

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

Институт Юргинский технологический институт
Направление подготовки (специальность) 15.03.01 «Машиностроение», профиль
«Оборудование и технология сварочного производства»

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Тема работы
Исследование структуры и механических свойств изделий, выращенных электродуговым послойным выращиванием

УДК 621.7.047/.048:672

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
10A72	Турсунов И.Ф.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Крюков А.В.	К.Т.Н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Крюков А.В.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Хаперская А.В.	к.пед.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Солодский С.А.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП «Машиностроение»	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Ильященко Д.П.	К.Т.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Умением использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
ОПК(У)-2	Осознанием сущности и значения информации в развитии современного общества.
ОПК(У)-3	Владением основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации.
ОПК(У)-4	Умением применять современные методы для разработки малоотходных, энергосберегающих и экологически чистых машиностроительных технологий, обеспечивающих безопасность жизнедеятельности людей и их защиту от возможных последствий аварий, катастроф и стихийных бедствий; умением применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов в машиностроении.
ОПК(У)-5	Способностью решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-5	Умением учитывать технические и эксплуатационные параметры деталей и узлов изделий машиностроения при их проектировании

ПК(У)-6	Умением использовать стандартные средства автоматизации проектирования при проектировании деталей и узлов машиностроительных конструкций в соответствии с техническими заданиями
ПК(У)-7	Способностью оформлять законченные проектно-конструкторские работы с проверкой соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам
ПК(У)-8	Умением проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных решений
ПК(У)-9	Умением проводить патентные исследования с целью обеспечения патентной чистоты новых проектных решений и их патентоспособности с определением показателей технического уровня проектируемых изделий
ПК(У)-10	Умением применять методы контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности, проводить анализ причин нарушений технологических процессов в машиностроении и разрабатывать мероприятия по их предупреждению
ПК(У)-11	Способностью обеспечивать технологичность изделий и процессов их изготовления; умением контролировать соблюдение технологической дисциплины при изготовлении изделий
ПК(У)- 12	Способностью разрабатывать технологическую и производственную документацию с использованием современных инструментальных средств
ПК(У)- 13	Способностью обеспечивать техническое оснащение рабочих мест с размещением технологического оборудования; умением осваивать вводимое оборудование
ПК(У)- 14	Способностью участвовать в работах по доводке и освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новой продукции, проверять качество монтажа и наладки при испытаниях и сдаче в эксплуатацию новых образцов изделий, узлов и деталей выпускаемой продукции
ПК(У)- 15	Умением проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования, организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт оборудования
ПК(У)-16	умением проводить мероприятия по профилактике производственного травматизма и профессиональных заболеваний, контролировать соблюдение экологической безопасности проводимых работ
ПК(У)-17	Умением выбирать основные и вспомогательные материалы и способы реализации основных технологических процессов и применять прогрессивные методы эксплуатации технологического оборудования при изготовлении изделий машиностроения
ПК(У)-18	Умением применять методы стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей используемых материалов и готовых изделий
ПК(У)-19	Способностью к метрологическому обеспечению технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции

Студент гр.10А72
Руководитель ВКР

Турсунов И.Ф.
Крюков А.В.

	<p>5. Исследование механических свойства металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере.</p> <p>6. Социальная ответственность.</p> <p>7. Концепция стартап-проекта</p>
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Слайд 1. Титульный лист.</p> <p>Слайд 2. Актуальность работы.</p> <p>Слайд 3. Преимущества электродуговых способов получения металлических изделий.</p> <p>Слайд 4. Цель и задачи работы</p> <p>Слайд 5. Проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера</p> <p>Слайд 6. Проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера</p> <p>Слайд 7. Дуговые способы получения металлических изделий</p> <p>Слайд 8. Методы и методики проведения исследований</p> <p>Слайд 9. Структура металлических изделий напечатанных на 3D-принтере</p> <p>Слайд 10. Структура металлических изделий напечатанных на 3D-принтере</p> <p>Слайд 11. Результаты апробирования работы</p> <p>Слайд 12. Выводы</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Технологическая и конструкторская часть	Крюков А.В.
Концепция стартап-проекта	Хаперская А.В.
Социальная ответственность	Солодский С.А.

Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Крюков А.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
10А72	Турсунов И.Ф.		

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

Институт Юргинский технологический институт

Направление подготовки (специальность) 15.03.01 «Машиностроение», профиль
«Оборудование и технология сварочного производства»

Период выполнения (осенний / весенний семестр 2020 – 2021 учебного года)

Форма представления работы:

Дипломный проект

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

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
на выполнение выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом готовой работы	
-------------------------------------	--

Дата контроля	Название раздела (модуля)/ Вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
17.01.2021	Литературный обзор по исследуемой тематике	10
17.02.2021	Проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера	15
17.03.2021	Методы и методики исследований	15
10.04.2021	Исследование структуры металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере	15
10.05.2021	Исследование механическая структура металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере	15
21.05.2021	Социальная ответственность	15
25.05.2021	Концепция стартап-проекта	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Крюков А.В.	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП «Машиностроение»	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Ильященко Д.П.	К.Т.Н.		

Юрга – 2021г.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»

Студенту:

Группа	ФИО
10А72	Турсунов Искандар Фарходович

Институт	Юргинский технологический институт	Отделение	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.01 Машиностроение

Перечень вопросов, подлежащих разработке:	
Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР	Цель устройства – изготовление сложных корпусных деталей изметаллической сварочной проволоки путем послойного наплавления.
Способы защиты интеллектуальной собственности	Патент на полезную модель и на промышленный образец.
Объем и емкость рынка	Объем рынка = 8 млн. руб.
Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт	Сегодня Россию никак нельзя назвать лидером в этой сфере. Доля России составляет всего 1%, страна находится на 11 месте в мире по производству и внедрению аддитивных технологий, однако рынок 3D-печати в России за последние 8 лет вырос в 10 раз, совокупные продажи оборудования, материалов и услуг в области аддитивного производства, включая НИОКР, выросли до 4,5 млрд. в год (оценка 2018 г.). На закупку оборудования и материалов приходится около 80% объемов рынка. В целом, в настоящее время на российском рынке аддитивных технологий отечественное оборудование занимает порядка 42%, иностранное оборудование — около 60%. Таким образом, в данной сфере снизилась импортозависимость с 96% до 60%
Себестоимость продукта	80036,5руб.
Конкурентные преимущества создаваемого продукта	<ul style="list-style-type: none"> • мобильность; • универсальность

Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными аналогами	Разработанный 3d-принтер является универсальным и легко перепрограммируемым. То есть путем несложных манипуляций возможно перепрограммировать с одного типа изделий на другое. Конструкция в виде дельта компоновки позволяет защитить все механические, электрические и подвижные части от теплового воздействия и разбрызгивания, которое присутствует при наплавке плавящимся электродом в среде защитных газов и может вывести их из строя.
Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта	Предполагаемыми потребителями разработки будут являться машиностроительные промышленные предприятия, а также малый и средний бизнес, в которых применяется изготовление металлических изделий сложной формы.
Бизнес-модель проекта	Была составлена бизнес-модель проекта, в которой рассматривались 9 основных элементов бизнеса.
План продаж	Был разработан план по продвижению продукта на рынок. План включает в себя 3 основных этапа: информирование о продукте, внедрение, реклама устройства, продажа в точках сбыта.
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Хаперская А.В.	к.пед.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
10A72	Турсунов И.Ф.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
10A72	Турсунов Искандар Фарходович

Институт	Юргинский технологический институт	Отделение	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.01 Машиностроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание лаборатории сварки плавлением на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) <p>чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); - опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы); - негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу); - чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера).
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</i> – <i>действие фактора на организм человека;</i> – <i>приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</i> – <i>предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</i> 	<p>Действие выявленных вредных факторов на организм человека. Допустимые нормы (согласно нормативно-технической документации). Разработка коллективных и рекомендации по использованию индивидуальных средств защиты.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); 	<p>Источники и средства защиты от существующих на рабочем месте опасных факторов (электробезопасность, термические опасности и т.д.). Пожар взрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</p>

<ul style="list-style-type: none"> – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); <p>пожар взрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</p>	
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); <p>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</p>	Вредные выбросы в атмосферу.
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; <p>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</p>	Перечень наиболее возможных ЧС на объекте.
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; <p>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</p>	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
Перечень графического материала	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ЮТИ	Солодский С.А.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
10А72	Турсунов И.Ф.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 89 с, 20 рисунка, таблицы 2, 113 источников.

Ключевые слова: 3D-ПРИНТЕР, СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, НАПЛАВЛЕННЫЙ МЕТАЛЛ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ.

Объектом исследования является структура и механические свойства изделий, выращенных электродуговым послойным выращиванием.

Цель работы – Исследование структуры и механических свойств изделий, выращенных электродуговым послойным выращиванием.

В процессе исследования проводились: литературный обзор по исследуемой тематике, проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера, определение методов и методик исследований, исследование структуры металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере, исследование механических свойства металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере, произведен анализ вредных и опасных производственных факторов в лаборатории, расчет себестоимости изготовления.

В результате исследования получены результаты: спроектирован, разработан, изготовлен и апробирован в лабораторных условиях 3d-принтер для электродугового послойного выращивания. Установлена возможность получения, на заданных режимах выращивания (сила тока, напряжение, скорость наплавки) и диаметром наплавляемого материала 1 мм бездефектных корпусных конструкций толщиной 3-8 мм. Определено, что при электродуговом послойном выращивании стенки изделий имеют градиентное строение. Дендритную структуру имеет только последний наплавленный слой. Нижележащие слои подвергаются вторичной термообработке за счет тепловыделения верхнего слоя. В результате этого размер зерна уменьшается с глубиной до 10 мкм. Происходит измельчение размеров зерен от 4 к 1 слою. Средний размер зерен уменьшается в 2,2 в поперечном сечении с 16,4 мкм до 7,3 мкм, в 1,9 раза в продольном сечении

с 18,4 мкм до 9,6 мкм. Результаты механических испытаний показали, что образцы имели в среднем предел прочности при растяжении 708-716 МПа, предел текучести 341-349 МПа и относительное удлинение 5,10-5,18%. Данные значения сопоставимы с механическими свойствами сталей по ГОСТ 6713-91 (предел прочности 685-700 МПа, предел текучести 335-345 МПа) и по ГОСТ 1050-88 (предел прочности 660-680 МПа, предел текучести 350-370 МПа).

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: двигатель *Nema 23* с редуктором 10:1; подшипник: наружный диаметр 30 мм, внутренний диаметр 10 мм, толщина 9 мм; муфта: наружный диаметр 32 мм, внутренний диаметр 10 мм на 14 мм; длина 40 мм; направляющая (шпилька с наружной резьбой М8) длиной 300 мм; шарнирные подшипники с внутренней резьбой М8; держатель под двигатель; комплект электроники.

Степень внедрения: после дополнительных лабораторных испытаний разработанный 3d-принтер будет готов к внедрению на машиностроительные промышленные предприятия.

Область применения: сварочное производство.

Экономическая эффективность значимость работы. Технология электродугового послойного выращивания в частных случаях при производстве единичных изделий сложной формы позволит заменить обработку металлов резаньем; металлургию.

В будущем планируется модернизация конструкции 3d-принтера после дополнительных лабораторных испытаний и внедрение на машиностроительные промышленные предприятия.

Abstract

Graduation qualification consists of 89 s, 20 drawings, table 2, 113 sources.

Keywords: 3D-PRINTER, STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES, OVER FLOATED METAL, DESIGN.

The object of the study is the structure and mechanical properties of products grown by electric arc layering.

The aim of the work is to study the structure and mechanical properties of products grown by electric arc layered cultivation.

During the study, they conducted: a literary review on the subject, design, design and manufacture of the 3d-printer design, the identification of methods and methods of research, the study of the structure of metal products printed on a 3D-printer, the study of the mechanical properties of metal products printed on a 3D-printer, the analysis of harmful and dangerous production factors in the laboratory, the calculation of the cost of manufacture.

As a result of the study, *3d-printer* for electrode-layered layering was obtained: with the design, developed, manufactured and tested in the laboratory, 3mm of non-defective hull structures are established. It has been determined that the walls of the products have a gradient structure in the electro dug layer. The average size of grains decreases by 2.2 per serine from 16.4 microns to 7.3 microns, 1.9 times in longitudinal section from 18.4 microns to 9.6 microns. Mechanical test results showed that the samples had an average strength limit at a sprain of 708-716 mega rock fluidity limit of 341-349 mega rock and a relative extension of 5.10-5.18%.91 (strength limit 685-700 mega rock, fluidity limit 335-345 mega rock and ONGOST 1050-88 (strength limit 660-680 mega rock, fluidity limit 350-370 mega rock).

Key design, technological and technical performance: *Nema 23* engine with 10:1 gearbox; bearing: exterior diameter 30 mm, internal diameter 10 mm, thickness 9 mm; Clutch: 32 mm outer diameter, internal diameter 10 mm by 14 mm; Length 40

mm; Guide (stud with external thread M8) 300 mm long; hinge bearings with the inside thread of the M8; The engine holder; Electronics kit.

Introduction: After additional laboratory tests, the *3d-printer* developed will be ready for introduction to engineering industries.

Application: welding.

Economic efficiency is the importance of work. The technology of electric arc layering in private cases in the production of single products of complex form will allow to replace the processing of metals with cutting metallurgists.

In the future, it is planned to modernize the design of the 3d-printer after additional laboratory tests and introduction to engineering industrial enterprises.

Содержание

Введение	13
1 Литературный обзор по исследуемой тематике	15
2 Проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера	24
2.1 Расчет подшипники	29
2.2 Расчет двигателя	31
3 Методы и методики исследований	33
3.1 Методы и методика проведения исследований	33
3.2 Методика исследования микроструктуры и определения микротвердости	33
3.3 Методика исследования механических свойств	34
4 Исследование структуры металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере	36
5 Исследование механическая структура металлических изделий, напечатанных на 3D-принтере	39
6 Социальная ответственность	40
6.1 Характеристика объекта исследования	40
6.2 Выявление и анализ вредных и опасных производственных факторов в лаборатории	40
6.3 Обеспечение требуемого освещения в лаборатории	41
6.4 Обеспечение оптимальных параметров микроклимата в лаборатории. Вентиляция и кондиционирование	43
6.5 Разработка методов защиты от вредных и опасных факторов	45
6.6 Психофизиологические особенности поведения человека при его участии в производстве работ в лаборатории	47
6.7 Разработка мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций мирного и военного времени	48

6.8	Обеспечение экологической безопасности и охраны окружающей среды	49
7	Концепция стартап-проекта	52
7.1	Объем и емкость рынка	52
7.2	Расчет объема и емкости рынка	53
7.3	Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли	54
7.4	Планируемая стоимость продукта	55
7.5	Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов	57
7.6	Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта	57
7.7	Стратегия продвижения продукта на рынок	58
	Заключение	61
	Список литературы	63
	Диск CD	В конверте на обложке

Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений реализации технологических процессов производства металлических изделий сложной конфигурации является аддитивное производство. В его основе лежит послойная наплавка металла в соответствии с трехмерной моделью, созданной посредством компьютерного проектирования [1]. В качестве исходного материала используют металлические порошки [2–17, 49] или проволоку [11–70] различных составов. Источником тепла является электронный пучок [2, 3, 5–11, 17–19, 29–31, 54], лазерный луч [2–5, 7–19, 23–28, 54] или электрическая дуга [15–17, 32–69]. Кроме того, в работе [62] был использован гибридный источник тепла, совмещавший электрическую дугу и лазерный луч.

Среди перечисленных методов аддитивного производства металлических изделий одним из наиболее хорошо изученных является послойная наплавка проволок. Это обусловлено несколькими причинами [15–17]. Во-первых, на рынке представлена широкая номенклатура выпускаемых качественных и относительно недорогих проволок, которые можно использовать в качестве материала для электродугового выращивания. Данным способом производили изделия из нелегированных тантала [45] и вольфрама [66, 67], титановых [32–45] и алюминиевых [55–62] сплавов, а также сплавов с эффектом памяти формы на основе *Cu-Al* [46] и *Ni-Ti* [69]. Помимо этого, были исследованы нержавеющие [29, 45–54], инструментальные [65] и углеродистые конструкционные [30, 63] стали. Также были сделаны попытки создания композитных материалов путем сплавления одновременно двух проволок: алюминия и титана [64], а также никелевого сплава и нержавеющей стали [68]. Во-вторых, архитектура производственных комплексов для данного процесса является открытой. Это позволяет использовать как промышленные роботы, так и автоматизированные трех-координатные столы совместно с распространенными источниками питания, горелками и вспомогательным оборудованием, предназначенным для

дуговой сварки и наплавки. Например, плазменно-дуговую наплавку использовали в исследованиях [32–40, 49], наплавку неплавящимся электродом в [40–44, 47, 57, 61, 62, 64, 66, 67, 69] и механизированную дуговую наплавку плавящимся электродом в среде защитных газов в [45–56, 58–60, 63, 65, 68], включая технологию «*coldmetaltransfer (CMT)*» [45, 47, 49, 51, 52, 54, 56, 58–60, 63], наплавку короткой дугой [48] и двумя проволоками [50, 55], а также с подачей в зону горения дуги дополнительной проволоки (технология «*coldwire*») [68].

