

Школа **Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности**  
 Направление подготовки **15.04.01 Машиностроение**  
 Отделение **электронной инженерии**

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Повышение эффективности аддитивного электродугового процесса за счёт импульсного управления</b>

УДК 621.791.927.5.01

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ91	Болтрушевич Александр Евгеньевич		

Руководитель ВКР

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю.М.	д.т.н., профессор		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Наталинова Н.М.	к.т.н., доцент		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

## Планируемые результаты освоения ООП

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

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

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

Школа **Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности**  
 Направление подготовки **15.04.01 Машиностроение**  
 Отделение **электронной инженерии**

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ А.С. Киселев  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
1ВМ91	Болтрушевич Александр Евгеньевич

Тема работы:

<b>Повышение эффективности аддитивного электродугового процесса за счёт импульсного управления</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	22-74/с от 22.01.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	22.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><b>Процесс наплавки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона импульсным режимом питания</b></p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литературный обзор</li> <li>2. Анализ влияния методов дуговой наплавки на влияние структуры и геометрии изделия</li> <li>3. Разработка способа наплавки тел вращения вольфрамовым электродом в среде аргона, горящим в импульсном режиме</li> <li>4. Разработка импульсной системы питания</li> <li>5. Экспериментальная часть</li> <li>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</li> <li>7. Социальная ответственность</li> <li>8. Заключение</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Функциональная схема БАРС-2</li> <li>2. Принципиальная схема АРНД</li> <li>3. Функциональная схема импульсной системы питания</li> <li>4. Силовая часть импульсной системы питания</li> <li>5. Принципиальная схема датчика напряжения</li> <li>6. Схема управления сварочным циклом</li> <li>7. Экспериментальная часть</li> <li>8. Экспериментальный стенд</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p style="text-align: center;"><b>1-4</b></p>	<p style="text-align: center;">Гордынец А.С.</p>
<p style="text-align: center;"><b>5</b></p>	<p style="text-align: center;">Гасанов М.А.</p>
<p style="text-align: center;"><b>6</b></p>	<p style="text-align: center;">Федорчук Ю.М.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Реферат</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>1. Литературный обзор</b></p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p style="text-align: center;">05.02.2021</p>
--	---

**Задание выдал руководитель:**

<p style="text-align: center;">Должность</p>	<p style="text-align: center;">ФИО</p>	<p style="text-align: center;">Ученая степень, звание</p>	<p style="text-align: center;">Подпись</p>	<p style="text-align: center;">Дата</p>
<p style="text-align: center;">Доцент</p>	<p style="text-align: center;">Гордынец А.С.</p>	<p style="text-align: center;">к.т.н., доцент</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

<p style="text-align: center;">Группа</p>	<p style="text-align: center;">ФИО</p>	<p style="text-align: center;">Подпись</p>	<p style="text-align: center;">Дата</p>
<p style="text-align: center;">1ВМ91</p>	<p style="text-align: center;">Болтрушевич Александр Евгеньевич</p>		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ВМ91	Болтрушевич Александр Евгеньевич

<b>Школа</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>
Уровень образования Магистратура	Направление/специальность 15.04.01 «Машиностроение»

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

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

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

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

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

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

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Гасанов М.А.	д.э.н., профессор		28.02.2021

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1ВМ91	Болтрушевич Александр Евгеньевич		28.02.2021

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1ВМ91	Болтрушевич Александр Евгеньевич

<b>Школа</b>	ИШНКБ	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Электронной инженерии
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление / специальность</b>	15.04.01 «Машиностроение»
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: Тема дипломной работы: «Повышение эффективности аддитивного электродугового процесса за счёт импульсного управления»			

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Лаборатория находится в 16-ом уч. корпусе, в кабинете номер 112 оборудована холодной и горячей водой, сливом, вентиляцией, вытяжным шкафом, письменным столом, оргтехникой</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>	<p><b>Вредные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Недостаточная освещенность;</li> <li>– Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры;</li> <li>– Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</li> <li>– Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</li> <li>– Наличие токсикантов, ПДК, класс опасности, СКЗ, СИЗ;</li> </ul> <p><b>Опасные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R<sub>заземления</sub>, СКЗ, СИЗ; Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ;</li> </ul> <p>Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.</p>

