фазовое состояние аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, полученной методом электроннолучевой наплавки	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования являются образцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, сформированные в изделие при помощи электронно-лучевой наплавки. Основные области применения: химическая и пищевая промышленность, авиастроение.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: — специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; — организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	По данной теме рассматриваются следующие документы: - инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ; - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы; - ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности; - ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности; - ГОСТ Р 50923-96. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	При проведении исследования возможны проявления следующих вредных и опасных факторов: - отклонение показателей микроклимата - превышение уровня шума;

	- недостаточная освещенность рабочей зоны; - повышенное значение электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; - контакт с реактивом для травления образцов;
3. Экологическая безопасность:	Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду: - утилизация люминесцентных ламп; - переработка бытового мусора.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Защита в чрезвычайных ситуациях: - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий; - действия для ликвидации пожара;

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Исаева Е.С.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Рудик А.А.		

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

В данном разделе рассматривается экологическая безопасность и безопасность научно-исследовательской работы, которая была проведена в институте физики прочности и материаловедения, в лаборатории контроля качества материалов и конструкций. Работа проводилась на предмет исследования образцов после влияния термической обработки на структуру аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, полученной методом электроннолучевой наплавки. В ходе исследования был подобран оптимальный режим отжига образцов.

На рабочем месте должны быть предусмотрены меры защиты от возможного воздействия опасных и вредных факторов производства. Уровни этих факторов не должны превышать предельных значений, оговоренных правовыми, техническими и санитарно-техническими нормами. Эти нормативные документы обязывают к созданию на рабочем месте условий труда, при которых влияние опасных и вредных факторов работающих либо устранено совсем, либо не превышают в допустимых пределах.

Объект исследования: вещество, материалы.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.

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

К самостоятельной работе с оборудованием допускаются сотрудники ИФПМ СО РАН и других научно-исследовательских организаций сибирского региона РФ, а также аспиранты, студенты, работающие в этих организациях. Для получения допуска к самостоятельной работе работник должен ознакомиться с правилами работы на оборудовании сдать экзамен.

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

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

По данной теме рассматриваются законодательные и нормативные документы:

- 1) инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.
- 2) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы.
- 3) ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности.

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

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

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

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

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

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

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 [2] рабочее место должно быть по высоте таким, чтобы при выполнении исследований и проведении расчетов и обработке данных не было необходимости сгибать корпус или приседать.

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

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Самостоятельно объект исследования, а именно титановый сплав из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, не сопутствует вредными и опасными факторами. Соответствует всем нормам СанПиНа. Не выделяет токсических веществ, излучения, постороннего запаха, в общем, не подвергает опасности жизнь человека.

Таблица 5.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Испытания	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [16].
2. Превышение уровня шума		+		

4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	Требования к уровню шума СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки[17] Требования к микроклимату устанавливаются СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [18]
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов[19].
6.Контакт с реактивом для травления образцов			+	ГН 2.2.5.3532–18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. [20]

5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

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

Все опасные и вредные производственные факторы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-74 подразделяются на физические, химические, биологические и психофизиологические.

К физическим факторам можно отнести:

- повышенная запыленность;
- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенный уровень шума на рабочем месте;

- опасность поражения электрическим током;

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

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

5.2.2.1 Превышение уровня шума

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

теоретических работ и обработки данных, не должен превышать 50-60 дБ [13]. Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются принтер, персональные компьютеры, периодическая работа вытяжной системы.

5.2.2.2 Контакт с реактивом для травления образцов

Вредными являются вещества, которые при контакте с организмом могут вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, как в процессе работы, так и в отдалённые сроки жизни настоящего и последующего поколений.

При выполнении работы для исследования образцов, в лаборатории используется реактив для травления образцов, который является едким веществом, по степени воздействия на организм человека относится к веществам 3-го класса опасности [14]. Как оговаривалось выше, раствор для травления вызывает сильные ожоги при контакте с кожей, пары поражают слизистые оболочки. В качестве защиты от вредного воздействия вещества рабочим выдаются средства индивидуальной защиты: стерильные диагностические латексные перчатки, маску для лица (медицинская одноразовая трехслойная). Первая помощь - при попадании раствора для травления образцов в глаза их промывают проточной водой в течение 10—30 мин.; при попадании на кожу пораженную поверхность обмывают водой с мылом. При проглатывании раствора келлера показано промывание желудка обильным количеством воды, инъекции морфина, атропина

5.2.2.3 Отклонение показателей микроклимата

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

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

В таблица 5.2 – Допустимые параметры микроклимата на рабочем месте (СанПиН 2.2.4.548-96).

Таблица 5.2

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			Ниже оптимально величины не более	Выше оптимальной величины не более
Холодный	17,0-18,9	21,1-23,0	16,0-24,0	15-75	0,1	0,3
Теплый	18,0-19,9	22,1-27,0	17,0-28,0	15-75	0,1	0,4

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

5.2.2.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Освещение исключительно важно для человека. С помощью зрения человек получает большую часть информации (около 90 %), поступающей из окружающего мира, напрямую в головной мозг. Свет — это ключевой элемент нашей способности видеть, оценивать форму, цвет и перспективу окружающих нас предметов. Освещение влияет не только на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, но и на психику человека, его эмоциональное состояние. Различными исследователями накоплено огромное количество исследовательских данных по биологическому воздействию видимого света

на организм. Установлено, что свет, помимо обеспечения зрительного восприятия, воздействует через нервную оптико-вегетативную систему на эндокринную систему, и влияет на многие основные процессы жизнедеятельности, регулируя обмен веществ и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды. Сравнительная оценка естественного и искусственного освещения по его влиянию на работоспособность показывает преимущество естественного света. Ведущим фактором, определяющим биологическую неадекватность естественного и искусственного света, является разница в спектральном составе излучения, а также динамичность естественного света в течение дня. Уровни освещённости при этом должны составлять 1000-1500 лк, и могут быть обеспечены дневным светом, если он имеется, или электрическим светом от общего или локализованного освещения, например настольных ламп или комбинацией дневного и естественного света. Работая при освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности и уменьшению концентрации внимания. В ряде случаев это может привести к головным болям. Причинами во многих случаях являются слишком низкие уровни освещённости, слепящее действие источников света и соотношение яркостей, которое недостаточно хорошо сбалансировано на рабочих местах.