Перечисленные факторы, вместе с относительно высокой производительностью наплавки, обуславливают перспективность данных технологий несмотря на сравнительно низкое качество поверхности производимых изделий и необходимость слоями, деградация структуры металла из-за воздействия многочисленных термических циклов, а также остаточные деформации и напряжения их последующей механической обработки, а также высокую вероятность формирования дефектов в виде пор, наплавлении между соседними валиками и [15–17]. Каждый из упомянутых методов имеет свои достоинства и недостатки, поэтому выбор какого-либо из них в каждом конкретном случае необходимо осуществлять с точки зрения технологических возможностей и экономической целесообразности.

Технология аддитивного производства на основе электродуговой наплавки плавящимся электродом в среде активных газов является одной из наименее затратных с точки зрения первоначальных инвестиций и стоимости расходных материалов, а также обладающих высокой производительностью. Однако данный процесс также имеет недостатки, среди которых наиболее существенными являются большой размер зоны термического влияния (ЗТВ) и значительные остаточные напряжения вследствие перегрева. Они могут привести к снижению механических и эксплуатационных свойств построенных металлических изделий.

1 Литературный обзор по исследуемой тематике

Получение металлических изделий происходит за счет плавления порошка, присадочной проволоки или листового металла (рисунок 1) [70-79].

Способы, использующие в качестве расходного материала металлический порошок, широко применяются в производстве. Данные способы позволяют получать объемные металлические изделия с высокой степенью детализации их элементов, высокой плотностью (до 99%), а также с высокой размерной точностью ($\pm 50\text{мкм}$) [72-76].

Способы получения металлических изделий за счет плавления присадочной проволоки распространены не так хорошо, хотя позволяют использовать более 99% расплавляемой проволоки, производить изделия при значительной экономии материала на последующих стадиях обработки [77,78].

Использование при плавлении проволоки лазерных и электроннолучевых источников электрической энергии имеет низкую энергоэффективность (до 15%) и в некоторых случаях специализированного оборудования, например вакуумной камеры для электроннолучевого процесса.

В свою очередь дуговые методы плавления присадочной проволоки (*GMAW* и *GTAW*) обеспечивают:

- хорошее межатомное взаимодействие слоев и получение кристаллической решетки;
- защиту расплавленного металла и выращиваемых слоев металлического изделия от образования оксидов;
- обладают высокой производительностью.

В настоящее время появилось большое количество публикаций, посвященных созданию и исследованию металлических изделий, полученных посредством дугового плавления присадочной проволоки, что доказывает актуальность и перспективность данного направления.

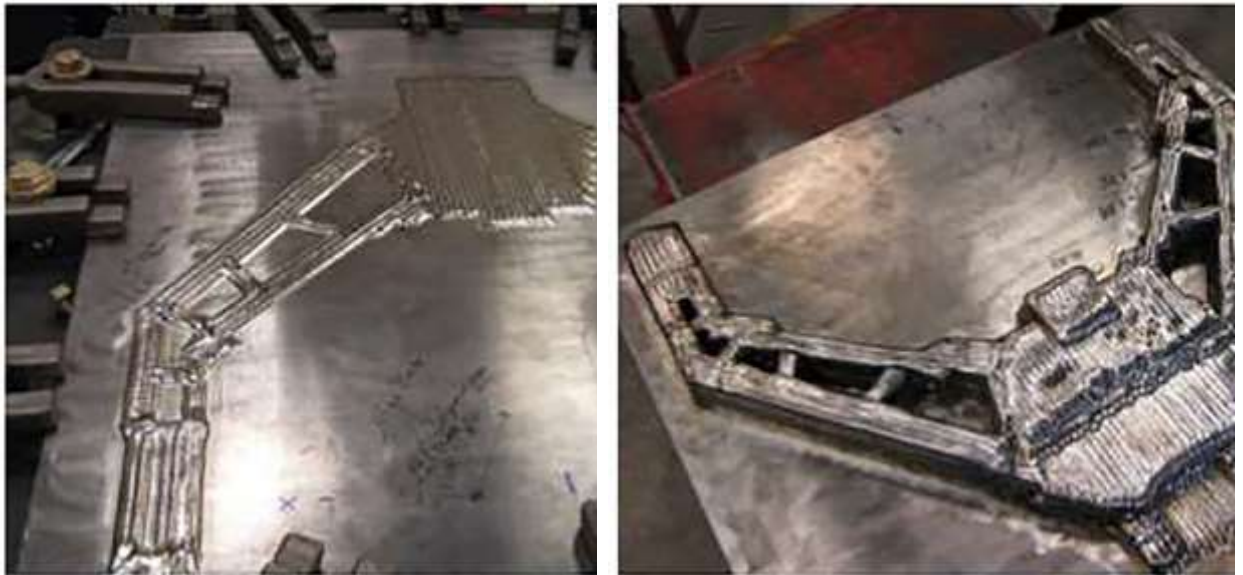


Рисунок 1 – Аддитивное производство металлических изделий

Авторами *Dickens P.M.* и др. в 1992 были изготовлены объемные изделия прямоугольной и трапецидальной формы (рисунок 2). Высота стенки составляла порядка 100 мм и была выполнена за 70 проходов. Проведенный микроструктурный анализ вырезанных вдоль и поперек образцов, показал наличие равномерной, разностной ферритно-перлитной структурой [80].



Рисунок 2 – Аддитивное производство металлических изделий

Авторами *Dickens P.M.* и др. в 1992 были изготовлены объемные изделия прямоугольной и трапецидальной формы (рисунок 3). Высота стенки составляла порядка 100 мм и была выполнена за 70 проходов. Проведенный микроструктурный анализ вырезанных вдоль и поперек образцов, показал наличие равномерной, равноосной ферритно-перлитной структурой [80].

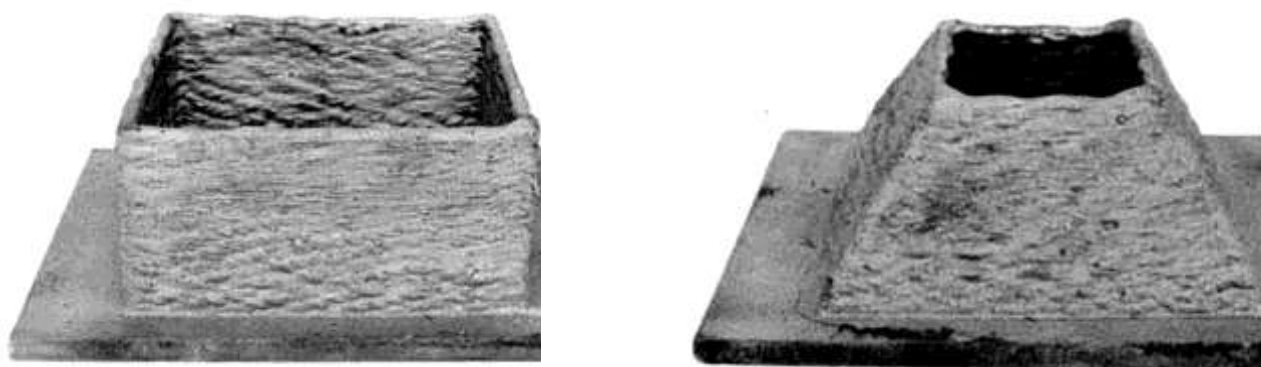


Рисунок 3 – Примеры первых изделий, полученных наплавкой:

а) коробчатая форма; б) трапецидальная форма

Этими же авторами были проведены исследования по снижению тепло вложения в наплавляемый слой за счет изменения параметров режима наплавки [81].

В работе авторов *A.F. Ribero, J. Norrish* [82] для исследования влияния различной кривизны поверхности на процесс изменения геометрии слоя, были изготовлены изделия (рисунок 4):

- «*Chimney*»: построения изделия коробчатой формы с прерыванием слоя (рисунок 4а). Высота полученного изделия составила 250 мм, ширина стенки порядка $5,6 \pm 0,3$ мм;

- «*BowTie*»: построение изделия радиальной формы с изменением радиуса (рисунок 4б). Высота полученного изделия составила 200 мм, ширина стенки порядка $5,0 \pm 0,2$ мм;

- «*Pint*»: построение изделия радиальной формы непрерывно по спирали. Высота полученного изделия составила 180 мм, ширина стенки порядка $5,6 \pm 0,2$ мм

Процесс создания изделий состоял из нескольких этапов:

- создание трехмерной модели изделия;
- разбивка имеющейся модели на слои;
- определение параметров режима наплавки в зависимости от используемого материала;
- процесс изготовления изделия.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность создания металлических изделий с различной формой кривизны поверхности.



Рисунок 4 – Формы поверхности:
а) «*Chimney*»; б) «*BowTie*»; в) «*Pint*»

Значительная часть исследований посвящена проблеме оптимизации геометрических размеров наплавляемого слоя.

В работе [83] для управления высотой и шириной наплавляемого слоя предложено изменять наклон сварочной горелки.

В работе [84] и [85] на основе использования пассивного видео сенсора, приводилась оценка влияния тока дуги, скорости наплавки и вводимого тепла на

геометрические размеры слоя. В результате установлено, что наибольшее влияние оказывает параметр «ток дуги». Увеличение этой характеристики сопровождается уменьшением ширины валика. Изменение величины тока дуги в меньшую сторону, наоборот, увеличивает ширину наплавляемого валика.

В работах [86,87] осуществлялось изменение параметров процесса в зависимости от высоты и ширины получаемого валика. Для этого был разработан алгоритм, который, получая откалиброванное изображение высоты и ширины валика, определяет необходимые параметры режима наплавки. Захват изображения осуществлялся по средствам системы видеонаблюдения, состоящей из двух видеокамер и системы фильтрации.

При изготовлении более тонкостенных изделий с высокой скоростью производства и эффективностью наплавки была предложена идея по использованию двух горелок (рисунок 5), формирующих один и тот же слой.

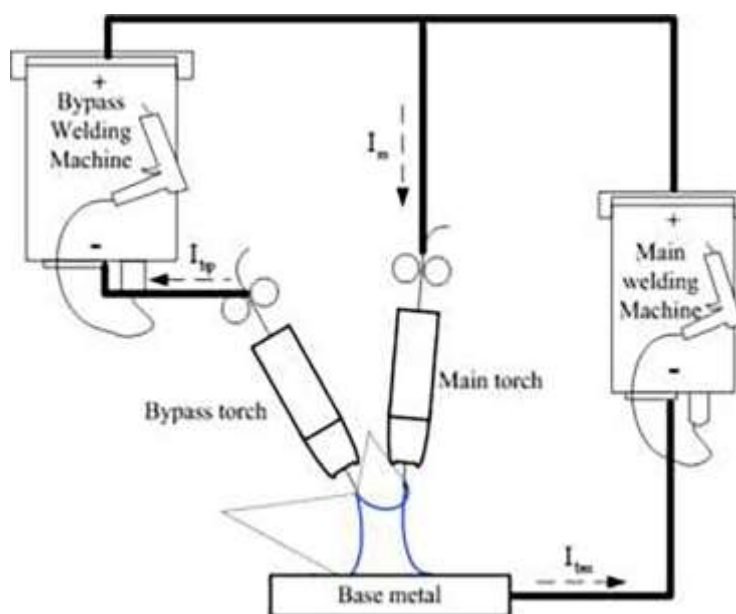


Рисунок 5 – Схема двухдуговой сварки

При этом способе с увеличением тока дуги ширина наплавляемого валика уменьшилась, а высота увеличилась. Разность высот между точкой зажигания дуги и точкой гашения дуги в наплавляемом слое была уменьшена до 3% [88].

Немаловажной характеристикой при создании металлических изделий является улучшение свойств наплавляемого слоя и повышение прочностных характеристик.

Немаловажной характеристикой при создании металлических изделий является улучшение свойств наплавляемого слоя и повышение прочностных характеристик.

В работе [89] предлагается для увеличения прочностных характеристик изделий из сплава 2219 (алюминий и медь 2000) производить охлаждение между слоями в процессе изготовления изделий и применять операцию термообработки. В результате было установлено, что последующая термообработка позволяет повысить прочностные характеристики до величины свыше 450 МПа. Для подтверждения полученных значений был проведен дополнительный анализ микроструктуры наплавленных слоев. Полученные в ходе исследования результаты подтвердили закономерность полученных значений прочностных характеристик.

В работе [90] предлагается использовать сверхзвуковую вибрацию для измельчения зерна во время кристаллизации. Горелка для наплавки в среде защитных газов смонтирована на 3D принтере, который использовался, чтобы наплавить слой мягкой стали *ER70S-6*. Наплавка осуществлялась на пластине. Для обеспечения изменений частоты и амплитуды был использован сверхзвуковой преобразователь контактного типа с системой управления. Эффективность предлагаемой технологии была оценена на основе применения оптической металлографии и оценки микро твердости в наплавляемом слое и зоне термического влияния. В результате было установлено, что частота и отношение между частотой и амплитудой приводят к уменьшению среднего размера зерна до 10,64% и увеличению числа мелких частиц на 41,78%. Показатели микротвердости были увеличены на 14,30%.

Для устранения вредных анизотропных микроструктур предлагается использование добавки бора (0,13%) при получении изделий из сплава *Ti-6Al-4V*.

Эта добавка позволяет увеличить на 40% пластичность изделия без потери в силе при одноосном сжатии [91].

В работе [92] производилась оценка влияния тока импульса/паузы и частоты импульсов при наплавке неплавящимся электродом сплава Ti6Al4V на измельчение бета зерна предшествующего слоя. Как было установлено, изменение величины тока импульса/паузы и частота импульсов приводит к отрицательным градиентам температуры в передней части ванны и блокированию зарождения столбчатых зерен, а это, соответственно, способствует созданию равномерной и равноосной структуры.

Ряд исследований было проведено для процесса наплавки холодной дугой (*CMT*). Основной проблемой использования данного процесса для послойного выращивания металлических изделий является повышенное образование пор. В работе [93] для решения указанной проблемы предлагается увеличить скорость истечения защитного газа аргона до значений в 25 л/мин. Сокращение пористости происходит за счет более интенсивного охлаждения металла.

Авторами работы [94] для устранения пористости предложено использовать процесс *CMT-PADV*. Как было установлено, использование предлагаемого процесса обеспечивает снижение пористости и получение равноосной структура [94].

В отдельное направление можно выделить работы, направленные на проблему послойного получения металлических изделий из разнородных материалов.

В работе [95] показана принципиальная возможность получения скомбинированного изделия, состоящего из нержавеющей стали и никелевого сплава. Полученные значения механических свойств вблизи границы раздела (твердость и прочность соединения) показали удовлетворительные значения.

В работе [96] было изготовлено изделие из кремниевой мягкой стали с биметаллической бронзой на основе многослойной однопроходной дуговой наплавки. У границы между сталью и бронзой была высокая адгезия без трещин или пор и было получено металлургическое соединение. Предел прочности

полученного соединения составил 305 МПа. При этом разрушение произошло около середины бронзовой стороны, доказывая о наличии металлургического соединения.

Другим направлением развития аддитивных технологий является разработка САМ-систем для управления процессом формирования наплавляемого валика.

В работе [97] разработан алгоритм трансформации координат, обеспечивающий геометрическую точность движения горелки. Алгоритм трансформации координат используется с моделью перекрытия многопроходного формирования.

В работе [98] осуществлена разработка автоматизированной системы, использующей роботизированную наплавку, включающую следующие модули:

- моделирование валика;
- нарезка на слои;
- планирование маршрута наплавки;
- параметры наплавки;
- механическая обработка (по необходимости).

Среди этих модулей моделирование валика обеспечивает необходимую базу данных для управления технологическим процессом, а также инновационная система планирования маршрута отвечает требованиям автоматизации.

В работе [99] проведена разработка трехмерной модели термопластичности, основанной на термической модели. В результате установлено, что наплавляемый слой оказывает малое влияние на усиление напряжений в предыдущих слоях.