<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, вторцвет- и чермет, абразивная пыль, перегоревшие люминесцентные лампы) и способы их утилизации;</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Рассмотрены 2 ситуации ЧС:</p> <p>1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте);</p> <p>2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.</p>
<p><b>4. Перечень нормативно-технической документации, использованной в разделе «СО».</b></p>	<p>Приведены перечень НТД, используемых в данном разделе, схема эвакуации при пожаре, схема размещения светильников на потолке согласно проведенному расчету.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.21 г.
--	-------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю.М.	Д.Т.Н., профессор		26.05.21 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1ВМ91	Болтрушевич Александр Евгеньевич		26.05.21 г.

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

Школа **Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности**  
 Направление подготовки **15.04.01 Машиностроение**  
 Уровень образования **магистратура**  
 Отделение **электронной инженерии**  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

**магистерская диссертация**

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	22.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2021	Сбор литературных данных	5
31.03.2021	Анализ влияния методов дуговой наплавки на влияние структуры и геометрии изделия	10
09.04.2021	Разработка способа наплавки тел вращения вольфрамовым электродом в среде аргона, горящим в импульсном режиме	10
15.04.2021	Разработка импульсной системы питания	15
30.04.2021	Экспериментальная часть	20
24.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
31.05.2021	Социальная ответственность	10
02.06.2021	Английский язык	10
04.06.2021	Заключение	5
06.06.2021	Презентация	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

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

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

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

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 128 с., 20 рис., 19 табл., 19 источников.

Ключевые слова: аддитивные технологии, импульсное питание, сварочная ванна, послойное выращивание, аргонодуговая сварка, сильноточная дуга.

Объектом исследования является: процесс сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне.

Предмет исследования – разработка процесса аддитивной наплавки изделия неплавящимся электродом с присадкой.

Цель работы – разработка процесса аддитивной наплавки в импульсном режиме.

В процессе исследования проводились анализ тепловложения в область анода в процессе сварки, способов сварки неплавящимся электродом с применением импульсного питания сварочной дуги и влияния катодной струи на структуру анода.

В результате исследования разработан способ сварки дугой, горячей в импульсном режиме, режим импульсной модуляции и оборудование, обеспечивающее его реализацию, разработано устройство для автоматического регулирования дуги.

Основные конструктивные, технологические и техникоэксплуатационные характеристики: простое в изготовлении и эксплуатации оборудование, имеющий высокую надежность и широкий диапазон регулирования сварочных параметров, обеспечивающее в автоматическом режиме непрерывное послойное формирование изделия.

Область применения: данный способ сварки может применяться в разных отраслях: нефтяной, газовой промышленности и кораблестроении.

В будущем планируется минимизировать конструкцию сварочного аппарата, а также запатентовать данный способ сварки.

## Определения, сокращения и нормативные ссылки

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

Аддитивная наплавка – специализированный способ наплавки, при котором наплавленный слой является формообразующим, а последующие слои наплавляются непосредственно на нижележащий.

Сварочная ванна – слой расплавленного металла на поверхности свариваемых изделий, образующихся в процессе сварки.

Импульсное питание – подача импульсов с высокой величиной тока и частотой.

Области анодного и катодного падения – области в которых имеет место увеличение напряженности поля.

В данной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы»

2. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация»

3. ГОСТ 12.1.012–2004 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования»

4. ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»

5. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий" (с изменениями на 15 марта 2010 года)»

6. СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»

7. СН 2.2.4/2.1.8.566–96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы»
8. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*»
9. СанПиН 2.2.2.540-96 «Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ»
10. ГОСТ 12.1.005–88 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1)»
11. ГОСТ 12.1.035–81 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование для дуговой и контактной электросварки. Допустимые уровни шума и методы измерений»
12. СНиП 23-05-2010 «Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1)»
13. ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»
14. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014)
15. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681
16. ГОСТ 12.3.003-86 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Работы электросварочные. Требования безопасности (с Изменением N 1)»
17. ТКП 181-2009 «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей»
18. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»
19. ГОСТ 12.4.021-75 «Системы вентиляционные. Общие требования»
20. СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»
21. ГОСТ Р 51057-2001 «Огнетушители переносные»