Расчет искусственного освещения.

Самым распространенным источниками света на рабочем месте являются люминесцентные лампы. В помещении лаборатории используются люминесцентная лампа ШОД. ШОД - для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускается при умеренной влажности и запыленности.

Основные требования и значения нормируемой освещённости рабочих поверхностей изложены в строительных нормах и правилах СП 52.13330.2011, выбор освещённости осуществляется в зависимости от

размера объекта различения, контраста объекта с фоном, характеристики фона. Для того чтобы установить в каждом конкретном случае все перечисленные предметы, необходимо знание особенностей зрительной задачи на данном рабочем месте.

При работе с персональным компьютером в сочетании с работой с нормативной и технической документацией согласно нормам СП 52.13330.2011 регламентируется максимальная искусственная освещенность рабочих мест. Первый подразряд зрительной работы.

Получение из СП 52.13330.2011 величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, т.к. со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп снижается освещенность. Значение коэффициента запаса, выбираемого для помещения с малым выделением пыли, при люминесцентных лампах $KЗ = 1,5$.

Естественное освещение.

Помещения с постоянным пребыванием людей должны иметь, как правило, естественное освещение. Без естественного освещения допускается проектировать помещения, которые определены соответствующими главами СНиП на проектирование зданий и сооружений, нормативными документами по строительному проектированию зданий и сооружений отдельных отраслей промышленности, утвержденными в установленном порядке, а также помещения, размещение которых разрешено в подвальных этажах зданий и сооружений. Естественное освещение подразделяется на боковое, верхнее и комбинированное (верхнее и боковое). Нормированные значения КЕО (коэффициента естественной освещенности) для зданий, располагаемых в различных районах, следует определять по формуле:

$$e_N = e_H m_N \quad (5.1)$$

где N - номер группы обеспеченности естественным светом; e_H - значение КЕО;

m_H - коэффициент светового климата. Соответственно, при $e_H=1$, $m_H=0,75$.

$$e_N = 1 * 0,75 = 0,75 \quad (5.2)$$

При верхнем или комбинированном естественном освещении помещений любого назначения нормируется среднее значение КЕО в точках, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола). Первая и последняя точки принимаются на расстоянии 1 м от поверхности стен (перегородок) или осей колонн.

5.2.3 Анализ опасных факторов

5.2.3.1 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

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

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- продолжительности воздействия электрического тока или электромагнитного поля на организм человека;
- условий внешней среды [13].

Электротравма опасна прежде всего воздействием тока на сердечнососудистую систему. Напряжение от 36 вольт и выше вполне

способно вызвать остановку сердца или дыхания, однако убивает не напряжение, а сила тока. Рабочее помещение по опасности относится к 1 группе, т.е. пожарная нагрузка относительно мала.

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

5.2.3.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

При выходе на новую работу с каждым с сотрудником проводится инструктаж по технике безопасности, что сразу фиксируется в соответствующем журнале.

Каждый сотрудник знакомится с правилами оказания первой помощи при поражениях электрическим током, в помещении лаборатории находится аптечка со всеми необходимыми медикаментами. На стене вывешивается инструкция по технике безопасности, план эвакуации при пожаре.

Основные меры по технике безопасности на рабочем месте:

1. К работе с электроустановками допускаются лица, имеющие третью либо четвертую группу допуска, устанавливаемые квалификационной комиссией.
2. Лица, не имеющие непосредственного отношения к обслуживанию электроустановок, к работе с ними не допускаются
3. Все питающие части должны быть заземлены. Сопротивление заземления должно не превышать 4 Ом.

4. Для исключения поражения электрическим током запрещается: часто включать и выключать компьютер без необходимости, прикасаться к экрану и к тыльной стороне блоков компьютера, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании мокрыми руками, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании, имеющих нарушения целостности корпуса, нарушения изоляции проводов, неисправную индикацию включения питания, с признаками электрического напряжения на корпусе, класть на средства вычислительной техники и периферийном оборудовании посторонние предметы.

5. Запрещается под напряжением очищать от пыли и загрязнения электрооборудование.

6. Запрещается проверять работоспособность электрооборудования в непригодных для эксплуатации помещениях с токопроводящими полами, сырых, не позволяющих заземлить доступные металлические части.

7. Недопустимо под напряжением проводить ремонт средств вычислительной техники и оборудования. Ремонт электроаппаратуры производится только специалистами-техниками с соблюдением необходимых технических требований.

8. Во избежание поражения электрическим током, при пользовании электроприборами нельзя касаться одновременно каких-либо трубопроводов, батарей отопления, металлических конструкций, соединенных с землей. 1

9. При приближении грозы необходимо оперативно закончить работу на компьютере и отключить его от сети во избежание повреждения последовательного порта и исключения сбоев при возможных скачках напряжения в сети, характерных в подобных случаях.

5.3 Экологическая безопасность

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

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

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

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

- уменьшение и полное прекращение выбросов вредных веществ в атмосферу;
- сохранение и увеличение биомассы производителей кислорода и поглотителей углекислоты;
- сохранение и восстановление оптимальной циркуляции атмосферы в региональном масштабе;
- утилизация отходов вредных производств.

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

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

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

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

Вследствие использования работниками душевых, туалетов, специальных веществ для обработки материалов, а так же средств хозяйственного назначения, образуются жидкие отходы для удаления которых применяют канализационную систему. Система канализации подсоединена к городской канализационной сети, поэтому полная очистка сточных вод на нем не проводится.