В работе [100] и [101] представлены модели для единичного наплавляемого валика с помощью различных видов аппроксимирующей кривой. В дальнейшем рассмотрен принцип моделирования геометрии нескольких валиков, перекрывающих друг друга для обеспечения геометрической точности и минимального количества проходов горелки. Использование предложенных

моделей позволяет определить необходимые параметры наплавки (скорость перемещения горелки, скорость подачи проволоки и толщина слоя).

В работе [102, 103] предложено использовать нейронную сеть при прогнозировании высоты и ширины наплавленного валика от параметров наплавки.

2 Проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера

При проектировании конструкции 3d-принтера одним из основных условий было то, что бы все механические, электрические и подвижные части были не в зоне выращивания, т.к. разбрызгивание, которое присутствует при наплавке плавящимся электродом в среде защитных газов, может вывести их из строя.

Следующим условием при проектировании было то, что бы сварочная горелка перемещалась по всем трем осям X , Y , Z , а стол, на котором происходило выращивание был неподвижным. При подвижном столе нагрузки, на механизмы перемещающие стол, возрастают с каждым наплавленным слоем, т.к. увеличивается вес.

Третьим условием было то, чтобы материал корпуса 3d-принтера, который находится вблизи с зоной выращивания, выдерживал высокие температуры. Т.к. при процессе электродугового послойного выращивания будет выделяться теплота и возможен нагрев конструкции 3D-принтера и, если материал корпуса не выдержит температуру, это может привести к деформации основных узлов.

Поэтому была выбрана дельта компоновка, т.к она позволяет вынести механические, электрические и подвижные части из зоны выращивания.

Проектирование конструкции 3d-принтера осуществлялось при помощи программы Компас 3D.

В качестве материала для изготовления корпуса 3d-принтера была выбрана труба 20 на 20 мм с толщиной стенки 1 мм из стали 20.

Проектирование корпуса 3d-принтера состояло в следующем: детали (6 шт.) из трубы 20 на 20 мм длиной 560 мм размещали горизонтально в треугольник по углом 60° , тем самым получили верхнюю и нижнюю части корпуса. Затем на нижнюю часть корпуса в каждом углу вертикально (под углом

90°) размещаем три детали из трубы 20 на 20 мм длиной 1000 мм. Далее соединяем полученную сборочную единицу с верхней частью корпуса (рисунок б).

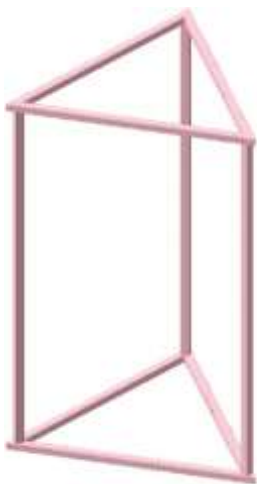


Рисунок 6 – Корпус 3d-принтера

Затем на сборочную единицу для жесткости (рисунок 7) на расстоянии 190 мм от верхней части устанавливаем три перекладины из трубы 20 на 20 мм длиной 520 мм.



Рисунок 7 – Ребра жесткости

Между верхней частью корпуса 3d-принтера и перекладинами с трех сторон устанавливаем пластину 230x120x5 мм (рисунок 8). Закрепляем болтовыми соединениями. Размер пластины выбирался из расчета размера двигателя, муфты, опор для подшипников, вала.

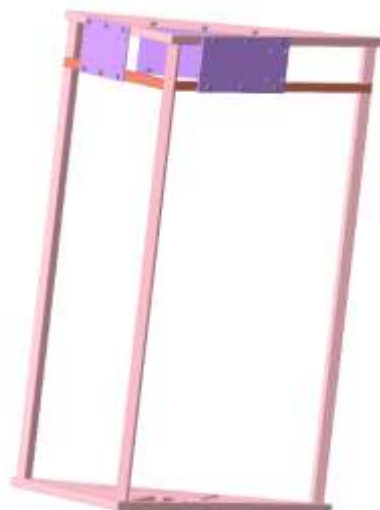


Рисунок 8 – Пластина

На каждой пластине размещаем двигатель и опоры подшипников 70/80 10 мм. На вал двигателя устанавливаем муфту, в опоры подшипников устанавливаем подшипники. Между подшипниками устанавливаем шестигранник на 17 длиной 74 мм, оба конца шестигранника имеют форму вала. На шестиграннике размещаем рычаг длиной 200x20x20 мм (рисунок 9).

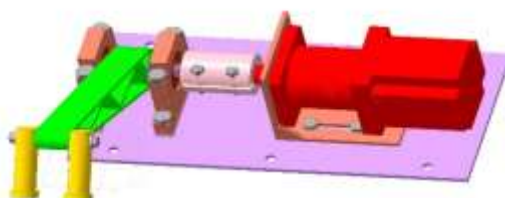


Рисунок 9 – Расположение элементов

В нижнюю часть рычага устанавливаем шестигранник на 10 длиной 46 мм, оба конца шестигранника имеют форму вала с внутренней резьбой M4. С обеих сторон шестигранника на вал устанавливаем шарнирный подшипник с внутренней резьбой M8, закрепляем болтовым соединением. В подшипник вкручиваем металлическую направляющую длиной 300 мм, диаметром 8 мм. С нижней части на направляющую устанавливаем шарнирный подшипник с внутренней резьбой M8 (рисунок 10).



Рисунок 10 – Направляющие

Между направляющими устанавливаем державку для сварочной горелки толщиной 10 мм и закрепляем болтовым соединением (рисунок 11).



Рисунок 11 – Державка для сварочной горелки

Детали для сборки корпуса 3d-принтера изготавливали при помощи абразивной резки (труба 20 на 20 мм с толщиной стенки 1 мм из стали 20). Корпус 3d-принтера собирали при помощи сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа. Пластины, опоры подшипников и державку для сварочной горелки изготавливали из стали 20 толщиной 10 мм при помощи автоматической плазменной резки и механической обработки (фрезерование и сверление). При изготовлении шестигранников использовали токарную обработку и нарезали резьбу. Рычаги изготавливали из пластика на 3d-принтере. На (рисунке 12) представлена конструкция 3d-принтера дельта компоновки.



Рисунок 12 – 3d-принтер

Следующие детали, входящие в состав 3d-принтера, были покупные:

- двигатель *Nema 23* с редуктором 10:1 (3 шт.);
- подшипник: наружный диаметр 30 мм, внутренний диаметр 10 мм, толщина 9 мм (6 шт.);
- муфта: наружный диаметр 32 мм, внутренний диаметр 10 мм на 14 мм; длина 40 мм (3 шт.);
- направляющая (шпилька с наружной резьбой *M8*) длиной 300 мм (6 шт.);
- шарнирные подшипники с внутренней резьбой *M8* (12 шт.);

- комплект электроники.

Таким образом спроектирован, разработан и изготовлен 3d-принтер дельта компоновки для электродугового послойного выращивания плавящимся электродом в среде защитных газов. В качестве сварочного оборудования будет применяться инверторный источник питания и сварочная горелка.

2.1 Расчет подшипника

Данный расчет определяет номинальный ресурс и динамическую радиальную грузоподъемность шариковых радиальных и радиально-упорных подшипников, соответствующий 90% вероятности безотказной работы, при применении широко используемых материалов, в нормальных условиях эксплуатации

Расчет выполнен по ГОСТ 18854-2013 и ГОСТ 18855-2013. За рамками данных нормативных документов добавлена возможность учета влияния температуры и условий работы на ресурс подшипника. Влияние износа и коррозии на ресурс подшипника не рассматривается.

Расчет можно вести двумя способами – по геометрическим характеристикам подшипника, либо по статической и динамической радиальной грузоподъемности.

$$C_r = b_m f_c (i \cos \alpha)^{0.7} z^{2/3} D_w^{1.8} ; \quad (1)$$

где $i=1$ – число рядов тел качения;

$$b_m = 1,3$$

$$f_c = 56,0$$

b_m и f_c – коэффициенты по ГОСТ 18855-2013

$$C_r = 1,3 \cdot 56 (\cos 0)^{0,7} 6^{2/3} 6^{1,8} = 6047,43$$

Динамическая эквивалентная радиальная нагрузка

$$P_r = XF_r + YF_a; \quad (2)$$

Значения коэффициентов X и Y приведены в таблице 3 ГОСТ 18855-2013
 $X=1$; $Y=0$.

$$\begin{aligned} P_r &= XF_r + YF_a; \\ P_r &= 1 \cdot 60 + 0 \cdot 0 = 60 \end{aligned}$$

где F_r – радиальная нагрузка на подшипник, H ;

F_a – осевая нагрузка на подшипник, H .

Номинальный ресурс подшипника:

$$L_{10} = (C_r / P_r)^3; \quad (3)$$

где C_r – динамическая радиальная грузоподъемность подшипника (постоянная радиальная нагрузка, которую подшипник может выдержать в пределах номинального ресурса в 1000 000 оборотов);

P_r – Динамическая эквивалентная радиальная нагрузка, H .

$$L_{10} = (6047,43 / 60)^3 = 1,023 \cdot 10^6 \text{ оборотов}$$

C_{0r} – статическая радиальная грузоподъемность подшипника.

$$C_{0r} = f_0 i z D_w^2 \cos \alpha; \quad (4)$$

$$C_{0r} = 12,3 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 6^2 \cos 0^\circ = 2656,8$$

где f -коэффициент, равный для радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников 12,3;

i – число рядов тел качения;

z – число шариков в одном ряду подшипника;

D_w – номинальный диаметр шарика, в миллиметрах;

α – угол между плоскостью, перпендикулярной оси подшипника и линией действия результирующей сил, передаваемых кольцом подшипника на шарик, в градусах.

Вывод: рассчитали расчет подшипника и выбрали по ГОСТу 18854-2013 подшипник шариковый радиально упорный 180200С17.

2.2 Расчет двигателя

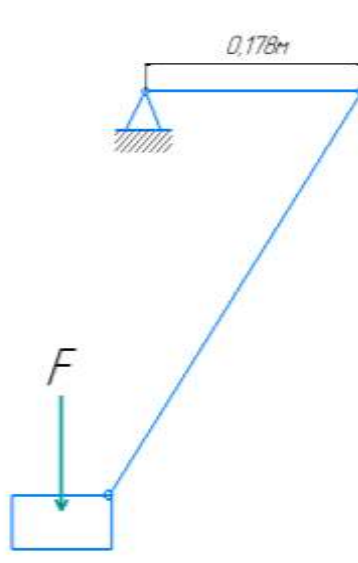


Рисунок 13 – Схема

$$M = F \cdot h = 60 \cdot 0,178 = 10,68 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5)$$

где M -требуемый крутящий момент двигателя;

F - сила тяжести, H ;

h - длина рычага.

Силу тяжести находим по формуле:

$$F = g \cdot m, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

m – масса, кг.

$$F = 9,8 \cdot 6,1 = 60 \text{ Н}$$

Исходя из этих расчётов выбираем шаговый двигатель *Nema 23 57HS56-2804*. Технические характеристика двигателя *Nema 23 57HS41-2804* представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристика двигателя *Nema 23 57HS41-2804*

Модель	57HS41-2804
Угловой шаг	1.8 (1 оборот - 200 шагов)
Число фаз	2
Диапазон рабочих температур	-20°C / +85°C
Напряжение питания	1.96 В
Номинальный ток	2.8 А
Сопротивление фазы	0.7±10% Ом
Индуктивность	1.4±20% мГн
Крутящий момент	11 Нм
Диаметр вала	6.35 мм
Длина вала	21±1 мм
Габариты корпуса	57 × 57 × 41 мм

3 Методы и методики исследований

3.1 Методы и методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований будет произведено электродуговое послойное выращивание плавящимся электродом с использованием разработанного 3D-принтера. В качестве электрода использовалась сварочная проволока марки Св-08Г2С диаметром 1 мм. Послойное выращивание осуществлялось на подложке из стали Ст6сп.

Формирование изделий происходило на следующих режимах: сила тока 70-80А, напряжение 18-20В, скорость наплавки 200 мм/мин.

3.2 Методика исследования микроструктуры и определения микротвердости

На каждом образце для исследования микроструктуры будут изготовлены поперечные шлифы.

Изделие на (рисунке 14) в было сформировано путем наплавки четырех последовательных слоев. Из него был приготовлен темплет толщиной 2,5 мм, схема которого показана на (рисунке 14а). Так как основной целью настоящей работы являлись структурные исследования металла наплавленной конструкции, из темплета были вырезаны образцы для металлографии.

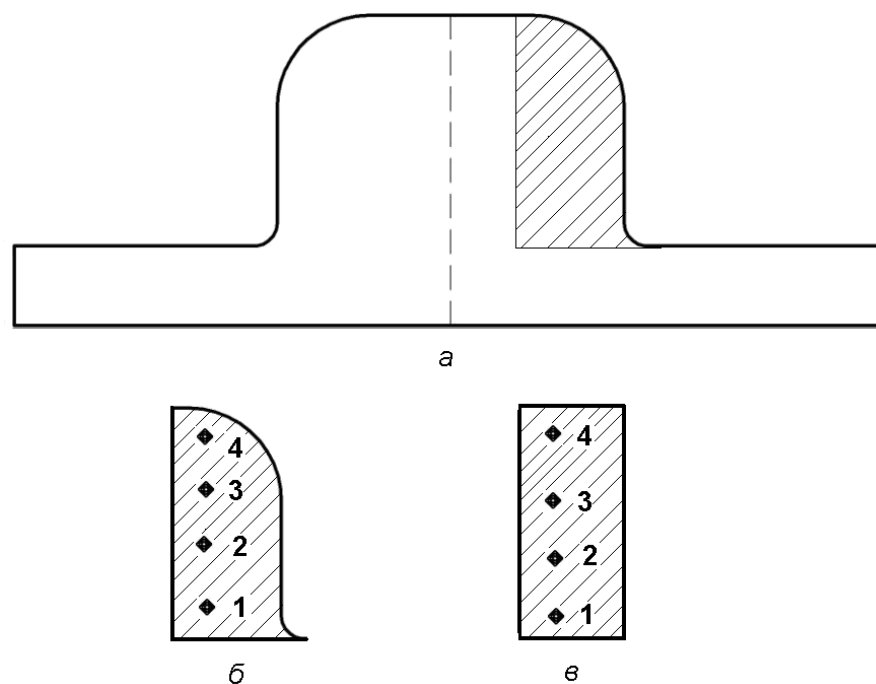


Рисунок 14 – Схема подготовки образцов для исследования структуры

На образцах были выполнены шлифы в направлении движения дуги X (рисунок 14б) и в перпендикулярном направлении Y (рисунок 14в). При изготовлении шлифов использовались механическая шлифовка, механическая полировка на алмазной пасте *АСМ 10/7 НВЛ* и химическое травление в 4% спиртовом растворе азотной кислоты. Исследование структуры проводилось методом оптической металлографии на микроскопе *Neophot-21* с записью изображений при помощи цифровой камеры *Genius VileaCam*.

Исследование микротвердости будет проводиться на микротвердомере в соответствии с ГОСТ 9450-76 «Микротвёрдость (вдавливание алмазных наконечников)». Нагрузка на индентор составит $1\ H$ (100 г). Число замеров на одну точку согласно пункту 5.11 указанного ГОСТа 9450-76 – три.

3.3 Методика исследования механических свойств

Механические свойства будут исследоваться по общепринятым методикам, представленным в ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы

определения механических свойств». Из данного ГОСТа будут выбраны следующие механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение).

Из построенных образцов будут вырезаны заготовки для механических испытаний перпендикулярно наплавленным слоям (схема представлена на (рисунке 15) с помощью электроискровой резки на станке *Делта-Тест* Арта 151, которые затем подвергали механической шлифовке и последующей полировке с использованием алмазной пасты *АСМ 10/7 НВЛ*. Исследование механических свойств (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) производились методом растяжения образцов на испытательной машине *Walter+Bai AG LFM-125*.

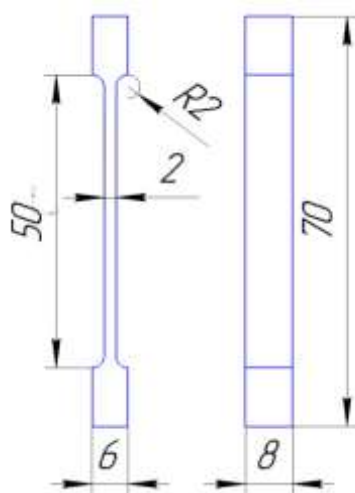


Рисунок 15 – Размеры образцов для испытаний на растяжение

4 Исследование структуры металлических изделий напечатанных на 3D-принтере

Анализ результатов металлографии показал, что каждый из наплавленных слоев (обозначения 1 – 4 на рисунок 16б и 16в) имеет структуру с различными размером и морфологией зерна.