В настоящей работе использованы следующие сокращения:

АРНД – система автоматического регулирования напряжения дуги;

БАРС – система блоков автоматического регулирования процессом сварки;

$G_v$  – масса сварочной ванны;

$I_d$  – ток дуги;

$U_d$  – напряжение на дуге;

$I_{св}$  – сварочный ток;

$T_i$  – период следования тепловых импульсов за счет тока;

$t_i$  – полная длительность импульса;

$t_c$  – время паузы;

$H$  – глубина сварочной ванны;

$B$  – ширина сварочной ванны;

$L$  – длина сварочной ванны;

$V$  – объем сварочной ванны;

$V_{св}$  – скорость сварки.

$V_{пэл}$  – скорость подачи электродной проволоки

$\alpha_r$  – коэффициент расплавления

$\psi_p$  – коэффициент потерь

$\psi_f$  – коэффициент формы провара

## Оглавление

Введение.....	17
1 Обзор литературы .....	19
1.1 Методология аддитивного производства с использованием дуги в качестве энергетического источника .....	19
1.2 Методы послойного выращивания.....	20
1.3 Проблемы аддитивного выращивания с использованием дуги в качестве энергетического источника .....	21
1.4 Достижения в технологии дугового послойного выращивания .....	24
1.5 Материалы, используемые в аддитивном выращивании с использованием дуги в качестве источника теплоты.....	26
Вывод по первой главе: .....	28
2 Обоснование способа наплавки для аддитивного производства .....	30
2.1 Наплавка неплавящимся электродом в среде защитных газов .....	30
2.2 Основные характеристики процесса .....	32
2.3 Требования к процессу .....	35
2.4 Выбор параметров режима.....	36
2.5 Разработка способа наплавки диска на подложку в виде трубы .....	44
3 Разработка экспериментальной установки.....	47
3.1 Общий вид экспериментальной установки .....	47
3.2 Система блоков автоматического регулирования процессом сварки «БАРС-2» .....	47
3.3 Описание сварочной головки .....	49
3.4 Схема обратной связи.....	51
4 Разработка импульсной системы питания.....	54
4.1 Функциональная схема.....	54
4.2 Схема силовой части.....	56
4.3 Схема обратной связи.....	58
4.4 Схема управления сварочным циклом .....	59
5 Эксперимент и его результаты .....	66
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	69

6.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	69
6.2 Анализ конкурентных технических решений.....	70
6.3 SWOT – анализ .....	71
6.4 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований .....	72
6.5 Планирование научно-исследовательских работ .....	73
6.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ..	83
7 Социальная ответственность .....	86
7.1 Анализ выявленных вредных факторов .....	87
7.2 Электромагнитные поля в производственных помещениях .....	87
7.3 Производственный шум .....	90
7.4 Освещённость рабочей зоны.....	91
7.5 Микроклимат в помещении .....	96
7.6 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды .....	98
7.7 Охрана окружающей среды .....	106
7.8 Защита в ЧС .....	107
Заключение .....	110
Список использованных источников .....	113
Приложение I (справочное) Improving the efficiency of the additive electric arc process due to pulse control .....	115

## **Введение**

Использование дуги как источник тепла в аддитивном производстве является наиболее перспективным выбором, так как это может повысить производительность процесса и качество получаемых деталей, при этом снизить затраты на оборудование и расходные материалы.

Для изготовления деталей сложных геометрических форм, либо сложного состава становится выгоднее использовать аддитивное производство. Перспективным направлением считается развитие лазерных технологий с использованием металлпорошковых материалов. Данный способ позволяет получать детали с высокой точностью и минимальным отходом материала. Этим способом без особой сложности возможно получать детали сложной геометрии, при этом разработка аддитивного процесса занимает меньшее время и трудоёмкость.

Несмотря на достоинства лазерной наплавки существует ряд недостатков, связанных с производительностью, качеством получаемых деталей, дороговизной оборудования и материалов. Существуют методы увеличения эффективности, которые в той или иной степени повышают производительность и улучшают процесс, но имеются существенные трудности в их практическом применении. В частности, их применение затруднительно при наплавке проволоки лазерным лучом, так как возникают вопросы, связанные с различными технологическими задачами, направленными на получение качественной геометрии детали.