Также из-за использования обтирочных материалов образуются твердые отходы, для которых предусмотрены места хранения, и в конце

рабочего дня они очищаются. При удалении отходов с территории предприятия им присваиваются категории опасности и вывозятся на соответствующие полигоны (промышленных отходов, токсичных отходов и т.д.).

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Возможные чрезвычайные ситуации при выполнении проекта являются: поражение электрическим током, замыкание электрической цепи, и как следствие, пожар. Для предотвращения чрезвычайной ситуации необходимо осуществлять меры по технике безопасности на рабочем месте.

Пожар – это неконтролируемый процесс горения, причиняющий материальный ущерб, вред жизни и здоровью человека, интересам общества и государства.

К основным причинам возникновения пожаров можно отнести: неосторожное обращение с огнём; несоблюдение правил эксплуатации производственного оборудования и электрических устройств; самовозгорание веществ и материалов; разряды статического электричества; грозовые разряды; поджоги.

Опасные факторы пожара, воздействующие на людей:

- высокая температура среды в зоне горения, открытый огонь, искры;
- дымообразование, токсичные продукты горения;
- пониженная концентрация кислорода в зоне пожара за счет его роли как окислителя в химических реакциях при горении;
- обрушение конструкций здания, падение обгоревших предметов;
- вероятность взрыва.

Высокая температура в зоне горения может привести к ожогам или обгоранию кожного покрова тела, вызвать потерю несущей способности строительных конструкций зданий и сооружений, и как следствие их обрушение.

Дымообразование, как сопутствующая характеристика пожара, чрезвычайно опасно для человека. Дым — это сложная смесь газообразных и мелкодисперсных продуктов горения. Вдыхание продуктов горения приводит к острым отравлениям и необратимым последствиям.

На рабочем месте целесообразно проводить комплекс мероприятий направленных на пожарную безопасность. Используемый технологический процесс согласно техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности относится к категории Д, так как использует негорючие вещества в холодном состоянии. В данном случае источникам возгорания может оказаться неисправность и неправильная эксплуатация электроустановок.

Существует 5 степеней огнестойкости зданий, сооружений. Помещение лаборатории можно отнести к первой ступени огнестойкости. Предусмотренные средства пожаротушения (согласно требованиям противопожарной безопасности СНиП 2.01.02.-85) огнетушитель ручной углекислотный ОУ-5, пожарный кран с рукавом и ящик с песком (в коридоре). Кроме того, каждое помещение оборудовано системой противопожарной сигнализации.

Пожар - одно из самых страшных бедствий. Он беспощаден. Возгорание, как правило, происходит очень быстро, и потушить его не всегда удается. Поэтому действия при пожаре прописаны в инструкции, которую каждый гражданин должен знать. На предприятиях специально проводятся мероприятия по защите населения от этой чрезвычайной ситуации. Действия персонала при пожаре на предприятии:

- услышав крики: "Пожар", ни в коем случае не поддаваться панике, сохранять спокойствие;

- осмотреться вокруг. Заметив телефон или кнопку пожарной безопасности, действовать незамедлительно - сообщить службам о возгорании;

- попробовать самостоятельно потушить возгорание, используя огнетушитель, землю;

- если ликвидировать пожар не получается, покинуть помещение через эвакуационный выход;

- не поддаваться панике, стараться успокоить других;

- двигаться к выходу, дышать через рукав одежды или носовой платок;

- если в помещении сильная задымленность, перемещаться, опираясь на стены или поручни;

- оказавшись на свежем воздухе, немедленно вызвать "Скорую помощь".

Основными мероприятиями, обеспечивающими успешную эвакуацию людей и имущества из горящего здания, являются:

- составление планов эвакуации;

- назначение лица, ответственного за эвакуацию, которое должно следить за исправностью дверных проемов, окон, проходов и лестниц;

- ознакомление работающих в лаборатории сотрудников с планом эвакуации, который должен висеть на видном месте.

Вывод по разделу

В данном разделе были рассмотрены и проанализированы опасные и вредные факторы, которые могут оказывать воздействие на обслуживающий персонал исследовательской лаборатории, а также средства защиты от этих факторов. При выполнении исследовательской работы в лаборатории существует вероятность воздействия таких вредных производственных факторов, как повышенный уровень шума, повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, недостаточная освещенность, контакт человека с реактивом для травления образцов, отклонение показателей микроклимата. В результате анализа были предложены решения, обеспечивающие снижение влияния выявленных опасных и вредных факторов на работающих. Даны рекомендации по обеспечению оптимальных условий труда и охране окружающей среды.

Кроме того, был произведен анализ наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций, которые могут возникнуть в ходе исследования, и предложены превентивные меры по предупреждению их возникновения, а именно возникновение пожара на рабочем месте.

Заключение

Методом послойной электронно-лучевой наплавки выращены образцы в виде заготовки бруска из проволоки нержавеющей стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т. Изучены микроструктуры образцов полученных в поперечном сечении заготовки (ХЗ). Образец можно разделить на две основные зоны заготовки, отличающиеся структурой и свойствами: основа и зона наплавленного металла. Структура наплавленного металла представляет собой дендриты (столбчатая структура), оси которых ориентированы в направлении теплоотвода при кристаллизации. Структура корневой зоны наплавленного металла представляет собой более равноосные кристаллы, имеющие так же, как и наплавленный металл, дендритное, но более дисперсное строение.

После гомогенизирующего отжига с различной выдержкой при разных температурных режимах было выявлено, что на третьем и четвертом режимах термообработки начинают появляться кардинальные изменения микроструктуры, а именно зарождается процесс рекристаллизации. На образцах №3 и №4 еще просматриваются остатки дендритной структуры в наплавленном металле. При пятом и шестом режимах термообработки происходит полная рекристаллизация наплавленного металла. Структура наплавки стала аустенитной.