Слой 4, наплавленный последним и непосредственно примыкающий к свободной поверхности, имеет структуру литого металла, состоящую из раз ориентированных сильно ветвящихся дендритов (рисунок 16). Влияние направления наплавки не сказывается. Толщина этого слоя не превышает 4 мм.

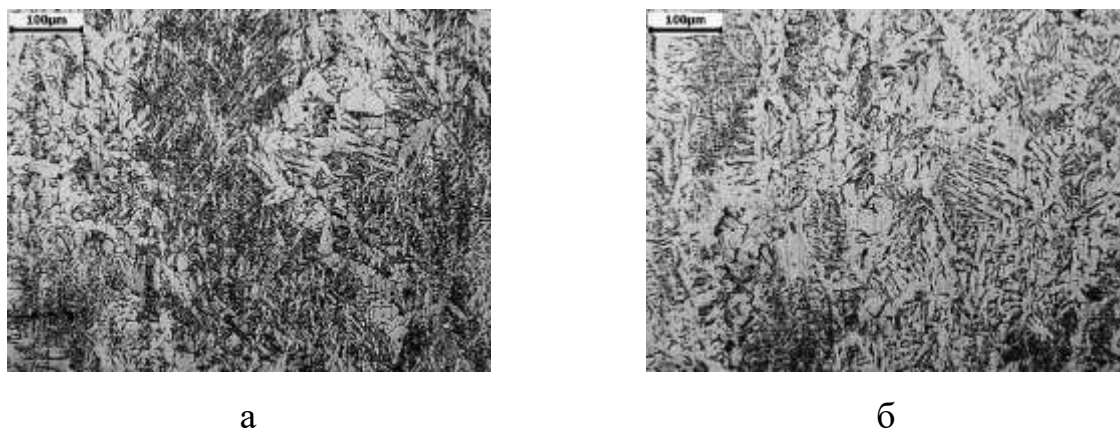
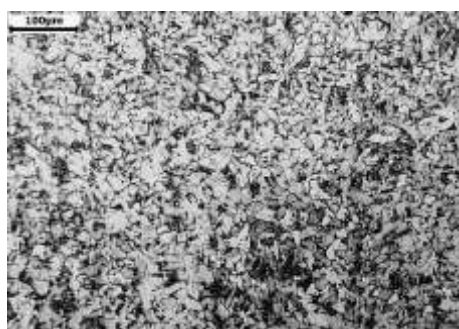


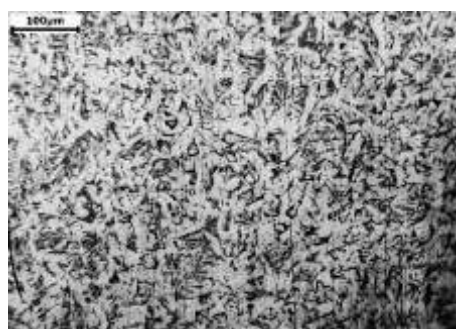
Рисунок 16 – Структура последнего наплавленного слоя:
а – поперечное направление, б – продольное направление

На (рисунке 17) можно видеть, что все ранее наплавленные слои 3, 2, 1 имеют полиэдрическую пере кристаллизованную мелкозернистую феррита-перлитную структуру. В слое 3 (рисунок 17а, б) толщиной ≈ 3 мм размер ферритного зерна соответствует номеру 9 и составляет $18,4 \pm 6,2$ мкм в продольном шлифе и $16,4 \pm 8,7$ мкм в поперечном. Видно, что это различие незначимо. Содержание перлита соответствует химическому составу сварочной проволоки Св08Г2С. В нижележащем слое 2 (рисунок 17в, г), где перекристаллизация произошла дважды, размер ферритного зерна соответствует

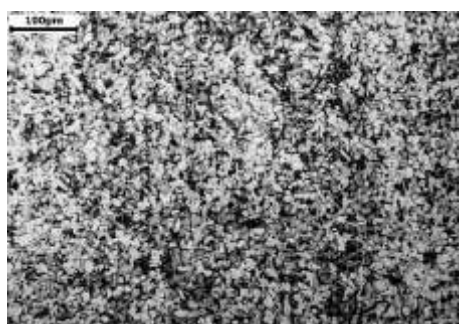
номеру 10 и фактически одинаков и в продольном, и в поперечном шлифах ($13,4 \pm 6,9$ мкм и $12,7 \pm 6,6$ мкм, соответственно). По фазовому составу структура тоже соответствует стали Св08Г2С. Еще мельче зерно в слое 1 (рисунок 17д, е), где, по-видимому, произошло частичное перемешивание с подложкой ($9,6 \pm 3,6$ мкм в продольном шлифе, $7,3 \pm 3,7$ мкм в поперечном, номер 11). Здесь содержание перлита выше, чем в стали Св08Г2С, но меньше, чем должно быть в стали Ст6сп.



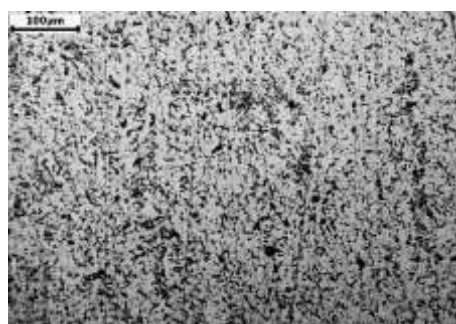
а



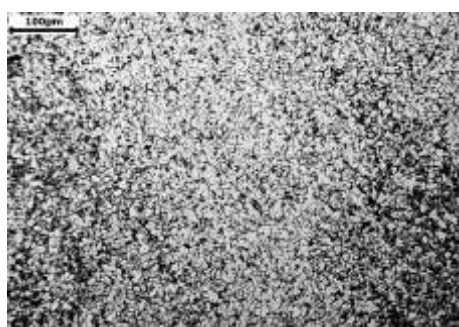
б



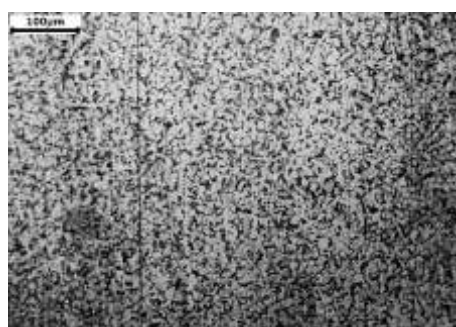
в



г



д



е

Рисунок 17 – Структура наплавленного металла в слоях, подвергавшихся перекристаллизации:

а, в, д – в поперечный шлиф, б, г, е – в продольный шлиф

Таким образом, наплавленный металл имеет градиентное строение с экспоненциально возрастающим размером зерна по мере удаления от подложки (см рисунок 18). При этом естественным образом происходит уменьшение микротвердости от слоя к слою (рисунок 19).

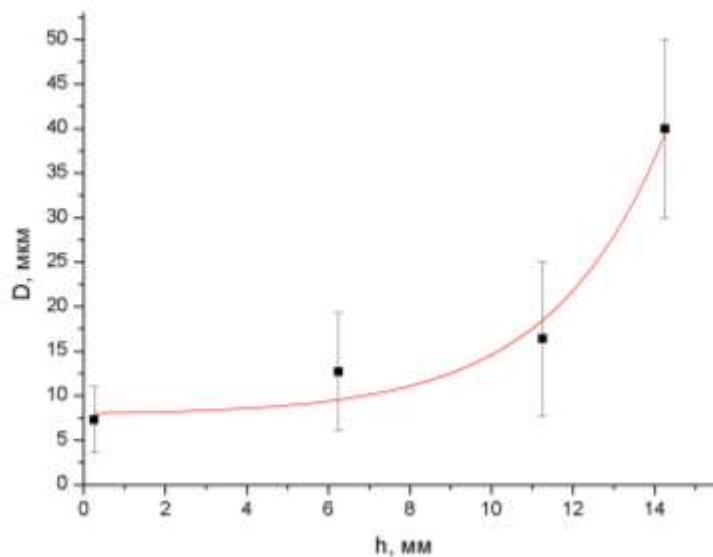


Рисунок 18 – Послойное изменение размера зерна в наплавке; точки на графике соответствуют слоям 1, 2, 3 и 4

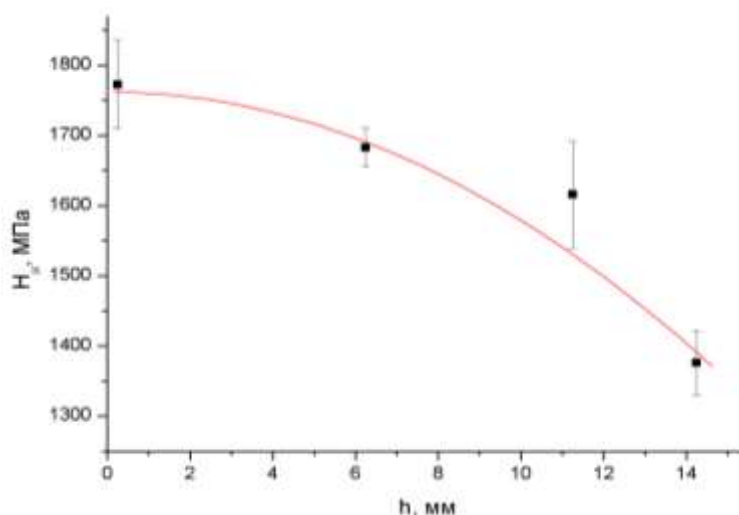


Рисунок 19 – Послойное изменение микротвердости в наплавке; точки на графике соответствуют слоям 1, 2, 3 и 4

5 Исследование механических свойств металлических изделий напечатанных на 3D-принтере

Анализ результатов механических испытаний показал, что образцы имели в среднем предел прочности при растяжении 708-716 МПа, предел текучести 341-349 МПа и относительное удлинение 5,10-5,18%. Данные значения сопоставимы с механическими свойствами сталей по ГОСТ 6713-91 (предел прочности 685-700 МПа, предел текучести 335-345 МПа) и по ГОСТ 1050-88 (предел прочности 660-680 МПа, предел текучести 350-370 МПа). В качестве примера на рисунке 20 представлена диаграмма напряжений от деформаций.

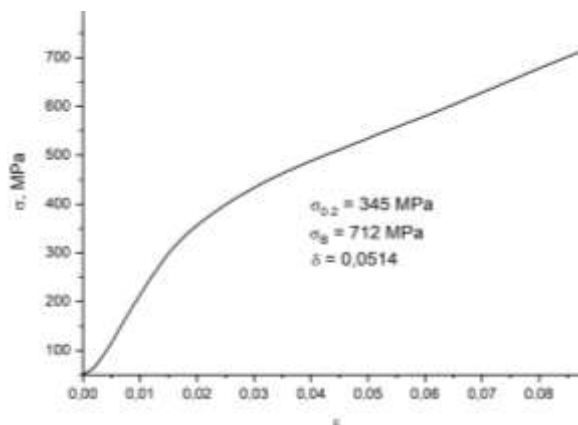


Рисунок 20 – Диаграмма напряжений от деформаций

6. Социальная ответственность

6.1 Характеристика объекта исследования

Объектом исследования служит лаборатория сварки плавлением ЮТИ ТПУ г. Юрги. Характеристики лаборатории: длина – 8,5 м, ширина – 5,5 м, высота – 2,7 м. Материал стен – кирпич, отделанный гипсокартонном, оклеенные стеклобоями, материал пола – бетон, потолок – металл и амстронг. Количество оконных проемов – 3 и дверных – 1. Лаборатория занимает площадь, равную 46,75 м².

При проведении лабораторных исследований применялись: источник питания с подающим механизмом *Fubag IRMIG 200 SYN*, сварочная горелка, сварочная проволока Св-08Г2С, диаметром 1 мм, сварочная проволока *ER-308LSi* диаметром 0,8 мм, защитный газ – углекислый газ, аргон

6.2 Выявление и анализ вредных и опасных производственных факторов в лаборатории

К вредным производственным факторам сварочного производства относятся: повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения сварочной дуги, а также инфракрасное излучение сварочной ванны и свариваемых изделий; электромагнитные поля; ионизирующие излучения; шум и ультразвук; статическая нагрузка на руку сварщика и др.

К опасным производственным факторам в сварочном производстве относятся воздействие электрического тока, искры и брызги расплавленного металла и шлака, возможность взрыва баллонов и систем, находящихся под повышенным давлением сжатых газов, движущиеся механизмы и изделия.

Применение открытого газового пламени, открытых дуг и струй плазмы, наличие искр, брызг и выбросов расплавленного металла не только создают возможность ожогов, но и повышают опасность возникновения пожара.

В данной лаборатории имеются следующие вредные и травмоопасные факторы: малая освещенность; ультрафиолетовое излучение; тепловое (инфракрасное) излучение; электрический ток; повышенное содержание газов, паров и пыли; шум; разбрызгивание расплавленного металла.

6.3 Обеспечение требуемого освещения в лаборатории

Основные требования и значения нормируемой освещенности рабочих поверхностей изложены в СНиП 23-05-95 [104].

Неблагоприятные условия освещения ведут к снижению работоспособности, увеличению числа ошибок в производственных процессах, аварий и несчастных случаев и могут обуславливать «профессиональную близорукость», спазмы и, наоборот, правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное психофизиологическое воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность. Исследования показывают, что при хорошем освещении производительность труда повышается примерно на 15 %.

При освещении помещений используют естественное освещение (создаваемое прямыми солнечными лучами и рассеянным светом небосвода), искусственное освещение (создаваемое электрическими источниками света) и совмещенное освещение (при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняют искусственным).

Проектируют искусственное освещение двух систем: общее (равномерное и локализованное) и комбинированное (к общему добавляют

местное). Применение на рабочих местах одного местного освещения не допускается.

К числу источников света, выпускаемых нашей промышленностью, относятся лампы накаливания, люминесцентные лампы и лампы ртутные.

Основными показателями, определяющими выбор светильника при проектировании осветительной установки, следует считать: конструктивное исполнение светильника с учетом условий среды, светораспределение светильника и его экономичность.

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняют методом коэффициента использования светового потока [105].

Величина светового потока лампы определяется по формуле:

$$\hat{O} = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot Z}{n \cdot \eta}, \quad (6)$$

где Φ – световой поток каждой из ламп, лм;

E – минимальная освещенность, лк;

k – коэффициент запаса;

S – площадь помещения, м²;

Z – коэффициент неравномерности освещения;

n – число ламп в помещении, шт.;

η – коэффициент использования светового потока, %.

Отсюда

$$n = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot Z}{n \cdot \hat{O}} \quad (7)$$

Для светильников *Osram L 18W/765* (люминесцентные) световой поток $\Phi=1050$ лм. При работе или производственном обучении подростков,

минимальная освещенность $E=300$ лк. Для помещений с малым выделением пыли $k=1,5$. Площадь лаборатории составляет $46,75\text{м}^2$. Для светильников с люминесцентными лампами $Z=0,9$. Коэффициент использования светового потока $\eta=47\%$.

$$n = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 46,75 \cdot 0,9}{0,47 \cdot 1050} = 38,3.$$

Принимаем количество светильников, равным $n=38$ шт.

Согласно проведенным расчетам, система освещения лаборатории сварки плавлением должна состоять из 38 светильников *Osram L 18W/765* с люминесцентными лампами, что соответствует количеству светильников в лаборатории [105 - 106].

6.4 Обеспечение оптимальных параметров микроклимата в лаборатории. Вентиляция и кондиционирование

Благоприятные (комфортные) метеорологические условия на производстве являются важным фактором в обеспечении высокой производительности труда и в профилактике заболеваний.

Параметры микроклимата определены в санитарных нормах и правилах СанПиН 2.2.4.548096. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [107].

Параметры микроклимата: температура воздуха; влажность воздуха; скорость движения воздуха в помещениях; барометрическое давление; тепловое (инфракрасное) излучение от нагретых поверхностей.

Все рассмотренные выше параметры микроклимата должны соответствовать действующим санитарно-гигиеническим нормам.

Оптимальные нормы микроклимата, следующие:

В холодный и переходный период года:

- температура $17\div 20$ °С;
- относительная влажность – $60\div 40$ %;
- скорость движения воздуха – $0,3$ м/с.