Исследованиями по изучению аддитивных технологий с использованием дуги в качестве тепла занимались Трушников Д.Н., Щицын Ю.Д., Белинин Д.С. и т.д. В их работах показана целесообразность применения в качестве источника нагрева дуги и проволоки в качестве присадочного материала.

Объектом исследования является: процесс сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне.

Предмет исследования – разработка процесса аддитивной наплавки изделия неплавящимся электродом в импульсном режиме.

Научная новизна исследования состоит в том, что в работе применён способ сварки в импульсном режиме с автоматическим переходом от слоя к слою за счёт автоматического регулятора напряжения дуги.

Практическая значимость полученных результатов состоит в использовании передовых технологий, с помощью которых можно добиться снижения затрат на производство и повысить качество продукции.

Целью данной работы будет являться разработка процесса аддитивной наплавки неплавящимся электродом в импульсном режиме и технических средств реализации. Для достижения поставленной цели в выпускной квалификационной работе поставлены следующие задачи:

- произвести анализ современного состояния методов аддитивных процессов и обосновать выбор электродуговой наплавки,
- разработать аддитивный процесс наплавки в импульсном режиме,
- разработать модель сварочной ванны,
- предложить параметры сварки,
- разработать специальную установку,
- провести экспериментальную проверку.

## **1 Обзор литературы**

### **1.1 Методология аддитивного производства с использованием дуги в качестве энергетического источника**

Технология аддитивного производства с высокой скоростью наплавки WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), позволяет производить металлические компоненты слой за слоем из различных сплавов, обеспечивая высокие механические характеристики. Для облегчения автоматизированного производства различных типов компонентов с помощью технологии WAAM применяют специализированные машины с системами контроля и управления.

Суть аддитивного производства – альтернатива промышленной механической обработке для производства деталей. В основном это детали сложной формы [1].

На данный момент при разработке технологии изготовления детали используют следующие этапы. Для начала выбирается наиболее подходящая технология сварки и подбираются параметры для четырех различных металлических сплавов. Параметры подбирают, опираясь на опыт сварки каждого типа металла. Металл подбирают исходя из необходимых механических свойств. В связи с непредсказуемостью поведения жидкой фазы при выращивании используют несколько марок материала, чтобы определить наиболее удачный для данной конструкции.

Затем для каждого из четырех металлических сплавов изготавливают характеристическую стенку для металлографических и механических характеристик.

Далее делают выводы пригоден ли материал для послойного выращивания и начинается разработка технологии изготовления.

Траектория движения сварочной головки определяются так, чтобы требовалось наименьшее количество материала для изготовления. Затем анализируются несколько аспектов - время производства, скорость осаждения,

коэффициент полезного действия материала для каждого компонента, связывая их со свойствами, полученными в каждом сплаве.

## **1.2 Методы послойного выращивания**

Любая модель, производимая аддитивным методом, использует послойное формирование, т.е. для построения последующего слоя надо нанести предыдущий. На этом этапе возникает ряд проблем, связанных либо с тем, что каждый новый слой может обрушиться из-за отсутствия опоры или недостаточного притяжения к поверхности, либо с вводимым теплом, которое может оплавить стенки [2].

Решая эти проблемы, было разработано много технологий, позволяющих беспрепятственно возводить трехмерные объекты. Все разработанные способы разделяют на две группы, это *bed deposition* и *direct deposition*.

Аддитивные технологии подразумевают под собой процесс послойного нанесения жидкого присадочного материала на подложку или готовую деталь, в том случае если первая часть детали изготавливается на предыдущей технологической операции. Нанесение материала происходит через присадочную головку, которая в зависимости от функционала может либо просто перемещаться по плоскостям, либо дополнительно вращаться, чтобы изменять угол нанесения материала. С каждым слоем головка поднимается относительно стола на величину равную толщине нанесенного слоя. Алгоритм движения головки задаётся с помощью специализированного программного обеспечения, исходя из CAD модели возводимой детали [3].

Таким образом аддитивные технологии подразумевают под собой изготовление детали методом послойного выращивания исходного материала, в отличие от традиционного метода, в котором формирование детали происходит за счёт удаления материала из заготовки.