В ходе исследования было выявлено, что оптимальным режимом гомогенизирующего отжига является режим №6, при котором структура наплавленного металла становится аустенитной и практически исчезает граница между основным и наплавленным металлом. Роста зерна при термообработке по режиму №6 не наблюдается.

А так же наблюдается эффект выравнивания твердости основного и наплавленного металла в результате термообработки. После оптимального режима отжига (режим №6) значение твердости наплавленного металла

максимально приближается к значению твердости основного металла и составляет соответственно 152 и 148 НВ.

Получение при отжиге в наплавленном металле аустенитной структуры позволяет снять сварочные напряжения в наплавленном металле, что должно положительным образом сказываться на стойкости сварных соединений, выполненных с помощью вакуумной электронно-лучевой установки, к межкристаллитной коррозии (МКК) и ножевой коррозии в агрессивных средах.

Список используемых источников

1. А.А. Бакиновский, А.И. Гордиенко, М.К. Степанкова Металлографический анализ образцов, полученных методом электронно-лучевой послойной наплавки из аустенитной нержавеющей стали. Изд-во Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск 2015, 112 с.
2. 6. И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, И.В. Осипов, А.Г. Рау, Г.В. Семенов. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий. «ТУСУР – 55 лет: Некоторые итоги». 2017, 76 с.
3. Электронно-лучевое сплавление (EBM) [Электронный ресурс]: URL: <http://spt.tpu.ru/technology/ebm/>
4. И.А. Хоминич, Д.М. Зинченко Применение современных инновационных технологических решений при реализации сложных задач агрегатов модели летательного аппарата замкнутой аэродинамической схемы. 2017, с. 71.
5. А.В. Щербанов, Р.В. Родякина, А.С. Кожеченко, Н.М. Вахмянин, Д.А. Гапонова, В.П. Рубцов Особенности управления процессом электронно-лучевого сплавления аддитивного формообразования. Изд-во ФГБОУВО «НИУ МЭИ» 2018, с. 54.
6. Характеристики стали 12X18H10T [Электронный ресурс]: URL: http://www.allmetal.ru/manual/xarakteristiki/stal_12x18n10t/
7. Характеристики и свойства стали 12X18H10T [Электронный ресурс]: URL: <https://www.kp.ru/guide/stal-12kh18n10t.html>
8. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

9. Е.А. Левашов, А.С. Рогачев, В.И. Юхвид, И.П. Боровинская. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. — М.: Бином, — 1999, — 176 с.

10. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V / S.S. Al-Bermani, M.L. Blackmore, W. Zhang, I. Todd // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2010. — Vol. 41, iss. 13. — P. 3422–3434. — doi: 10.1007/s11661-010-0397-x.

11. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review / Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang, M.L.S. Nai, N.H. Loh, E. Liu, S.B. Tor // OBRABOTKA METALLOV Vol. 20 No. 4 2018 69 MATERIAL SCIENCE Materials and Design. — 2018. — Vol. 139. — P. 565–586. — doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.

12. Basak A., Das S. Epitaxy and microstructure evolution in metal additive manufacturing // Annual Review of Materials Research. — 2016. — Vol. 46. — P. 125–149. — doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-031728.

13. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Изд-во СПбГУ, 2013, 221 с.

14. Зайнудинов А.М., Александров Ю.Б. Перспективы использования 3D-печати в авиастроении. Международный научно-исследовательский журнал. №5 2015. 64-65 с.

15. Зленко М.А., Аддитивные технологии в машиностроении /Нагайцев.М.В, Довбыш В.М. // пособие для инженеров. — М.ГНЙ РФ ФГУА «НАМИ» 2015. 220 с.

16. М.В. Мальцев Металлография промышленных цветных металлов и сплавов., 2-е изд. Из-во «Металлургия», 1970, 364с.

17. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Л12 Материаловедение: Учебник для машиностроительных вузов – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение. 1980. -493с.

18. И.И.Сидорин, Г.Ф. Косолапов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин, Н.М. Рыжов, В.И. Силаева, И.В. Смирнов Основы материаловедения. Учебник для вузов. Под ред. И.И.Сидорина. М., «Машиностроение»,1976. 436с.

19.Марочник сталей и сплавов/В.Г. Сорокин, А.В. Волосикова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение. 1989. - 640с.

20. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т.1. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 736с.

Приложение А

Раздел №1 Литературный обзор

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ7К	Рудик Андрей Александрович		

Консультант школы отделения (НОЦ)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Сорокова С.Н.	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник отдела международных программ и грантов	Рыбушкина С.В.			

Chapter 1. Literary Review

1.1 Methods of additive production

3D printing, as one of the methods of “additive manufacturing is based on the concept of an object constructing by applying a layer by layer, that displays the outlines of the model. In fact, 3D printing totally differs from the traditional methods of mechanical production and processing, such as milling or cutting, where the appearance of the product is formed by removing excess material. Although the 3D printing technology appeared in the 80s of the last century, 3D printers were widely commercialized only in the early 2010s.

The main advantage of this process is the ability to create geometric shapes of almost unlimited complexity.

The main methods are presented in table 1.1.

Table 1.1 - The main methods of additive production [4].