В теплое время года:

- температура $20\div 22$ °С;
- относительная влажность – $60\div 40$ %;
- скорость движения воздуха – $0,4$ м/с.

На данный момент в лаборатории фактические параметры микроклимата соответствуют параметрам микроклимата в теплое время года.

Одним из основных мероприятий по оптимизации параметров микроклимата и состава воздуха в производственных помещениях является обеспечение надлежащего воздухообмена.

Вентиляция – это система воздухообмена для удаления производственных вредностей и создания в рабочей зоне воздушной среды, отвечающей санитарным нормам. Она используется для борьбы с избыточным теплом, влагой, вредными газами, парами и пылью.

Вентиляция по способу перемещения воздуха подразделяется на естественную и механическую. Возможно их сочетание – смешанная вентиляция.

По назначению различают вентиляцию вытяжную, приточную и приточно-вытяжную, а по способу организации воздухообмена в помещении – местную и общеобменную.

Кондиционирование – наиболее совершенный вид промышленной вентиляции; он предназначен для создания наиболее оптимальных метеорологических условий в производственных помещениях. Кондиционирование воздуха – это его автоматическая обработка с целью поддержания в производственных заранее заданных параметров микроклимата независимо от их изменения с наружи и технологических режимов внутри помещения. Кондиционеры могут быть местными (для обслуживания отдельных

помещений) и центральные (для обслуживания нескольких отдельных помещений).

6.5 Разработка методов защиты от вредных и опасных факторов

Нормативными документами по защите от поражения электротоком при проведении электросварочных работ являются «Правила устройства электроустановок», «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», «Инструкция по выполнению сетей заземления электроустановок». Все помещения делятся по степени опасности поражения людей электрическим током на три класса:

I - без повышенной опасности;

II - с повышенной опасностью;

III - особо опасные.

ГОСТ 12.3.003-75 «Работы электросварочные. Общие требования безопасности» определяет следующий перечень основных видов средств защиты от поражения электрическим током: устройства оградительные, автоматического контроля и сигнализации, защитного заземления и зануления, автоматического отключения, выравнивания потенциалов и понижения напряжения, дистанционного управления; изолирующие устройства и покрытия; предохранительные устройства; знаки безопасности [106].

Рассмотрим методы предотвращения влияния вредных и опасных факторов, имеющих в данной лаборатории.

Для нормальной освещенности данной лаборатории имеется естественное освещение в виде трехконных проемом и искусственное освещение в виде 38 светильников *Osram L 18W/765* с люминесцентными лампами.

Для защиты от ультрафиолетового и теплового излучения, что приводит к развитию электроофтальмии, катаракте глаз, в лаборатории предусмотрены сварочные маски с защитным светофильтром, защитные ширмы, спецодежда, рукавицы, обувь.

Для защиты от электрического тока в лаборатории проведено защитное заземление, зануление, сделана изоляция токопроводов, кроме этого, предусмотрены диэлектрические перчатки, боты, коврики, маты, подставки, тем самым предупреждая возможность прямого воздействия электрического тока на человека.

Для уменьшения воздействия повышенного содержания вредных газов, паров и пыли в лаборатории проведена местная и общеобменная вентиляция.

Преимущество местной вентиляции в том, что отсос минимальных объёмов воздуха с большим содержанием вредных примесей в нём предупреждает загрязнение воздуха всего помещения. Скорость отсасывания воздуха – $0,5 \div 0,7$ м/с. Местный отсос представляет собой вытяжной зонт с гибким воздуховодом. Перед выбросом воздуха в атмосферу применяют очистку его от пыли, для чего используют масляные фильтры с эффективностью очистки $95 \div 98$ %.

Предельно допустимые концентрации аэрозолей и пыли в данной лаборатории: алюминия – 6 мг/м; кремния – 1 мг/м; озона – 1 мг/м; окислов азота – 5 мг/м; окиси углерода – 20 мг/м; окиси железа – 4 мг/м; марганца – $0,3$ мг/м; никеля – $0,5$ мг/м.

От негативного воздействия шума, которое снижает внимание, уменьшает быстроту реакции, нарушает обмен веществ и увеличивает вероятность профзаболевания, в лаборатории имеются звукоизолирующие ограждения, акустические экраны, а также противозумные наушники.

Для предотвращения ожогов от разбрызгивания расплавленного металла, источником которого является сварочная ванна и сварочная дуга, в лаборатории имеется спецодежда, рукавицы, обувь, что также уменьшает возможность возникновения пожара.

6.6 Психофизиологические особенности поведения человека при его участии в производстве работ в лаборатории

Рациональное цветовое оформление производственного интерьера – действительный фактор улучшения условий труда и жизнедеятельности человека. Установлено, что цвета могут воздействовать на человека по-разному: одни – успокаивают, другие – раздражают.

Психофизиологическим направлением профилактики утомления является внедрение производственной эстетики: рациональной окраски, освещения помещений и т.д.

Большинство производственных помещений рационально окрашивать в зелёные тона, так как этот цвет относится к нейтральным тонам. Он не возбуждает и не приводит к торможению центральной нервной системы.

Однако при окраске помещений и оборудования следует избегать одноцветности, так как однообразие быстро надоедает, вызывая охранительное торможение [105].

Рациональная окраска производственных помещений и оборудования может обеспечить рост производительности труда на 25 ÷ 30%.

Основным средством повышения производительности труда и снижения утомления является ритм труда и отдыха.

Важным психофизиологическим средством повышения производительности труда является создание благоприятных отношений в коллективе.

6.7 Разработка мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций мирного и военного времени

Порядок подготовки населения в области защиты от ЧС утвержден постановлением Правительства РФ от 24.07.95г. №738.

В настоящее время существует два основных направления ликвидации вероятности возникновения и последствий ЧС на промышленных объектах.

Первое направление заключается в разработке технических и организационных мероприятий, уменьшающих вероятность реализации опасного поражающего потенциала современных технических систем.

Второе направление заключается в подготовке объекта, обслуживающего персонала, служб ГО и населения к действиям в условиях ЧС. Основой этого направления является формирование планов действий в ЧС.

Документом, в котором отражены характер и масштабы опасностей на конкретном промышленном объекте и выработанные мероприятия по обеспечению промышленной безопасности и готовности к действиям в техногенных ЧС, является декларация безопасности промышленного объекта, которая разрабатывается организацией собственными силами и включает: общую информацию об объекте; анализ опасности промышленного объекта; обеспечение готовности промышленного объекта к локализации и ликвидации ЧС; информирование общественности; ситуационный план объекта [106].

Пожарная безопасность предусматривает такое состояние объекта, при котором исключалось бы возникновение пожара, а в случае его возникновения предотвращалось бы воздействие на людей опасных факторов пожара и обеспечивалась защита материальных ценностей.

Причинами пожаров технического характера являются: неисправность электрооборудования (короткое замыкание, перегрузка проводов, большие переходные сопротивления); несоблюдение графика планово-предупредительного ремонта, износ оборудования; искры и др.

В лаборатории применяют следующие средства тушения пожара:

– огнетушитель углекислотный ОУ-5, 3,5 кг для тушения лакокрасочных материалов и электрооборудования под напряжением (до 1000 В) – 1шт, пожарная тепловая сигнализация.

6.8 Обеспечение экологической безопасности и охраны окружающей среды

Охрана воздушного бассейна. Очистка загрязнённого воздуха и отходящих газов, образуемых при технологических процессах и выбрасываемых в атмосферу, от содержащихся в них вредных твёрдых, жидких и газообразных примесей является основным способом охраны воздушного бассейна от загрязнения.

Для очистки выбросов в атмосферу, производящихся в лаборатории, достаточно производить улавливание аэрозолей и газообразных примесей из загрязнённого воздуха. Установка для улавливания аэрозолей и пыли предусмотрена в системе вентиляции. Для этого используют масляные фильтры. Пыль, проходя через лабиринт отверстий (вместе с воздухом), образуемых кольцами или сетками, задерживается на их смоченной масляным раствором поверхности. По мере загрязнения фильтра кольца и сетки промывают в содовом растворе, а затем покрывают масляной плёнкой. Эффективность фильтров данного типа составляет 95÷98 %.

Предельно допустимая концентрация примесей в атмосфере на территории промышленного предприятия не должна превышать 30 процентов вредных веществ для рабочей зоны [108].

Охрана водного бассейна. Охрана водного бассейна заключается в очистке стоков лаборатории, для этого применяют механические методы, химические и физико-химические методы, а также комбинированные. Выбор

того или иного метода зависит от концентрации взвешенного вещества, степени дисперсности его частиц и требований, предъявляемых к очищенной воде.

Для предварительного удаления крупных загрязнений применяется процеживание стоков через решётки. Для выделения из сточных вод высокодисперсных минеральных примесей и лёгких взвесей обычно применяют отстойники, где они осаждаются или всплывают на поверхность и удаляются. Однако, степень очистки этими методами далека от стопроцентной. Поэтому следующим этапом для очистки сточных вод от лёгких и высокодисперсных взвесей является флотация. Эффект флотации в том, что диспергированные в тонкой суспензии пузырьки воздуха прилипают к частицам взвеси и всплывают на поверхность, образуя пену. Этот способ имеет высокую степень очистки 90÷98 процентов от нерастворимых примесей при незначительном времени пребывания сточных вод (20-40 мин) во флотационных установках. Однако даже при самых эффективных режимах флотации остаточное содержание взвешенных веществ составляет 10÷15 мг/л. Поэтому дальнейшим этапом очистки будет фильтрование через слой зернистого или пористого материала. Степень очистки этим способом может достигать в зависимости от режимов фильтрования 97÷98 %. Следует также стремиться к переходу на обратное водоснабжение [109].

Охрана почв и утилизация промышленных отходов. В лаборатории основными отходами являются отходы твердых материалов. Это материалы, применяемые для изготовления изделия, полностью или частично утратившие свои первоначальные качества. В данном случае: окалина, шлаки, обрезки проволоки, применяемой для сварки и т.д.

Существует два пути утилизации металлических отходов: с переплавом и без переплава. В случае утилизации без переплава отпадает необходимость в переработке, но происходит загрязнение почв и растёт площадь свалок, выделяемых для сброса отходов производства.

При способе с переплавом отходы металла переплавляются и появляется возможность использования отходов в дальнейшем производстве. Это приводит

к повышению эффективности производства, а также снижается уровень загрязнения окружающей среды, так как не требуется выделять площади под свалки, а металл используется практически стопроцентно.

Очевидно, что для охраны почв и утилизации промышленных металлических отходов рациональнее применять метод утилизации производственных металлических отходов с переплавом, как наиболее выгодный в экономическом и экологическом плане [108 - 109].

Заключение

1. Система освещения в лаборатории сварки плавлением состоит из естественного освещения (3 оконных проема) 38 светильников *Osram L 18W/765* с люминесцентными лампами.

2. Система вентиляции в лаборатории сварки плавлением – вытяжная.

3. Система пожаротушения в лаборатории сварки плавлением – огнетушитель углекислотный *OU-5*, 3,5 кг.

7 Концепция стартап-проекта

7.1 Объем и емкость рынка

Емкость рынка (*marketsize*) – размер рынка определенного товара или услуги, выраженный в совокупном объеме продаж товара за расчетный период; или общий спрос на категорию товаров, выраженный в покупательской способности населения. Часто в маркетинге вместо понятия «емкость рынка» используются его синонимы: размер и объем рынка.

На данный момент существуют аналоги представленному устройству – 3d-принтеры, позволяющие печатать изделия при помощи спекания порошка или расплавления проволоки. Эти объекты имеют технически сложные конструкции и дорогостоящие комплектующие.

Мировой рынок аддитивных технологий растет с каждым годом: уже сегодня его объем превышает \$5 млрд. Страны – лидеры, такие как США, Германия, Великобритания, Япония и др., суммарно контролируют более 50% мирового рынка аддитивного производства и останутся локомотивами его развития в долгосрочной перспективе [110].

На долю России пока приходится порядка 1% рынка, при этом страна отстает от лидеров по всем основным направлениям — начиная от производства материалов и оборудования и заканчивая внедрением готовой продукции [110].

Рынок аддитивных технологий складывается из сегментов оборудования, материалов, услуг и программного обеспечения:

- оборудование для 3D-печати — серийное изготовление станков и комплектующих;
- материалы для 3D-печати — универсальные порошки, в том числе для ответственных изделий;
- программное обеспечение для 3D-печати — единая цифровая платформа для разработки и производства;

- услуги 3D-печати — комплексное предложение по аутсорсингу изделий [111].

7.2 Расчет объема и емкости рынка

Согласно исследованию компании *Sculpteo*, в котором приняло участие 1300 человек из разных стран мира, 51% опрошенных использует аддитивные технологии в производстве, а не только для прототипирования.

Согласно прогнозам, к 2025 году глобальный рынок 3D-печати достигнет \$32 млрд., а к 2030 году — \$60 млрд. Отметим, что оценки *GlobalData* довольно сдержанные по сравнению с прогнозами других компаний. Так, *Statista* публикует оценку в \$40,8 млрд. к 2024 году. *FortuneBusinessInsights* ожидает, что рынок будет расти со среднегодовыми темпами 25,8% и достигнет 51,8 млрд. долл. к 2026 году. Еще более высоких темпов в 29,5% ежегодно до 2025 года и достижение объемов в \$63,5 млрд. ожидает *MordorIntelligence* [111]

MarketsandMarkets прогнозирует объем рынка 3D-печати в \$34,8 млрд. к 2024 году, при этом металл в 3D-печати получит наибольшее распространение, а также увеличится доля производства функциональных компонентов [111].

Аналогичные результаты получены и в опросе *DimensionalResearch*, проведенном в интересах *Essentium*: значимость простого прототипирования будет снижаться, тогда как печать в производственных процессах станет применяться чаще. Та же компания в другом опросе для *Jabil*, в котором приняли участие 308 респондентов, выяснила, выросла доля производителей, которые с помощью 3D-печати изготавливают от 10 до 50% функциональных и серийных элементов [111].

Потенциальными потребителями товара будут являться промышленные машиностроительные предприятия. Машиностроительная отрасль Кемеровской области включает более 100 предприятий, в том числе 48 крупных и средних,

выпускающих широкий перечень разнообразных видов машиностроительной продукции.

Представим, что 100 машиностроительных предприятий Кемеровской области захотят приобрести по одному разработанному 3d-принтеру для пробной эксплуатации.

Таким образом $100 \cdot 80000 = 8$ млн. руб. ёмкость рынка.

7.3 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли

С точки зрения вклада в общий рынок аддитивных технологий, Россия пока сильно отстает от стран-технологических лидеров. Причем отставание отмечается по всем основным направлениям — производство оборудования для 3D-печати, масштабы применения технологий в ключевых промышленных отраслях, производство сырья и вспомогательных материалов и т.д. На данный момент доля России в структуре мирового рынка аддитивного производства составляет около 1% [110].

Сегодня Россию никак нельзя назвать лидером в этой сфере. Доля России составляет всего 1%, страна находится на 11 месте в мире по производству и внедрению аддитивных технологий, однако рынок 3D-печати в России за последние 8 лет вырос в 10 раз, совокупные продажи оборудования, материалов и услуг в области аддитивного производства, включая *НИОКР*, выросли до 4,5 млрд. в год (оценка 2018 г.). На закупку оборудования и материалов приходится около 80% объемов рынка. В целом, в настоящее время на российском рынке аддитивных технологий отечественное оборудование занимает порядка 42%, иностранное оборудование — около 60%. Таким образом, в данной сфере снизилась импорт зависимость с 96% до 60% [111].

7.4 Планируемая стоимость продукта

Способ изготовления делится на 2 этапа: изготовление деталей, входящих в состав 3d-принтера, сборка 3d-принтера. На данном этапе проектирования рассматривается мелкосерийное производство. В рамках мелкосерийного производства производится от 10 до 1000 единиц продукции в год.

Устройство состоит из следующих частей: металлический каркас, навесное оборудование (подшипники – 18 шт., муфты 3 – шт., рычаг – 3 шт., направляющие – 6 шт., опоры под подшипники – 6 шт., шестигранник – 6 шт., держатель для горелки – 1 шт., пластины – 3 шт., держатели под двигатели – 3 шт.), электрическое оборудование (электродвигатели с редукторами – 3 шт., комплект электроники – 1 шт.).

Детали для сборки корпуса 3d-принтера изготавливали при помощи абразивной резки (труба 20 на 20 мм с толщиной стенки 1 мм из стали 20). Корпус 3d-принтера собирали при помощи сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа. Пластины, опоры подшипников и державку для сварочной горелки изготавливали из стали 20 толщиной 10 мм при помощи автоматической плазменной резки и механической обработки (фрезерование и сверление). При изготовлении шестигранников использовали токарную обработку и нарезали резьбу. Рычаги изготавливали из пластика на 3d-принтере.