Так как образование детали происходит послойным наращиванием, все технологические операции можно описать одной CAD–моделью. Это требует меньших временных затрат по сравнению с традиционной документацией, где каждый технологический переход нужно описывать параметрами и режимами обработки.

Развитие технологии объясняется большим спросом во многих сферах начиная от кондитерских изделий и заканчивая высокотехнологическими деталями атомной и космической промышленности, поэтому особое внимание уделяется развитию технологий непосредственного выращивания из металла.

Для производства деталей посредством выращивания из металла необходимо опираться на передовые знания по металлургии, электронике, механике, лазерной технике, а также сварке.

### **1.3 Проблемы аддитивного выращивания с использованием дуги в качестве энергетического источника**

В классических производственных технологиях, таких как отливка,ковка, фрезерование и т.д., изготовление очень сложных деталей по индивидуальному заказу ограничено из-за их высокой стоимости. В последние годы аддитивное производство геометрически сложных компонентов вызвало большой интерес в различных отраслях промышленности. В отличие от методов субтрактивного производства, эта технология объединяет материалы слой за слоем для создания физического объекта из исходной 3D-модели [4]. Прототипы АМ начали появляться в 1980-х, и в настоящее время существуют различные технологии АМ, которые потребляют небольшое количество сырья для изготовления деталей из самых разных материалов, включая полимеры, металлы, керамику и т. д. [5].

Технология WAAM восходит к 1925 году, когда американский учёный Р.Р. Бейкер [6] впервые предложил использовать электрическую дугу в качестве источника тепла для плавления проволочного материала для

производства декоративных предметов. С момента своего зарождения технология обильно развивалась, особенно в последние пятнадцать лет, и превратилась в то, что сегодня известно, как WAAM. В настоящее время этот производственный процесс представляет особый интерес, учитывая, что детали практически неограниченного размера могут быть изготовлены с помощью этого метода из самых разных материалов, таких как сталь, алюминий, никелевые сплавы и титан, а также полимеры и композиты [7]. Наряду с другими процессами аддитивного производства, его основными преимуществами являются высокие скорости наплавки ((1-10) кг/ч, в зависимости от материала и процесса [8]), дешевое оборудование и материалы, широкий выбор поставщиков оборудования и то, что это экологически безопасный процесс. Недостатками является то, что поверхность после процесса наплавки WAAM, обычно требует операций механической обработки, это является одним из его основных недостатков.

Система WAAM состоит из кинематической платформы, источника питания, автоматической системы подачи проволоки и некоторых аксессуаров, таких как системы мониторинга и управления [9]. По сути, источник питания в этом процессе создает электрическую дугу между сварочной горелкой и подложкой, которая плавит проволоку, подаваемую через механизм подачи проволоки. Кинематическая платформа, обычно порталная машина, наносит расплавленный материал с большой точностью послойно для получения заданной геометрической формы [10].

В зависимости от типа источника энергии можно выделить три типа процессов WAAM:

- сварка плавящимся электродом в среде защитных газов (GMAW),
- сварка вольфрамовым электродом в среде защитных газов (GTAW),
- плазменно-дуговая сварка (PAW) [11].

Проще говоря, как показано на рисунке 1.1, в процессе GMAW используется подача проволоки с обтеканием её дугой (коаксиальная

подача). Процессы GTAW и PAW имеют некоаксиальную систему подачи проволоки и неплавящийся вольфрамовый электрод [12]. Основным преимуществом процесса WAAM на основе GMAW является его скорость плавления, которая в 2–3 раза выше, чем при использовании PAW. Однако процесс GMAW менее стабилен, поскольку электрический ток воздействует непосредственно на сырье. Эта характеристика может привести к разбрызгиванию и чрезмерному нагреву, что ухудшит механические свойства наплавленных материалов.