Method	Technology	Materials
Extrusion	Fused deposition modeling, Fused Filament Fabrication (FDM and FFF)	Thermoplastics (such as polylactide (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), etc.)
Wire	Production of arbitrary shapes by the method of Electron Beam Freeform Fabrication (EBF)	Any metal alloys
Powder	Direct metal laser (DMLS)	Any metal alloys
	Electron Beam Melting (EBM)	Titanium Alloys
	Selective Laser Melting (SLM)	Titanium Alloys, Cobalt Chromium Alloys, Stainless Steel, Aluminum
	Selective Heat Sintering (SHS)	Powder Thermoplastics
	Selective Laser Sintering (SLS)	Thermoplastics, Metal Powders, Ceramic Powders
Inkjet	Inkjet three-dimensional printing (3DP)	Gypsum, plastics, metal powders, sand mixtures
Lamination	Laminated Object Manufacturing method (LOM)	Paper, metal foil, plastic membrane
Polymerization	Stereolithography (SLA)	Photopolymers
	Digital LED Projection (DLP)	Photopolymers

The main advantages of additive technologies are:

- 1 There is no conflict between the designer and technologist, since both functions can be performed by one specialist;
- 2 There is the possibility of manufacturing products of complex geometric configuration, as well as products with internal channels and cavities, with a large surface area, small volume;
- 3 There is no need to manufacture tooling and molds;
- 4 There is a small number of material loose and industrial waste;
- 5 There is the reducing of time of raw materials supply, reducing the volume of the warehouse;
- 6 There is the expediency in individual or small-scale production;
- 7 There is the reduction of component parts of created components and assemblies;
- 8 There is the reducing of number of technological operations, automation of the process, reducing the complexity and time of manufacturing.

The whole process of additive manufacturing consists of the following steps: a 3D model of the detail is created with the help of software tools for volumetric modeling; the volumetric computer model is converted into the conventional STL format, loaded into the memory of the AP installation; the installation software cuts the virtual model into layers of the required thickness before starting the production process (each manufacturer's cutting algorithms are based on their own software algorithms and are patented); then the process of layer-by-layer products growing based on the data takes place (the "hard" fragments of the section are processed). The additive principle is characterized by such a consistent, multi-level approach to the manufacture of objects. After the cultivation process is completed,

if necessary, a finishing post-processing is carried out [3]. The process steps are depicted in Figure 1.1.

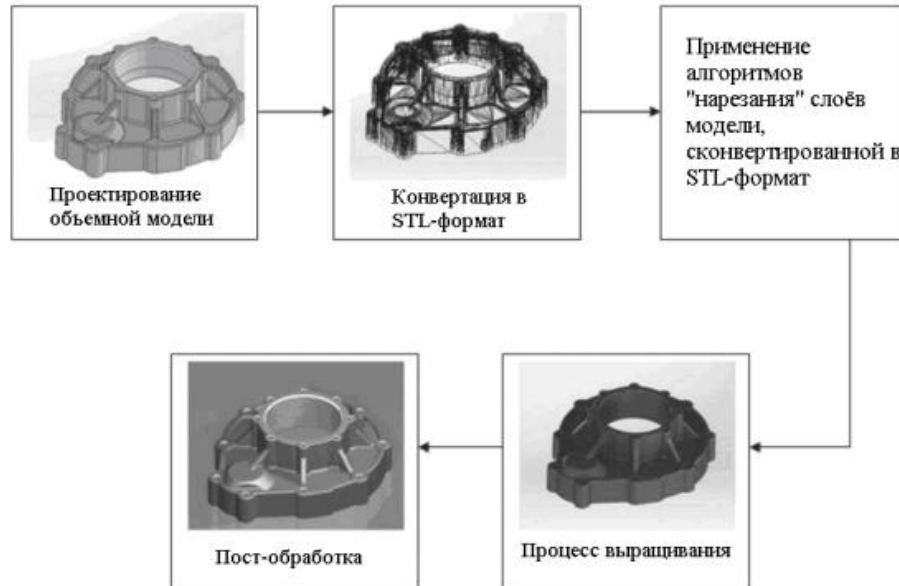


Figure 1.1 - Stages of growing products process [3].

1.2 Mathematical model of the electron-beam volume surfacing process

For a detailed study of surfacing process as an object of the control in this problem formulation, with the exclusion of uncontrolled disturbing factors and instruments measurement errors, it is proposed to use the method of mathematical modeling. The process of heat transferred in the deposited structure is conveniently described in the form of a non-stationary problem of heat conduction with moving in time boundary conditions describing the process of introducing the filler material. In Cartesian coordinates, the heat equation takes the form:

$$\begin{aligned}
 c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_v - \frac{\partial \psi_m(T)}{\partial t} L_m \rho(T),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

where T is the temperature, K; t - time, with; $\lambda(T)$ is the coefficient of thermal conductivity, W / (m · K); $c(T)$ is the specific heat of the substance, J / (kg K); $\rho(T)$ is the density of the substance, kg / m³; q_v is the amount of heat released by internal sources per unit volume per unit of time while the impact of an electron

beam on the material, W / m^3 ; x, y, z - Cartesian coordinates of the current calculated point, m ; L_m — latent heat of metal melting, J / kg ; $\psi_m(T)$ is the part of the melt in the two-phase domain, calculated in each control volume at each time using the formula:

$$\psi_m(T) = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & T_s < T < T_L \\ 1, & T > T_L \end{cases} \quad (2)$$

Table 1.2 - Baseline data for the mathematical model of the process of electron-beam additive shaping

№	Parameter	Indicator	Unit of measurement
1	Material	Steel12X18H10T	-
2	Heat capacity at 20°C (1400°C)	110 (800)	J / (kg K)
3	Thermal conductivity at 20°C (1400°C)	11 (29)	W / (m · K)
4	Density	7800	kg / m ³
5	Latent heat of fusion	260	kJ / kg
6	Temperature solidus, T_s	1673	K
7	Liquidus temperature, T_L	1729	K
8	Coordinate step of a finite-difference grid	0,125	mm
9	Time step	0,0125	s
10	The speed of the beam (and the feed rate of the filler material)	10–20	mm/s
11	Accelerating stress	60	kV
12	Beam power	0–1000	W
13	Effective radius of the beam	0,25–1,5	mm