Следующие детали, входящие в состав 3d-принтера, были покупные:

- двигатель *Nema 23* с редуктором 10:1;
- подшипник: наружный диаметр 30 мм, внутренний диаметр 10 мм, толщина 9 мм;
- муфта: наружный диаметр 32 мм, внутренний диаметр 10 мм на 14 мм; длина 40 мм;
- направляющая (шпилька с наружной резьбой M8) длиной 300 мм;
- шарнирные подшипники с внутренней резьбой M8;
- держатель под двигатель;

- комплект электроники.

Чтобы рассчитать стоимость всей установки, необходимо узнать цену отдельных его частей. Стоимость комплектующих, входящих в состав 3d-принтера представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Стоимость комплектующих

Наименование		Цена (руб.)	Количество	Стоимость (руб.).
Труба 20x20	м	170	7,5	1275
Лист толщиной 10 мм	м ²	4000	0,05	200
Шестигранник	м	210	0,15	31,5
Рычаг	шт.	700	3	2100
Электродвигатель и с редуктором	шт.	6000	3	18000
Держатель под двигатель	шт.	500	3	1500
Муфта	шт.	800	3	2400
Подшипник	шт.	50	6	300
Шарнирные подшипники	шт.	340	12	5400
Направляющая	м	50	3	150
Комплект электроники	шт.	10000	1	10000
Итого				40036,5

Стоимость комплектующих, входящих в состав 3d-принтера – 40036,5 руб. В зависимости от ценообразования цена на комплектующие может

меняться. Стоимость изготовления деталей, входящих в 3d-принтер, сборка, настройка и программирование – 40000 руб.

Себестоимость изготовления 3d-принтера составляет 80036,5 руб.

7.5 Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов

Основным отличием разработанного 3d-принтера является его универсальность, а также простота конструкции.

Во всех существующих аналогах в качестве инструмента для перемещения сварочной горелки используются роботы-манипуляторы со своим программным обеспечением. Программное обеспечение является специализированным и может использоваться только при изготовлении одного типа изделий.

Разработанный 3d-принтер является универсальным и легко перепрограммируемым. То есть путем несложных манипуляций возможно перепрограммировать с одного типа изделий на другое. Конструкция в виде дельта компоновки позволяет защитить все механические, электрические и подвижные части от теплового воздействия и разбрызгивания, которое присутствует при наплавке плавящимся электродом в среде защитных газов и может вывести их из строя.

7.6 Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта

Определение целевой аудитории является важным критерием при выведении устройства на рынок. Целевая группа, целевая аудитория — термин, используемый в маркетинге или рекламе для обозначения группы людей,

объединённых общими признаками, или объединённой ради какой-либо цели или задачи.

Под общими признаками могут пониматься любые характеристики, требуемые организаторами. Главное свойство целевой аудитории с точки зрения рекламы — то, что именно эти люди с большей вероятностью купят продукт. Поэтому именно на эту группу лиц направлено рекламное сообщение и рекламные мероприятия [112].

Предполагаемыми потребителями разработки будут являться машиностроительные промышленные предприятия, а также малый и средний бизнес, в которых применяется изготовление металлических изделий сложной формы. Разработка может в частных случаях заменять следующие способы обработки металлов: механическая обработка (отходы металла в виде стружки; металлургия большая трудоемкость).

7.7 Стратегия продвижения продукта на рынок

Продвижение товаров и услуг – это важнейшая составная часть комплекса маркетинговых мероприятий, представляющую любую форму действий, используемых предприятием для информирования, убеждения и напоминания потребителям о своих товарах, услугах, образах, идеях, общественной деятельности [113].

Компания может использовать любые способы продвижения товара в магазине и Интернете. Основные задачи при продвижении – информировать, убеждать и напоминать потенциальным покупателям о своих продуктах, услугах, образах, идеях и общественной деятельности.

Маркетинговое продвижение товаров преследует следующие цели:

- сформировать образ престижности компании, ее товаров и услуг;
- создать имидж инновационности компании и ее продукции;
- проинформировать широкую аудиторию о свойствах продукта;

- обосновать стоимость товара;
- внедрить в сознание покупателей представление об отличительных характеристиках товара;
- дать информацию о том, где можно купить продукт или воспользоваться услугой;
- рассказать аудитории о выгодных отличиях товара от аналогов конкурентов.

При формировании маркетинговых стратегий компании:

- анализируют свои сильные и слабые стороны;
- оценивают возможности рынка;
- анализируют отрасль;
- оценивают потенциал рынка;
- анализируют конкурентов;
- изучают отношения с клиентами и партнерами;
- изучают, как внешняя среда влияет на продажи;
- проводят ревизию маркетинга;
- выполняют маркетинговый анализ внутренней среды;
- определяют направления, в которых необходимо совершенствовать старую и разрабатывать новую продукцию;
- формируют маркетинговый план;
- мониторят и контролируют мероприятия в рамках маркетингового продвижения.

Акцент рекламных усилий в настоящее время сместился на общероссийских, отраслевых и научных журналах, бюллетенях и каталогах, на размещение информации рекламного характера и *PR*-материалов в ведущих специализированных периодических изданиях. Бурное распространение сети Интернета в России в последние годы обусловило возрастание роли рекламной деятельности предприятия через Интернет-ресурсы (собственный сайт, специализированные ресурсы, доски объявлений и т. д.).

Таким образом, этапами продвижения 3d-принтера являются:

- посещение специализированных выставок;
- интернет (сайт, информационные порталы, социальные сети и т.д.);
- пробное внедрение устройства и получение обратной связи от потребителей;
- улучшение устройства в соответствии с полученными данными на основе опыта внедрения.

Заключение

1. На основе проведенного литературного обзора современного состояния исследовательских работ в области аддитивного производства, одной из перспективных технологий получения металлических изделий являются дуговые методы плавления присадочной проволоки (*GMAW* и *GTAW*). Актуальность данного метода заключается в:

- низкой себестоимости наплавочных материалов;
- реализации на стандартном оборудовании (роботизированные комплексы, автоматические установки);
- высокой производительности процесса;
- эффективном использовании наплавочных материалов (минимальные потери).

2. Спроектирован, разработан, изготовлен и апробирован в лабораторных условиях 3d-принтер для электродугового послойного выращивания. Установлена возможность получения, на заданных режимах выращивания (сила тока, напряжение, скорость наплавки) и диаметром наплавляемого материала 1 мм бездефектных корпусных конструкций толщиной 3-8 мм.

3. Определено, что при электродуговом послойном выращивании стенки изделий имеют градиентное строение. Дендритную структуру имеет только последний наплавленный слой. Нижележащие слои подвергаются вторичной термообработке за счет тепловыделения верхнего слоя. В результате этого размер зерна уменьшается с глубиной до 10 мкм. Происходит измельчение размеров зерен от 4 к 1 слою. Средний размер зерен уменьшается в 2,2 в поперечном сечении с 16,4 мкм до 7,3 мкм, в 1,9 раза в продольном сечении с 18,4 мкм до 9,6 мкм.

4. Результаты механических испытаний показали, что образцы имели в среднем предел прочности при растяжении 708-716 МПа, предел текучести 341-349 МПа и относительное удлинение 5,10-5,18%. Данные значения сопоставимы

с механическими свойствами сталей по ГОСТ 6713-91 (предел прочности 685-700 *МПа*, предел текучести 335-345 *МПа*) и по ГОСТ 1050-88 (предел прочности 660-680 *МПа*, предел текучести 350-370 *МПа*).

Список литературы

1. ГОСТР 57558-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.
2. Murr, L.E., Martinez, E., Amato, K.N., Gaytan, S.M., Hernandez, J., Ramirez, D.A., Shindo, P.W., Medina, F., Wicker, R.B. Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: Examples of 3D materials science (2012) *Journal of Materials Research and Technology*, 1 42–54. DOI: 10.1016/S2238-7854(12)70009-1
3. Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., Shindo, P.W., Medina, F.R., Wicker, R.B. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies (2012) *Journal of Materials Science and Technology*, 28:1, 1–14. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60016-4
4. D DGu, W Meiners, K Wissenbach, R Poprawe (2012) Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *International Materials Reviews*, 57:3, 133–164, DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
5. Sing, S.L., An, J., Yeong, W.Y., Wiria, F.E. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs (2016) *Journal of Orthopaedic Research*, 34:3 369–385. DOI: 10.1002/jor.23075
6. C. Körner (2016) Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review, *International Materials Reviews*, 61:5, 361–377, DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289
7. Dirk Herzog, Vanessa Seyda, Eric Wycisk, Claus Emmelmann, Additive manufacturing of metals, *ActaMaterialia* 117 (2016) 371–392 <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
8. Harun, W.S.W., Manam, N.S., Kamariah, M.S.I.N., Sharif, S., Zulkifly, A.H., Ahmad, I., Miura, H. A review of powdered additive manufacturing techniques

for Ti-6Al-4V biomedical applications (2018) *Powder Technology*, 331 74–97. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.03.010

9. Shuying Chen, Yang Tong, Peter K. Liaw, Additive manufacturing of high-entropy alloys: a review, *Entropy* 2018, 20, 937; doi:10.3390/e20120937

10. Naveed Ahmed, Direct metal fabrication in rapid prototyping: a review, *Journal of Manufacturing Processes* 42 (2019) 167–191 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.001>

11. William E. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, *JMEPEG* (2014) 23:1917–1928 DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z

12. W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, S. S. Babu (2016) The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International Materials Reviews*, 61:5, 315–360, DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649

13. Murr, L.E. A Metallographic review of 3D printing/additive manufacturing of metal and alloy products and components (2018) *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 7:2 103–132. DOI: 10.1007/s13632-018-0433-6

14. Kok, Y., Tan, X.P., Wang, P., Nai, M.L.S., Loh, N.H., Liu, E., Tor, S.B. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review (2018) *Materials and Design*, 139 565–586. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.021

15. T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science* 92 (2018) 112–224 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

16. A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, M. Mehrpouya, Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review, *Journal of Manufacturing Systems* 53 (2019) 124–149 <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>

17. Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., Shi, G., Blackburn, J. Progress in additive manufacturing on new materials: A review (2019) *Journal of Materials Science and Technology*, 35 (2), pp. 242–269. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002

18. D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *Int J AdvManufTechnol* (2015) 81:465–481 DOI 10.1007/s00170-015-7077-3
19. J.P. Oliveira, T.G. Santos, R.M. Miranda, Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice, *Progress in Materials Science* 107 (2020) 100590 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100590>
20. S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove (2016) *Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology*, 32:7, 641–647 <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
21. B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, Jing Xu, J. Norrish, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *Journal of Manufacturing Processes* 35 (2018) 127–139 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
22. C.R. Cunningham, J.M. Flynn, A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman, Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 22 (2018) 672–686 <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
23. E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger, C. Leyens, Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads, *Surface and Coatings Technology* 206 (2011) 1120–1129. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.095
24. E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger, C. Leyens, Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part II: Hardness and dimensions of single beads, *Surface and Coatings Technology* 206 (2011) 1130–1141. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.094
25. E. Brandl, F. Palm, V. Michailov, B. Viehweger, C. Leyens, Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire, *Materials and Design* 32 (2011) 4665–4675. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.06.062
26. Y. Ding, M. Akbari, R. Kovacevic, Process planning for laser wire-feed metal additive manufacturing system, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018) 95:1–4 355–365. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1179-z>

27. N. Chekir, J.J. Sixsmith, R. Tollett, M. Brochu, Laser wire deposition of a large Ti-6Al-4V space component, *Welding Journal* 98:6 (2019) 172-s–180-s. DOI: 10.29391/2019.98.014
28. B.T. Gibson, Y.K. Bandari, B.S. Richardson, W.C. Henry, E.J. Vetland, T.W. Sundermann, L.J. Love, Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V, *Additive Manufacturing* 32 (2020) 100993 <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100993>
29. Sergei Yu. Tarasov, Andrey V. Filippov, Nikolai L. Savchenko, Sergey V. Fortuna, Valery E. Rubtsov, Evgenii A. Kolubaev, Sergey G. Psakhie, Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018) 99:9–12 2353–2363. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2643-0>
30. J. Fuchs, C. Schneider, N. Enzinger, Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source, *Welding in the World* (2018) 62:2 267–275. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0537-7>
31. P. Wanjara, K. Watanabe, C. de Formanoir, Q. Yang, C. Bescond, S. Godet, M. Brochu, K. Nezaki, J. Gholipour, P. Patnaik, Titanium alloy repair with wire-feed electron beam additive manufacturing technology, *Advances in Materials Science and Engineering* (2019) 3979471 <https://doi.org/10.1155/2019/3979471>
32. F. Martina, J. Mehnen, S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang, Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V, *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 1377–1386. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002
33. J. Zhang, X. Wang, S. Paddea, X. Zhang, Fatigue crack propagation behaviour in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress, *Materials and Design* 90 (2016) 551–561. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.141>
34. J. Lin, Y. Lv, Y. Liu, Z. Sun, K. Wang, Z. Li, Y. Wu, B. Xu, Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by

continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 69 (2017) 19–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.12.015>

35. J.R. Hönnige, P. Colegrove, S. Williams, Improvement of microstructure and mechanical properties in wire + arc additively manufactured Ti-6Al-4V with machine hammer peening, *Procedia Engineering* 216 (2017) 8–17. DOI: 10.1016/j.proeng.2018.02.083

36. J. Lin, Y. Lv, D. Guo, X. Wu, Z. Li, C. Liu, B. Guo, G. Xu, B. Xu, Enhanced strength and ductility in thin Ti-6Al-4V alloy components by alternating the thermal cycle strategy during plasma arc additive manufacturing, *Materials Science and Engineering A* 759 (2019) 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.025>

37. J. Lin, Y. Lv, Y. Liu, Z. Sun, K. Wang, Z. Li, Y. Wu, B. Xu, Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 69 (2017) 19–29 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.12.015>

38. S. Ríos, P.A. Colegrove, S.W. Williams, Metal transfer modes in plasma wire+arc additive manufacture, *Journal of Materials Processing Tech.* 264 (2019) 45–54 DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.043

39. R. Biswal, X. Zhang, M. Shamir, A.A. Mamun, M. Awd, F. Walther, A.K. Syed, Interrupted fatigue testing with periodic tomography to monitor porosity defects in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V, *Additive Manufacturing* 28 (2019) 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.026>

40. A.R. McAndrew, M.A. Rosales, P.A. Colegrove, J.R. Hönnige, A. Ho, R. Fayolle, K. Eytayo, I. Stan, P. Sukrongpang, A. Crochemore, Z. Pinter, Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement, *Additive Manufacturing* 21 (2018) 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>

41. F. Martina, M.J. Roy, B.A. Szost, S. Terzi, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.J. Withers, J. Meyer, M. Hofmann, Residual stress of as-deposited and rolled wire +

arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components, *Materials Science and Technology* 32:1 (2016) 1439–1448. DOI: 10.1080/02670836.2016.1142704

42. J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell, The effectiveness of combining rolling deformation with wire–arc additive manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V, *Materials Characterization* 114 (2016) 103–114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2016.02.001>

43. B. Wu, Z. Pan, G. Chen, D. Ding, L.i Yuan, D. Cuiuri, H. Li, Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling, *Science and Technology of Welding and Joining* 24:5 (2019) 484–494. DOI: 10.1080/13621718.2019.1580439

44. T. Lu, C. Liu, Z. Li, Q. Wu, J. Wang, T. Xu, J. Liu, H. Wang, S. Ma, Hot-wire arc additive manufacturing Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V titanium alloy: pore characterization, microstructural evolution, and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds* 817 (2020) 153334 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153334>

45. J.W. Elmer, G. Gibbs (2019) The effect of atmosphere on the composition of wire arc additive manufactured metal components, *Science and Technology of Welding and Joining*, 24:5, 367–374 <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1605473>

46. Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., Hascoët, J.Y. Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications (2018) *Welding in the World* 62:2 259–266 DOI: 10.1007/s40194-017-0536-8

47. N. Rodriguez, L. Vázquez, I. Huarte, E. Arruti, I. Taberero, P. Alvarez, Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel, *Welding in the World* (2018) 62:1083–1096 <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0606-6>

48. Anne C.M. Bekker, Jouke C. Verlinden, Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel, *Journal of Cleaner Production* 177 (2018) 438–447 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.148>