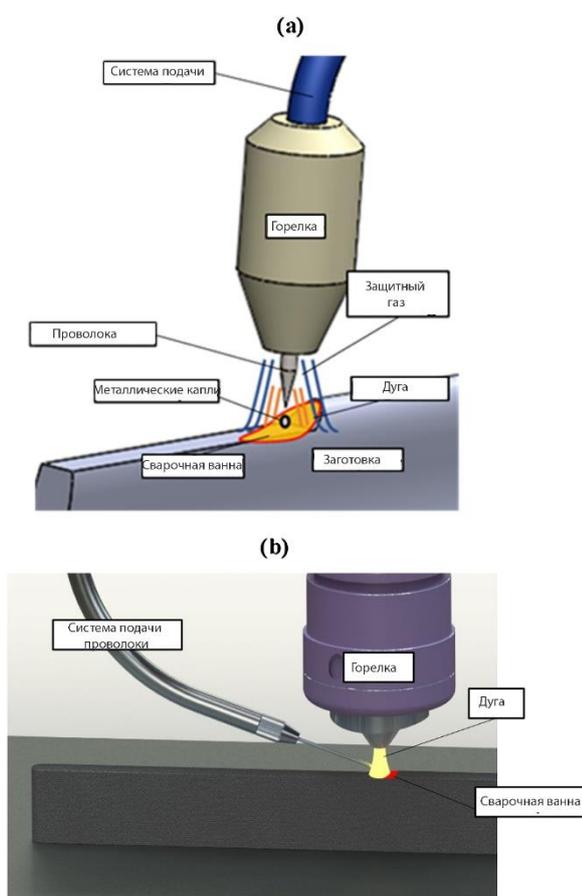


Рисунок 1.1 – Графическое изображение: (а) процесса сварки неплавящимся электродом (GTAW) и (б) процесс плазменно-дуговой сварки (PAW)

В процессе WAAM термические циклы внутри затвердевшего металла и подложки, вызванные послойным выращиванием электрической дуги, означают, что необходимо время для охлаждения между проходами производимой детали [13]. В соответствии с тепловыделением каждого прохода потребуется определенное время охлаждения между проходами,

чтобы компонент не разрушился и эффект накопления тепла был минимальным [14]. Этот период времени также влияет на общее время производства, состоящее из времени охлаждения и времени перемещения, что, в конечном итоге, влияет на общую производительность.

Кроме того, существует множество исследователей, которые обращают внимание на важность мониторинга, ориентированного на процессы аддитивного производства. Результаты многообещающие, начиная от подходов, ориентированных на одну проблему, например, тепловыделение, или от подходов, ориентированных на обработку крупномасштабных данных.

Наконец, следует отметить, что другим процессам аддитивного производства уделялось больше внимания, чем WAAM. Следовательно, несмотря на значительные достижения технологии, которые демонстрируют ее огромный потенциал для предложения полного технологического решения, помимо самого станка окончательной обработки поверхности, возникают проблемы с программным моделированием, мониторингом процесса, проверкой деталей и повышением производительности.

#### **1.4 Достижения в технологии дугового послойного выращивания**

Ключевой вектор развития аддитивных технологий – возможность формирования металлических изделий посредством расплавления присадочной проволоки. Данная технология позволит улучшить показатели производительности и качества получаемых деталей. В сравнении с лазерным источником тепла появляется возможность использовать большее количество наплавляемых материалов и сплавов за меньшую стоимость, так как производство порошков гораздо дороже производства проволоки [15]. Аддитивное производство плавящимся электродом имеет огромный потенциал, который на данный момент раскрыт в меньшей мере.

Для повышения производительности аддитивного процесса предложены многие решения, в том числе и электроннолучевая наплавка в

вакууме. Данный метод позволяет использовать большое количество материалов, включая титан, алюминий, цирконий и их сплавы. Основным недостатком таких систем является использование высоковольтных источников напряжения. Они используются для питания электроннолучевой пушки и имеют внушительную стоимость также, как и камеры для откачки воздуха для достижения глубокого вакуума. Следующая проблема касается охраны труда. Так как в ходе работы электроннолучевой пушки при взаимодействии луча с деталью возникает тормозное рентгеновское излучение, которое негативно воздействует на персонал. Возникает необходимость использовать специальные средства защиты. Это значительно усложняет эксплуатацию установок.

Использование более простых, доступных во всех отраслях промышленности установок, имеющих меньшую стоимость, большую мобильность, универсальность и простоту использования позволит внедрить аддитивное производство в промышленность. В свою очередь это уменьшит расходы на производство за счёт снижения отходов. Для выполнения этих задач лучше всего подойдет использование электрической дуги в качестве источника тепла.