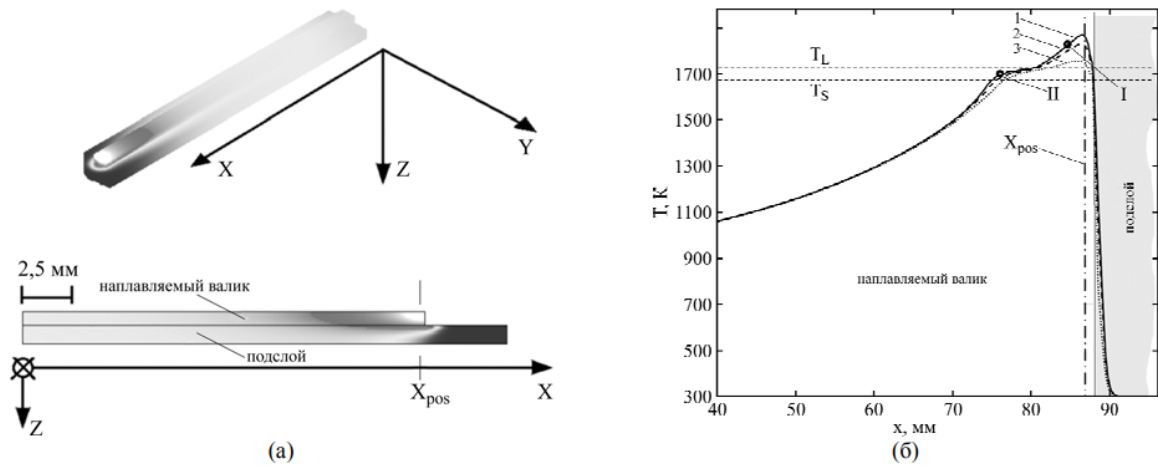


Figure 1.2 - Temperature field (a) and temperature distribution along the x axis in a quasi-stationary surfacing mode (b) with a beam power of 800 W, effective beam radius $r_{eff} = 1$ mm and a movement speed of 17.5 mm / s: x_{pos} is the x-coordinate of the axis beam; 1 - temperature distribution along the x axis at $y = y_{pos}$ (on the beam axis); 2 - the same at a distance of 0.5 mm from the axis ($y = y_{pos} + 0.5$ mm); 3 - the same at a distance of 1 mm from the axis ($y = y_{pos} + 1$ mm); T_S is the solidus temperature; T_L is the liquidus temperature; I, II - points of the proposed temperature measurement.

In the last expression, T_S and T_L are respectively the solidus and liquidus temperatures of the filler material, K. The distribution function of the amount of heat continuously released in the subsurface layer dz with the z -coordinate of the z_p surface has the form of a normal distribution function and is defined as:

$$q_v(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & z < z_{nos} \\ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{r_{eff}^2} \cdot I_b \cdot U_a \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_{pos}(t))^2 + (y-y_{pos}(t))^2}{r_{eff}^2} \right)} \cdot \frac{1}{dz}, & z = z_{nos} \\ 0, & z > z_{nos} \end{cases} \quad (3)$$

where r_{eff} is the effective radius of the beam; $x_{pos}(t)$, $y_{pos}(t)$ - coordinates of the center of the electron beam. On all the boundaries of the computational domain, the Neumann boundary conditions were specified. The problem described by the system of equations (1) - (3) was solved by the finite difference method using the implicit difference scheme and the method of fractional steps

implemented in Microsoft Visual Studio. The data used in the development of the model are summarized in the table. The surfacing process was modeled by adding an element with a height of 1 mm, a width of 2.5 mm and a length of 0.125 mm to the area of impact of the beam at each time step. In fig. 2a shows the appearance and geometrical dimensions of the computational domain in the process of surfacing, as well as the picture of the temperature field, and Fig. 2b — characteristic for the practice of surfacing modes used in practice, temperature distributions along the x axis at different distances from the electron beam axis.

The temperature distributions shown in Fig. 1.3, agrees well with the experimental data and, despite the presence of regions with small temperature derivatives with respect to the x coordinate, which correspond to the two-phase zone, it can be assumed that, in general, at constant beam current, the temperature decreases monotonically with distance from the electron deceleration region. This fact is the first confirmation of the possibility of using closed systems to stabilize the mode of electron beam surfacing.

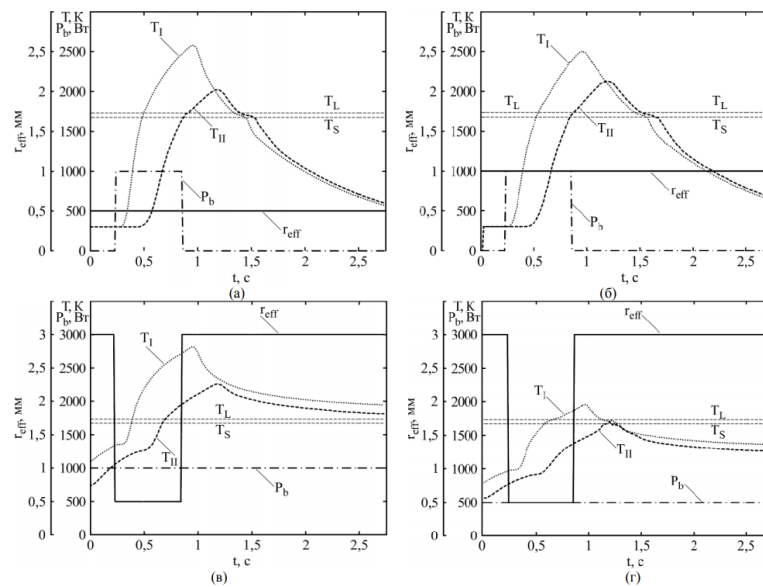


Figure 1.3 - Time dependences of temperatures at points I and II with: (a), (b) - stepwise change in the power of the Pb beam; (c), (d) —step change in the effective beam radius r_{eff} .