49. K. Hoefler, A. Haelsing, P. Mayr, Arc-based additive manufacturing of steel components – comparison of wire- and powder-based variants, *Welding in the World* (2018) <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0527-9>
50. F. Martina, J. Ding, S. Williams, A. Caballero, G. Pardal, L. Quintino, Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel, *Additive Manufacturing* 25 (2019) 545–550 <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>
51. Vahid A Hosseini, Mats Högström, KjellHurtig, Maria Asuncion Valiente Bermejo, Lars-Erik Stridh, Leif Karlsson, Wire-arc additive manufacturing of a duplex stainless steel: thermal cycle analysis and microstructure characterization, *Welding in the World* (2019) 63:975–987 <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00735-y>
52. Md.R.U. Ahsan, A.N.M. Tanvir, Gi-JeongSeo, Brian Bates, Wayne Hawkins, Chanhoo Lee, P.K. Liaw, Mark Noakes, Andrzej Nycz, Duck Bong Kim, Heat-treatment effects on a bimetallic additively-manufactured structure (BAMS) of the low-carbon steel and austenitic-stainless steel, *Additive Manufacturing* 32 (2020) 101036 <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101036>
53. V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, V.A. Girelli, T. Trombetti, Experimental results for structural design of wire-and-arc additive manufactured stainless steel members, *Journal of Constructional Steel Research* (2020) 105858 <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105858>
54. J. W. Elmer, J. Vaja, J. S. Carpenter, D. R. Coughlin, M. J. Dvornak, P. Hochanadel, P. Gurung, A. Johnson, G. Gibbs, Wire-based additive manufacturing of stainless steel components, *Welding Journal* (2020) 99 8-s–24-s
55. Fang Li, Shujun Chen, Junbiao Shi, Yun Zhao (2019) In-process control of distortion in wire and arc additive manufacturing based on a flexible multipoint support fixture, *Science and Technology of Welding and Joining*, 24:1, 36–42 <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1476083>
56. A. Gomez Ortega, L. Corona Galvan, F. Deschaux-Beaume, B. Mezrag, S. Rouquette, Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process,

Science and Technology of Welding and Joining (2018) 23:4 316–332
<https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1388995>

57. HaibinGeng, Jinglong Li, JiangtaoXiong, Xin Lin (2017) Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy, Science and Technology of Welding and Joining, 22:6, 472–483, DOI: 10.1080/13621718.2016.1259031

58. Arturo Gomez Ortega, Luis Corona Galvan, Mehdi Salem, Kamel Moussaoui, Stephane Segonds, SébastienRouquette, FrédéricDeschaux-Beaume (2019) Characterisation of 4043 aluminium alloy deposits obtained by wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process, Science and Technology of Welding and Joining, 24:6, 538–547, DOI: 10.1080/13621718.2018.1564986

59. S. Zhang, Y. Zhang, M. Gao, F. Wang, Q. Li, X. Zeng (2019) Effects of milling thickness on wire deposition accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing, Science and Technology of Welding and Joining, 24:5, 375–381
<https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1595925>

60. JianglongGu, Shouliang Yang, Minjie Gao, Jing Bai, YuchunZhai, Jialuo Ding, Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling, Materials and Design 186 (2020) 108288
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108288>

61. Zhifen Zhang, Wenjing Ren, Zhe Yang, Guangrui Wen, Real-time seam defect identification for Al alloys in robotic arc welding using optical spectroscopy and integrating learning, Measurement (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107546>

62. Qiuyu Miao, Dongjiang Wu, Dongsheng Chai, Yu Zhan, Guijun Bi, FangyongNiu, Guangyi Ma, Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing, Materials and Design 186 (2020) 108205
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108205>

63. YasharJavadi, Charles N. MacLeod, Stephen G. Pierce, Anthony Gachagan, David Lines, Carmelo Mineo, Jialuo Ding, Stewart Williams,

MomchilVasilev, Ehsan Mohseni, Riliang Su, Ultrasonic phased array inspection of a Wire + Arc Additive Manufactured (WAAM) sample with intentionally embedded defects, *Additive Manufacturing* 29 (2019) 100806 <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100806>

64. T. Horii, S. Kirihara, Y.Miyamoto, Freeform fabrication of Ti–Al alloys by 3D micro-welding, *Intermetallics* 16 (2008) 1245–1249 [doi:10.1016/j.intermet.2008.07.009](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2008.07.009)

65. W. Ou, T. Mukherjee, G.L. Knapp, Y. Wei, T. DebRoy, Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127 (2018) 1084–1094 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.111>

66. G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, S. Williams, Development of wire + arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 82 (2019) 329–335 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009>

67. G. Marinelli, F. Martina, H. Lewtas, D. Hancock, S. Mehraban, N. Lavery, S. Ganguly, S. Williams, Microstructure and thermal properties of unalloyed tungsten deposited by wire + arc additive manufacture, *Journal of Nuclear Materials* 522 (2019) 45–53 <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.04.049>

68. T. Abe, D. Mori, K. Sonoya, M. Nakamura, H.Sasahara, Control of the chemical composition distribution in deposited metal by wire and arc-based additive manufacturing, *Precision Engineering* 55 (2019) 231–239 <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.09.010>

69. Z. Zeng, B.Q Cong, J.P. Oliveira, W.C. Ke, N. Schell, B. Peng, Z.W. Qi, F.G Ge, W. Zhang, S.S. Ao, Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: Microstructure and mechanical properties, *Additive Manufacturing* 32 (2020) 101051 <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101051>

70. Жуков В.В. Аддитивное производство металлических изделий (обзор) / В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов // Автоматическая сварка.- 2016. - № 5-6. - С. 148-153.
71. Коржик В.Н. Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий/ В.Н. Коржик, В.Ю. Хаскин, В.И. Ткачук, С.И. Пелешенко, В.В. Коротенко, А.А. Бабич // Автоматическая сварка.-2016. - № 5-6. - С. 127-134.
72. Carter W.T. Direct Laser Sintering of Metals / W.T. Carter, J. Carter, G.J. Marshall // 4th Solid Freeform Fabrication Symposium. - 1993. - P.51-59.
73. Kruth J.P. Selective laser melting of iron-based powder / J.P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, B. Lowers // Journal of Materials Processing Technology. - 2003. - Vol. 149 - P.616-622.
74. Larsson M. Rapid Manufacturing with Electron Beam Melting (EBM) - A manufacturing revolution? / M. Larsson, U. Lindthe, O. Harrysson // Solid Freeform Fabrication Symposium. - 2003. - P.433-438.
75. Michaels S. Metal parts generation by three dimensional printing / S.Michaels, E.M. Sachs, M.J. Chima // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin,USA. - 1992. - P.244-250.
76. Techel A. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), интернет-издание Laser Institute of America.
77. Ding D.H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D.H. Ding, Z.X. Pan, D. Cuiuri, H.J. Li, // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Oct. 2015. - P.465-481.
78. Taminger K.M. Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing / K.M. Taminger, Hafley R.A. // 139 specialists meeting on cost effective manufacture via net shape processing. Amsterdam (The Netherlands): NATO. - 2006. - P.16.1- 16.10.

79. Graff K.F. Very high power ultrasonic additive manufacturing (vhpuam) for advanced materials / K.F. Garff, M. Short, M. Norfolk // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin,USA. - 2010. - P.82-89.
80. Dickens P.M. Rapid prototyping using 3-D welding / P.M. Dickens, M.S. Pridham, R.C. Cobb, I. Gibson, G. Dixon // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. - 1992. - P.280-290.
81. Spencer J.D. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding / J.D. Spencer, P.M. Dickens, C.M. Wykes // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture. - 1998. - P.175-182.
82. Ribero A.F. Rapid prototyping process using metal directly / A.F. Ribero, J. Norrish // Solid Freeform Fabrication Proceedings. - 1996. - P.249-256.
83. Kazanas P. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture / P. Kazanas, P. Deherkar, P. Almeida, H. Lockett, S. Williams // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture. - 2012. - P.1042-1051.
84. Xiong J. Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing / J. Xiong, G.J. Zhang, W.H. Zhang // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2015. - P.1767-1776.
85. Wang H. Rapid prototyping based on variable polarity gas tungsten arc welding for a 5356 aluminium alloy / H. Wang, R. Kovacevic // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture. - 2001. - P.1519-1527.
86. Xiong J. Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing / J. Xiong, G.J. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. - 2014. - P.962-968.
87. Xiong J. Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision / J. Xiong, G.J. Zhang // Measurement Science and Technology. - Nov. 2013. - P.115103.

88. Yang D.Q. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing / D.Q. Yang, C.J. He, G.J. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. - Jan. 2013. - P.153-160.
89. Gu J.L. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy / J.L. Gu, J.L. Ding, S.W. Williams, H.M. Gu, J. Bai, Y.C. Zhai, P.H. Ma // Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing. - Jan. 2016. - P.18-26.
90. Manogharan G. Experimental Study of Disruption of Columnar Grains During Rapid Solidification in Additive Manufacturing / G. Manongharan, B. Yelamanchi, R. Aman, Z. Mahbooba // JOM. - Mar. 2016. - P.842-849.
91. Bermingham M.J. Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V with trace boron additions / M.J. Bermingham, D. Kent, H. Zhan, D.H. St John, M.S. Dargusch // ActaMaterialia. - Jun. 2015. - P.289-303.
92. Wang F.D. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy / F.D. Wang, S. Williams, M. Rush // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Nov. 2011. - P.597-603.
93. Cong B.O. Influence of CMT Process on Porosity of Wire Arc Additive Manufactured Al-Cu Alloy / B.Q. Cong, J.L. Ding // Rare Metal Materials and Engineering. - Dec. 2014. - P.3149-3153.
94. Cong B.O. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy / B.Q. Cong, J.L. Ding, S Williams // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Feb. 2015. - P.1593-1606.
95. Abe T. Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing / T. Abe, H. Sasahara // Precision Engineering- Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology. - Jun. 2016. - P.387-395.

96. Liu L.M. Additive manufacturing of steel-bronze bimetal by shaped metal deposition: interface characteristics and tensile properties / L.M. Liu, Z.L. Zhuang, F. Liu, M.L. Zhu // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Dec.2013. -P.2131-2137.
97. Ding D.H. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing / D.H. Ding, Z.X. Pan, D. Cuiuri, H.J. Li, S. van Duin, N. Larkin // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. - Jun. 2016. - P.32-42.
98. Ding D.H. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part / D.H. Ding, C. Shen, Z.X. Pan, D. Cuiuri, h.J. Li, N. Larkin, S. van Duin // Computer-Aided Design. - Apr. 2016. - P.66-75.
99. Ding J. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts / J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnert, S. Ganguly, P.M.S. Almeida, F. Wang, S. Williams // Computational Materials Science. - Dec. 2011. - P.3315- 3322.
100. Ding D.H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) / D.H. Ding, Z.X. Pan, D. Cuiuri, H.J. Li // Robotics and Computer- Integrated Manufacturing. - Feb. 2015. - P.101-110.
101. Ding D.H. Process planning strategy for wire and arc additive manufacturing / D.H. Ding, Z.X. Pan, D. Cuiuri, H.J. Li // Robotic Welding, Intelligence and Automation, RWIA'2014. - 2015. - P.437-450.
102. Xiong J. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis / J. Xiong, G.J. Zhang, J.W. Hu, L. Wu // Journal of Intelligent Manufacturing. - Feb. 2014. - P.157-162.
103. Xiong J. Forecasting process parameters for GMAW-based rapid manufacturing using closed-loop iteration based on neural network / J. Xiong, G.J. Zhang, J.W. Hu, Y.Z. Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Oct. 2013. - P.743-751.

104 Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. Журнал «Светотехника», № 11-12, 1995.

105 Гришагин В.М., Портола В.А., Фарберов В.Я. Охрана труда, безопасность и экологичность проекта. Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 177с.

106 Гришагин В.М., Фарберов В.Я. Расчеты по обеспечению комфорта и безопасности. Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2007. – 155с.

107 Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548096. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996.

108 Гришанин В.М., Фарберов В.Я. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2006-316 с.

109 Ансеров Ю.М. Машиностроение и охрана окружающей среды. – М.: Машиностроение, 1976 – 342с.

110 https://www.soel.ru/novosti/2018/tekhnologii_additivnogo_proizvodstva_rynok_tendentsii_i_perspektivy_do_2025_g/#:~:text=Мировой%20рынок%20аддитивных%20технологий%20растет,его%20развития%20в%20долгосрочной%20перспективе.

111 [https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnyh-tekhnologii-v-proizvodstvo.](https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnyh-tekhnologii-v-proizvodstvo)

112 Целевая группа [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Целевая_группа.](https://ru.wikipedia.org/wiki/Целевая_группа)

113 Стратегия продвижения нового товара на рынок [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://vuzlit.ru/213509/strategiya_prodvizheniya_novogo_tovara_rynok Дата обращения: (18.05.2020)



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

Исследование структуры и механических свойств изделий, выращенных электродуговым послойным выращиванием

Выполнил:

студент группы 10А72

Турсунов И.Ф.

Руководитель:

к.т.н., Доцент

Крюков А.В.

Актуальность работы

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений реализации технологических процессов производства металлических изделий сложной конфигурации является аддитивное производство. В его основе лежит послойная наплавка металла в соответствии с трехмерной моделью, созданной посредством компьютерного проектирования.

В качестве исходного материала используют:

- металлические порошки;
- проволоку;
- листовой металл.

Источником тепла является:

- электронный пучок;
- лазерный луч;
- электрическая дуга.

Преимущества электродуговых способов получения металлических изделий

Среди перечисленных методов аддитивного производства металлических изделий одним из наиболее хорошо изученных является послойная наплавка проволок, которая обладает рядом преимуществ:

- на рынке представлена широкая номенклатура проволок;
- возможность получать прочное сплавление слоев;
- обеспечивает хорошую защиту изготавливаемого изделия от воздействия окружающей среды;
- обладают высокой производительностью.

Цель и задачи работы

Цель работы: Исследование структуры и механических свойств изделий, выращенных электродуговым послойным выращиванием.

Для достижения цели необходимо решить ряд задач:

1. Спроектировать и разработать конструкцию 3d - принтера.
2. Получить металлические изделия.
3. Исследование структуры изделий, выращенных электродуговым послойным выращиванием.
4. Исследовать механические свойства изделий, выращенных электродуговым послойным выращиванием.

Проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера

При проектировании конструкции 3d-принтера соблюдались следующие условия:

- все механические, электрические и подвижные части были не в зоне выращивания, т.к. разбрызгивание, которое присутствует при наплавке плавящимся электродом в среде защитных газов, может вывести их из строя;
- сварочная горелка перемещалась по всем трем осям X , Y , Z , а стол, на котором происходило выращивание был неподвижным. При подвижном столе нагрузки, на механизмы перемещающие стол, возрастают с каждым наплавленным слоем, т.к. увеличивается вес;
- материал корпуса 3d-принтера, который находится вблизи с зоной выращивания, выдерживал высокие температуры. Т.к. при процессе электродугового послойного выращивания будет выделяться теплота и возможен нагрев конструкции 3D-принтера и, если материал корпуса не выдержит температуру, это может привести к деформации основных узлов.

Проектирование, разработка и изготовление конструкции 3d-принтера



Лабораторный образец 3d-принтера



Лабораторный образец 3d-
принтера дельта компоновки 82

Дуговые способы получения металлических изделий



выращенный образец



наплавленный и
обработанный
цилиндр
из проволоки ER-308LSi



наплавленный и
обработанный
цилиндр из проволоки
Св-08Г2С



наплавленная стенка
из проволоки
Св-08Г2С

Методы и методики проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований будет произведено электродуговое послойное выращивание плавящимся электродом с использованием разработанного 3D-принтера. В качестве электрода использовалась сварочная проволока марки Св-08Г2С диаметром 1 мм. Послойное выращивание осуществлялось на подложке из стали Стбсп.

Формирование изделий происходило на следующих режимах: сила тока 70-80А, напряжение 18-20В, скорость наплавки 200 мм/мин.