Основная проблема дуговых разрядов – не полная контролируемость и непредсказуемость поведения дуги. Потоки электромагнитных полей, постоянное движение и изменение химического состава, фаз сварочной ванны, изменение теплофизических свойств металла сильно усложняют моделирование поведения дуги.

На данный момент существуют исследования по поведению дуги, в том числе и при послойном выращивании, но пока что всё безуспешно [16].

При успешном наплавлении слоёв возникает вопрос о фазовом составе металла. Можно предположить, что структура для низкоуглеродистой стали будет как при отжиге для нижних слоёв и закалка для верхних слоёв. Грубо говоря как при сварке в зоне термического влияния только не в стороны, а по слоям вниз.

## 1.5 Материалы, использующиеся в аддитивном выращивании с использованием дуги в качестве источника теплоты

При выборе материала для создания детали в первую очередь стоит обратить внимание на то, как металл или смесь металлов реагирует на термическое воздействие и как изменяются его физические свойства, влияющие на стабильность нанесения слоя.

Далее исходя из необходимых механических свойств подбирают группу металлов и проводят ряд экспериментов. Как только металл даёт нужный результат по наплавке, его начинают использовать.

Если разобрать наиболее популярных машины для послойного синтеза, можно определить какие металлопорошковые композиты используются и с какими параметрами возможно производить наплавку. Данные приведены в таблице 1.1.

Анализируя таблицу, можно сказать, что используют титан и его сплавы, алюминий и его сплавы железо, никель и драг металлы. Но использование аустенитных никель-хромовых сталей инконель и нержавеющей сталей занимает лидирующую позицию.

По сравнению с алюминиевыми, титановыми и другими сплавами с коррозионными свойствами, нержавеющая сталь является более доступным вариантом. Она может использоваться для печати водостойких деталей высокой прочности и плотности. Она может быть использована в экстремальной среде, такой как реактивные двигатели самолетов и ракет [17].  
Таблица 1.1 – Металлы и сплавы, наплавляемые методом bed deposition [17]

Модель	Шаг построения, мкм	Скорость построения, см <sup>3</sup> /ч	Модельные материалы
Concept Laser	20-80	2-10	03X17H14M3, 09X17H7Ю1, 4X5MФ1С, Ti, Al, Co-Cr, Inconel, Cu, Au, Pt.
EOS	20-60	10-20	03X17H14M3, Al, Fe, Co-Cr, Ni, Ti, Inconel.

Продолжение таблицы 1.1

Модель	Шаг построения, мкм	Скорость построения, см <sup>3</sup> /ч	Модельные материалы
Concept Laser	20-80	2-10	03X17H14M3, 09X17H7Ю1, 4X5MФ1С, Ti, Al, Co-Cr, Inconel, Cu, Au, Pt.
EOS	20-60	10-20	03X17H14M3, Al, Fe, Co-Cr, Ni, Ti, Inconel.
SLM Solution	20-40	10-15	03X17H14M3, 4X5MФ1С, Ti, Al, Co-Cr, Inconel, Au.
Realiser	20-50	5-10	03X17H14M3, Ti, BT-6, Al, 4X5MФ1С, Co-Cr, Inconel.
Renishaw	20-100	5-20	03X17H14M3, 09X17H7Ю1, 4X5MФ1С, Ti, Al, Co-Cr, Inconel
Arcam	50-200	55-80	Ti, Co-Cr, Inconel.
3D sestems	10-100	1-15	Inconel, керамика.
ExOne	50 и более	1780	03X17H14M3 с бронзой, 40X13 с бронзой.
Matsuura	20	-	4X5MФ1С

Детали из нержавеющей стали изготавливаются на 3D принтере либо путем непосредственного нанесения металла, либо используя композитный материал со связывающим веществом. Детали можно покрывать другими металлами для изменения внешнего вида или свойств поверхности.

Распространенными нержавеющей стали, используемыми в аддитивном производстве, являются 17-4PH (08X18H5Д5Б), 15-5-PH (08X15H5Д4), ASM 316L (03X16H15M3) и 304L (03X18H11).