Moreover, it is obvious that to measure the parameters of a liquid bath in the process of surfacing, in the simplest case, it is sufficient to measure the temperature at two characteristic points - a point located near the beam exposure area (point I in the figure) - to measure the average temperature of the metal overheated above the temperature T_L , as well as at point II, located at some distance from the first and, accordingly, from the acting beam. The temperature at this point may, for example, be in the range between T_L and T_S , the corresponding two-phase region or the boundary of the liquid bath. However, to confirm the technical feasibility of control systems that use temperature signals at specified points as feedback signals, it is necessary to study the static and dynamic modes of operation of the control object described above.

The main interest is the response of the object to step input effects on both control channels. Figure 3 shows characteristic temperature changes at points I and II with a stepwise change in the power of the Pb beam, controlled by the current (Figure 3a, b) and its effective radius r_{eff} (Fig. 3c, d), changed by the focusing current. The type of temperature dependences $T_I(t)$ and $T_{II}(t)$ remains almost unchanged when the input variables Pb and r_{eff} are varied within fairly wide limits. An important conclusion that was made as a result of analyzing the temporal dependences of the temperature $T_I(t)$ and $T_{II}(t)$ for different amplitudes of Pb and r_{eff} is that the time constants for heating the material at the specified points do not depend on the beam power or degree of focus and are determined only by the transverse dimensions of the roll bead, the thermophysical properties of the filler material and the speed of the beam. In Figure 3, this is confirmed by the fact that T_I temperature maxima are reached after the same time interval has elapsed after the application of a beam current pulse (stepwise increasing power Pb) or a focus current pulse (stepwise decreasing r_{eff}) regardless of the amplitude values of the second, unchanged effect. In fig. 1.4 The duration of this interval is 0.65 s. Similarly, the maximum temperature T_{II} is reached 0.95 s after passing the leading edge of the beam current pulse at a constant focusing current or focusing current pulse at a constant beam current.

These time intervals were obtained when simulating the weld deposition of 12X18H10T steel with a cross section of 2.51 mm with a beam movement speed of 17.5 mm / s.

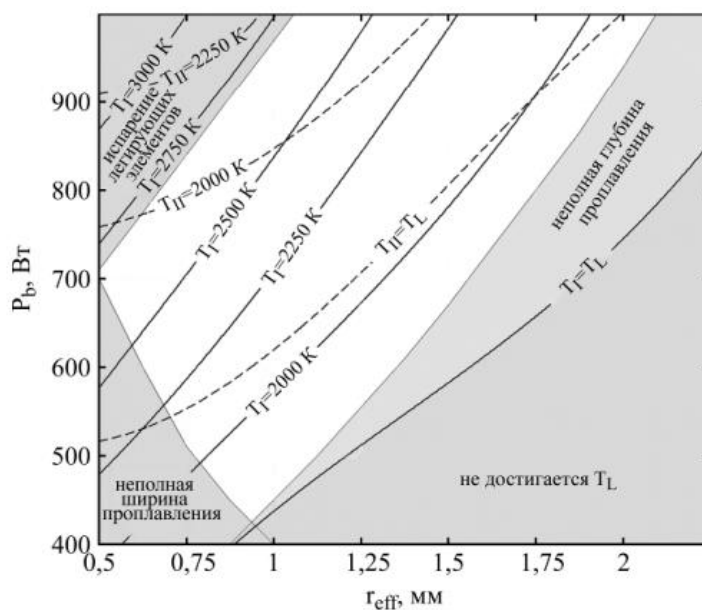


Figure 1.4 - Dependences of temperature T_I and T_{II} at points located behind a moving electron beam at a distance of 3 and 8 mm in the stationary mode of the liquid bath, on the power of the P_b beam and its effective radius r_{eff} .

The limitations of the ranges of variation of the beam power and its effective radius are determined by the need to ensure complete penetration of the filler material supplied. So, with too “sharp” beam focusing, that is, with small values of r_{eff} , a situation is possible in which the fed wire will melt only partially, in the central part. And, on the contrary, with too “soft” focusing, that is, with large r_{eff} values, the heat flux density will be insufficient to melt the material during the exposure or only its surface layer will melt. Figure 4 graphically shows the temperature dependences obtained at the T_I point located at a distance of 3 mm behind the axis of symmetry of the beam on the roll bead and the temperature at T_{II} located 8 mm behind the axis of symmetry of the beam of the weld roller as a result of computational experiments. The two main influencing factors are the power of the P_b beam and the radius of the ray r_{eff} .

All temperatures T_I and T_{II} are calculated for the steady-state mode of surfacing with the exclusion of any disturbing factors. The time to reach the stationary mode of surfacing, at which the temperatures T_I and T_{II} stop changing in time, is 1.75 s. The speed of the beam - 17.5 mm / s. As a result of the experiments, two table functions of the surface $T_I = f(P_b, r_{eff})$ and $T_{II} = f(P_b, r_{eff})$ were obtained. To facilitate the perception of the information obtained as a result of experiments in Fig. 4 shows only lines of equal temperature for $T_I = T_L$ (1729K), 2000 K, 2250 K, 2500 K, 2750 K and 3000 K, and also for $T_{II} = T_L$, 2000 K and 2250 K. All intermediate temperatures at two points can be obtained by linear interpolation.

Analysis of the results of computational experiments showed that the range of changes in input variables is very limited. Thus, the complete melting of the filler material is ensured at a power of at least 430 W and a beam radius of 0.9 mm.

A further decrease in the power density of the beam (an increase in r_{eff}) leads to a decrease of temperature at T_I below the liquidus temperature. It should be noted that at the indicated beam power, the temperature T_{II} is noticeably lower than the liquidus temperature and is approximately 1520 K. In practice, the transition to the mode with acute focusing causes the appearance of metal splashes and the unstable mode of formation of a liquid bath, which is caused by hydro- and gas-dynamic processes that are not taken into account when modeling in the described setting.