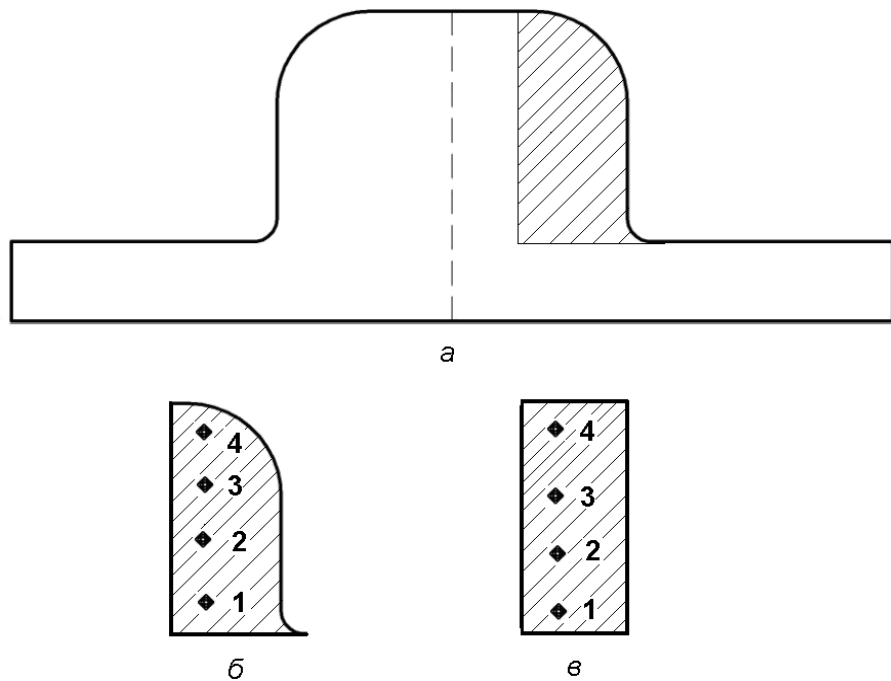


Схема подготовки образцов для исследования структуры

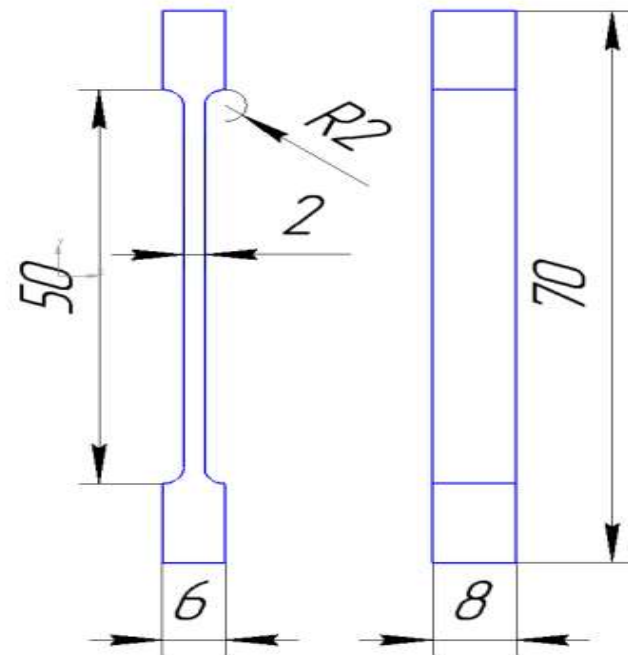
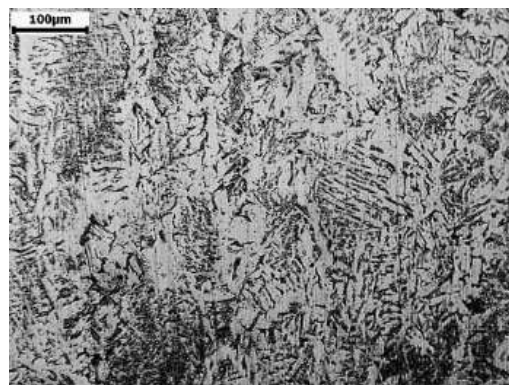


Схема подготовки образцов для испытаний на растяжение

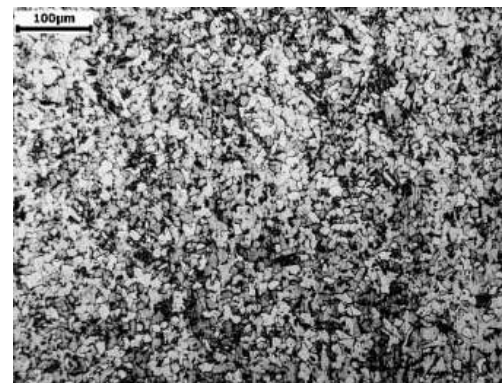
Структура металлических изделий напечатанных на 3D-принтере



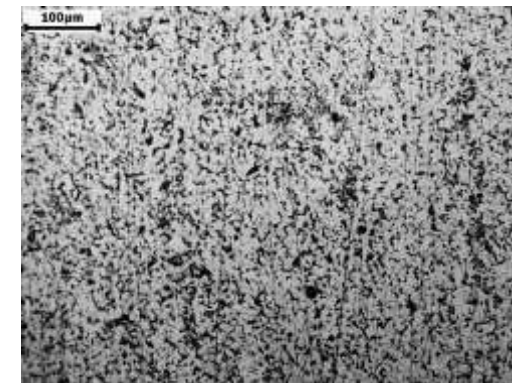
а



б



д



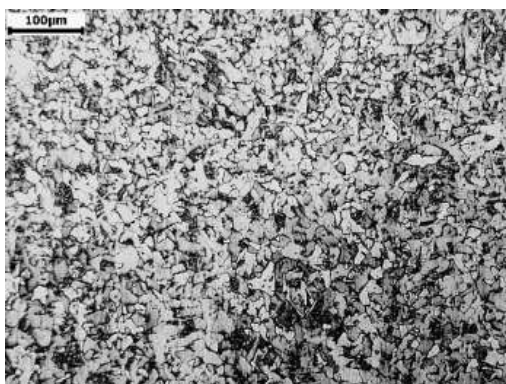
е

Структура 4 слоя:

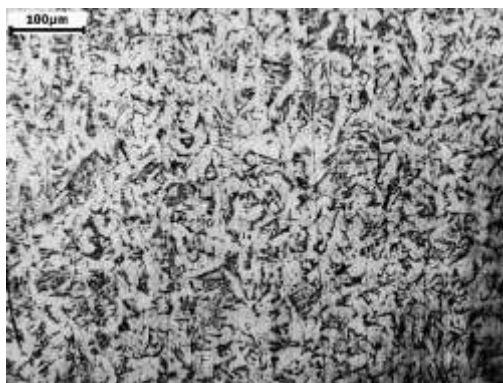
а – поперечное направление, б – продольное направление

Структура 2 слоя:

д – поперечное направление, е – продольное направление



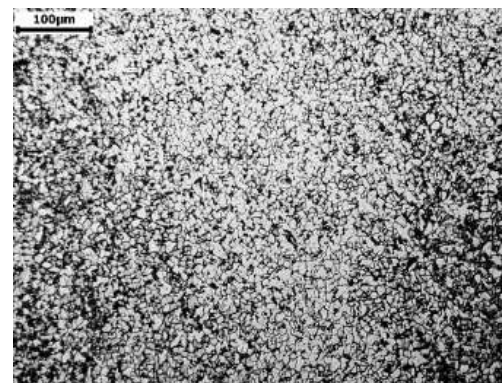
в



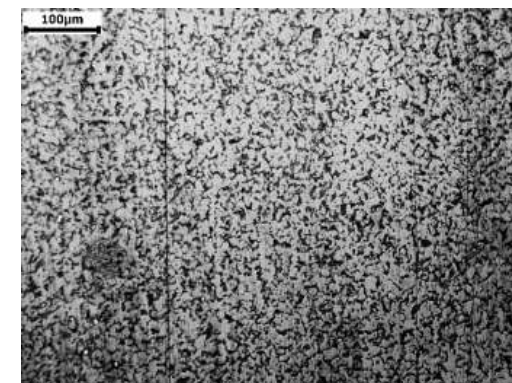
г

Структура 3 слоя:

в – поперечное направление, г – продольное направление



ж



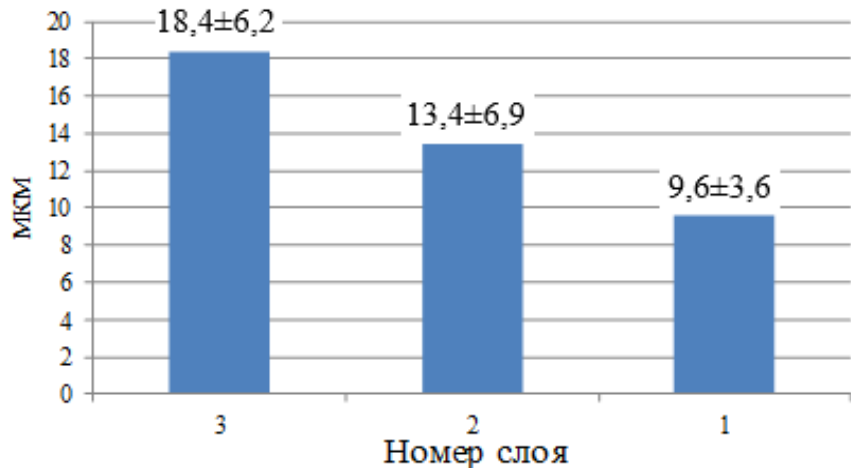
з

Структура 1 слоя:

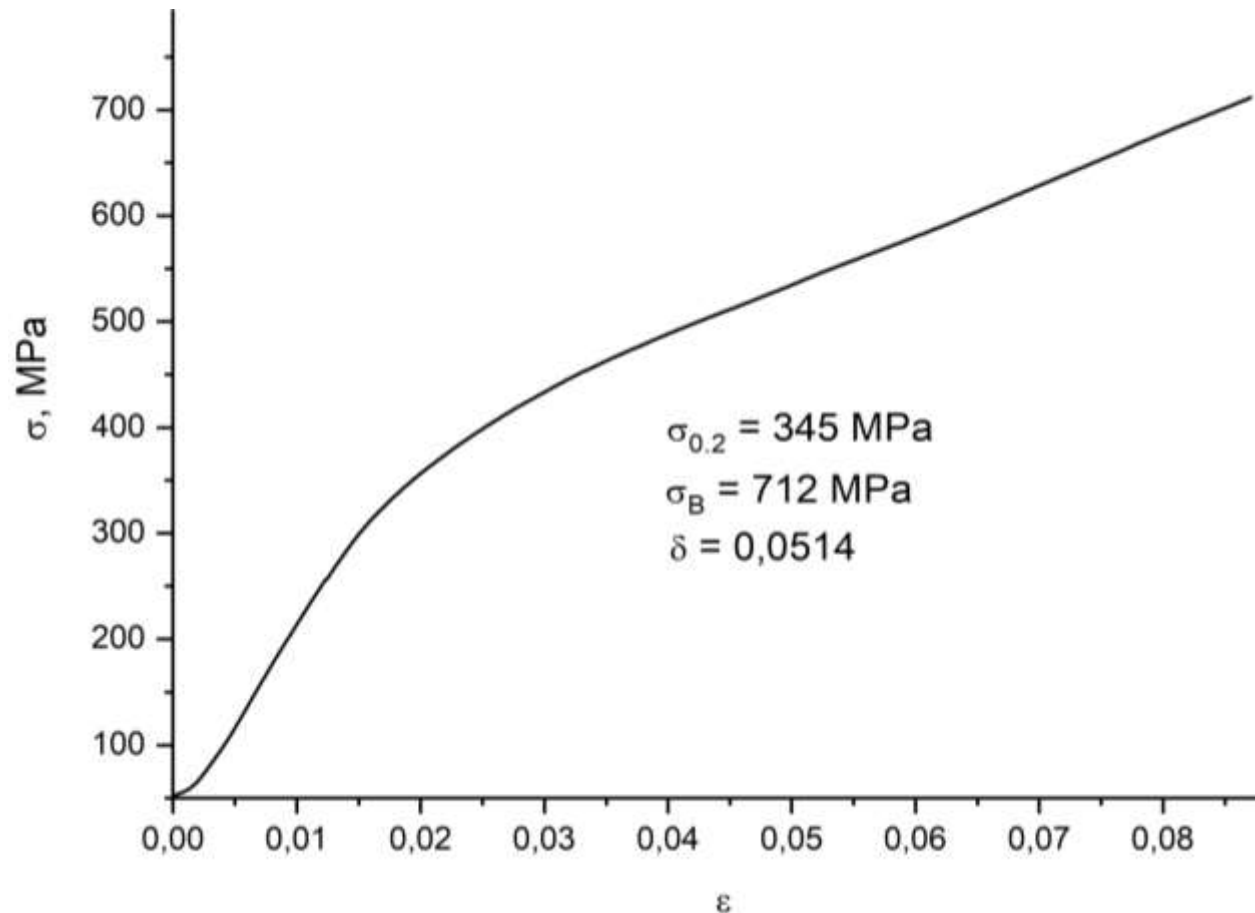
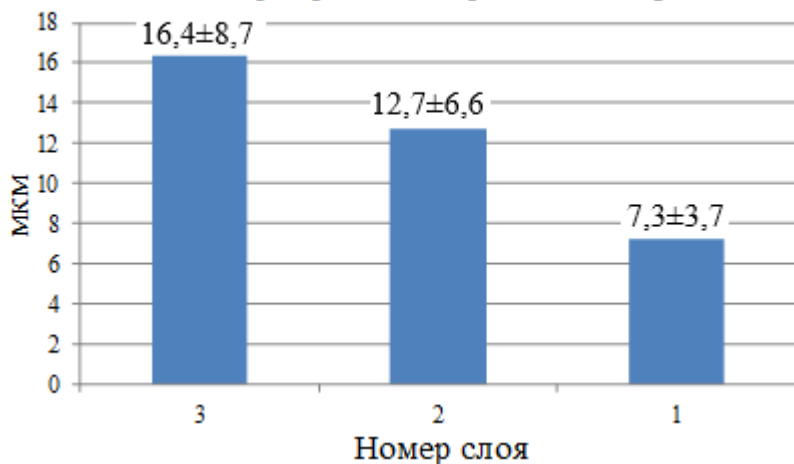
в – поперечное направление, г – продольное направление

Структура и механические свойства изделий напечатанных на 3D-принтере

Размер зерен в продольном шлифе



Размер зерен в поперечном шлифе



Результаты были апробированы на:

1. Всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении». **Получен диплом II степени.**

2. Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении».

3. Конкурсе «Инновационные проекты в сфере машиностроения». **Получен диплом II степени.**



ДИПЛОМ

II степени

награждается

Турсунов Искандар Фарходович,

студента гр. 10А72, ЮТИ ТПУ (Юрга)

*за доклад «Аддитивные технологии в сварочном
производстве»*

на секции «Современные промышленные технологии»

XII Всероссийской научно-практической

конференции для студентов и учащейся молодежи

«Прогрессивные технологии экономика в машиностроении»,

8 – 10 апреля 2021 года.

Научный руководитель: Кузнецов М.А., ст. преподаватель,

к.т.н., (ЮТИ ТПУ) Юрга

ЧИНАХОВ
Дмитрий Анатольевич
Директор
Юргинского технологического института
Томского политехнического университета



- На основе проведенного литературного обзора современного состояния исследовательских работ в области аддитивного производства, одной из перспективных технологий получения металлических изделий являются дуговые методы плавления присадочной проволоки (GMAW и GTAW). Актуальность данного метода заключается в:
 - низкой себестоимости наплавочных материалов;
 - реализации на стандартном оборудовании (роботизированные комплексы, автоматические установки);
 - высокой производительности процесса;
 - эффективном использовании наплавочных материалов (минимальные потери).
- Спроектирован, разработан, изготовлен и апробирован в лабораторных условиях 3d-принтер для электродугового послойного выращивания.
- Установлена возможность получения, на заданных режимах выращивания (сила тока, напряжение, скорость наплавки) и диаметром наплавляемого материала 1 мм бездефектных корпусных конструкций толщиной 3-8 мм.
- Определено, что при электродуговом послойном выращивании стенки изделий имеют градиентное строение. Дендритную структуру имеет только последний наплавленный слой. Нижележащие слои подвергаются вторичной термообработке за счет тепловыделения верхнего слоя. В результате этого размер зерна уменьшается с глубиной до 10 мкм. Происходит измельчение размеров зерен от 4 к 1 слою. Средний размер зерен уменьшается в 2,2 в поперечном сечении с 16,4 мкм до 7,3 мкм, в 1,9 раза в продольном сечении с 18,4 мкм до 9,6 мкм.
- Результаты механических испытаний показали, что образцы имели в среднем предел прочности при растяжении 708-716 МПа, предел текучести 341-349 МПа и относительное удлинение 5,10-5,18%. Данные значения сопоставимы с механическими свойствами сталей по ГОСТ 6713-91 (предел прочности 685-700 МПа, предел текучести 335-345 МПа) и по ГОСТ 1050-88 (предел прочности 660-680 МПа, предел текучести 350-370 МПа).

Спасибо за внимание!