With increasing beam power, the level range of the beam focusing degree increases notably. For example, with a beam power of 700 W, the beam radius can vary from 0.5 to 1.6 mm. However, with a further power increase, the range of permissible values of control actions shifts towards an increase of the beam radius. This is due to the fact that at high powers and small diameters of the beam, the melt temperature can reach the evaporation temperature of any alloying

components, which leads to a significant change in the physicomachanical properties of the deposited material. In the same power range, the temperature at the TI point is higher than the liquidus temperature without overheating of the melt, possibly due to a strong defocusing of the beam — with r_{eff} radius up to 2 mm. However, in this mode, there will be a significant warming up of the whole deposited construction and in the areas adjoining to the weld position. Therefore, both increasing the beam power to values higher than 1000 W and further defocusing the beam turn out to be inexpedient due to a significant decrease in the energy efficiency of the process.

The main result of the research, presented in Figure 4, follows from the fact that the TI and TII isotherms are not parallel. This let us to make an important conclusion: moving along any of the TI isotherms, feasible by joint adjustment of the power and effective radius of the beam, leads to TII temperature change in the steady-state deposition mode. This conclusion confirms the correctness of the selected input values, as well as the technical feasibility of systems for stabilizing the temperature and size of the liquid bath. For example, to move along the isotherm $TI = 2500$ K from left to right, it is necessary to increase both the power of the Pb beam and its effective radius r_{eff} . When moving in this direction, the temperature at point TII will continuously increase, which is connected with an increase of the heating spot size. When $r_{eff} = 1.05$ mm, the temperature TII reaches 2500 K, and with further increase of the radius and power of the beam will continue to grow.

Obviously, to create a control system that provides simultaneous regulation of the beam current and the focusing current of the magnetic lens based on temperature sensor signals, it is necessary to solve many technical problems related to the nonlinearity of the control object, the inertia of local regulators and some other factors.

Technical recommendations for building a system at a technological set

At the first stage, it is necessary to make sure that the selected control channels are independent in terms of the beam current and the magnetic focusing current. In typical designs of electronic guns used for welding and surfacing, when adjusting the beam current due to bias voltage, as a rule, there is a shift of the focusing plane associated with a change in the electric field near the cathode. When welding, the effect of shifting the focusing plane is not always taken into account, since the current is reduced most often when seams are closed, when they want to prevent the formation of a crater. The exception, perhaps, are only thin-walled products. In the case of surfacing of complex shape products of variable cross section, taking into account the influence of reheating zones, when a rather “deep” current control may be required, this effect cannot be neglected. To date, the limiting definition for installations of electron-beam surfacing is 1 mm in width and 0.3 mm in height of the roller, and the transverse dimensions of the rollers realized in commercial samples are about 10 mm. Thus, it is obvious that it is necessary to maintain the beam focusing in the area of the surfacing unchanged while regulating the current. To solve this problem, the introduction of a dynamic focus correction channel is not advisable. This is due to the fact that, firstly, the relationship between the beam current and the required focusing current is non-linear, and, secondly, the focusing current transfer coefficient itself would have to be constantly adjusted due to changes in the emission properties of the cathode during its operation or after replacements. For this reason, the most rational method of controlling the beam current is the two-step control method, in which the bias voltage can take only two quantities — the nominal value, corresponding to the nominal beam current and the blocking voltage, in which the beam current is zero. In this mode of adjustment, focusing correction is not required, and the equivalent power released in the liquid bath can be adjusted by the frequency and duration of the current beam pulses.

The period of modulation of the beam current with such a regulation should be approximately 2 orders of magnitude shorter than the period of establishing a steady-state mode of surfacing. This period can be from tenths of seconds to

several seconds, depending on the cross-section of the roll to be deposited, and the modulation frequency, respectively, should vary in the range from hundreds of hertz to kilohertz.

An extremely important technical circumstance is the regulation of the equivalent dimensions of the heating spot in the area of surfacing. Since the existing gun's radial distribution of the beam differs from the normal distribution function described by equation (3) and may have sharp peripheral boundaries and current density dips, a more rational method of controlling the size of the heating spot is the dynamic deflection of the beam in a magnetic field realized by deflection coils, included in the standard equipment of the gun. The frequency of the beam deflection should be selected taking into account the same recommendations as the current modulation frequency. The shape of the trajectory of the beam movement is practically unlimited and can be complex spatial lines, moving along which the beam will simultaneously heat both the wire and the roller itself.

Finally, the most important aspect is the choice of sensor types and methods for measuring temperatures T_I and T_{II} . There are two factors should be taken into account. First, the temperature equalization speed in reality, that is, taking into account convective heat exchange, can be higher than in the case considered, therefore determining the minimum response time of the pyrometers and determining the temperature measurement points, as well as their values, remains a task that requires further development on stage of the set prototype. And secondly, as a number of papers rightly noted, even detailed information about the temperature distribution over the surface of a metal bath cannot provide information about its distribution over the depth of the forming roller. This technical problem arising during the deposition of materials supplied in the form of powders, in this case, can be solved by transferring the temperature measurement point T_I to the sublayer before the moving beam directly into the filler wire feed area. Moreover, in this case, all the fundamental results obtained during the

research, described in the article remain relevant, and the structure of the system does not change.

It should be noted that the above results can be scaled for other areas of input values change - surfacing speed, power, heating spot diameter, wire feed speed and roll section cross-section. The qualitative differences in the dependences obtained for other modes of surfacing may be associated with a change in the mode of the metal transfer, and in this case it is possible to establish the relevant criteria used by researchers in this area at present. However, to verify the results of such studies, it is necessary to conduct a series of experiments using thermal imaging equipment and the subsequent analysis of the shape, structure and properties of the deposited material [5]