С точки зрения технологических показателей производства порошков, перспективу стоит отдать титану. При их производстве поверхность частичек приближена к сферической форме. Порошок титана менее загрязнен примесями по сравнению с остальными, а также имеет большую плотность, что повышает качество порошка и улучшает морфологию.

Расширяют область применения металлопорошковые композиции, использующиеся в группе direct deposition. Данные приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Металлы и сплавы, наплавляемые методом direct deposition [17]

Модель	Толщина слоя, мм	Скорость построения, см <sup>3</sup> /ч	Модельные материалы
Optomec	0,3-1	до 80	BT6, 4X5MΦ1C, X6BΦ, 3X3M3Φ, 08X18H10, 03X16H15M3, 40X13, 09X17H7Ю1, инконель, 0X15H65M16B, Cu, Al, Co-Cr.
POM	0,2-1,2	20-150	4X5MΦ1C, 3X3M3Φ, 16Г2АФ, 03X16H15M3,
Irepa laser	0,1-1,2	0,5-80	BT6, 4X5MΦ1C, X6BΦ, 3X3M3Φ, 08X18H10, 03X16H15M3.
Insstek	-	-	40X13, 09X17H7Ю1, инконель, 0X15H65M16B, Cu, Al, Co-Cr.
Sciaky	-	-	03X16H15M3, Ti, Al, Ni, инконель.

Для технологии WAAM используются схожие с порошками методы. Ключевой задачей до начала производства WAAM является определение параметров, необходимых для производства приемлемых трехмерных деталей из каждого материала. Изначально слои с заданными характеристиками изготавливаются путем соединения материала слой за слоем с целью создания геометрически и механически функциональных элементов. В этих слоях подходящие параметры процесса для каждого материала регулируются после геометрического контроля каждого слоя и анализа окончательной микроструктуры. Таким образом, можно создать базу данных для автоматического производства деталей из различных материалов. Кроме того, эти стенки используются для извлечения испытуемых образцов для определения механических характеристик. После определения характеристик стен и определения производственных параметров окончательные детали.

Вывод по первой главе.

На основании описанной информации можно сделать вывод что использование в качестве источника тепла лазера даёт достаточно широкий выбор материала, имеет высокую точность и неограниченную возможность геометрии процесса. Однако этот процесс крайне непроизводителен, имеет привязанность к порошковым материалам и низкое качество деталей по

сравнению с дуговыми процессами. Помимо этого само оборудование является дорогостоящим.

Применение в качестве источника тепла сварочной дуги, позволяет повысить параметры качества и производительности. Так же дуговая наплавка подразумевает использование проволоки, которая гораздо дешевле порошка. Оборудование для дугового аддитивного производства дешевле аналогичного оборудования для лазерного аддитивного производства.

Анализ показал, что дуговой аддитивный процесс является наиболее перспективным.

## **2 Обоснование способа наплавки для аддитивного производства**

### **2.1 Наплавка неплавящимся электродом в среде защитных газов**

На основании проведённого анализа выбран процесс сварки неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки.

Для получения качественного корневого слоя и сварного соединения в целом, необходимо вводить тепловой поток в импульсном режиме с целью уменьшения объема сварочной ванны.

Использование способа сварки неплавящимся электродом взамен полуавтоматической плавящимся электродом имеет большой потенциал. В отличие от альтернативного метода процесс аргодуговой сварки вольфрамовым электродом не имеет разбрызгивания металла в ходе наплавки. Это объясняется тем, что процесс наплавки проходит на меньшем токе сварки и напряжении, а дуга горит отдельно от вводимого в сварочную ванну материала. Меньше разбрызгивание позволяет увеличить коэффициент наплавки, что в свою очередь уменьшает потери дорогостоящего материала. Так же снижается вероятность забраковать поверхность, на которую наплавляется объект (в случае если подложка является частью бедующей детали); за счет меньших тепловложений снижается риск оплавить стенку предыдущих слоёв и, соответственно, упрощается подбор параметров режима наплавки.

Малые тепловложения при аргодуговой наплавке напрямую влияют на качество и возможные размеры детали. В первую очередь это касается минимальной толщины стенки. Правильный подбор сварочного тока, напряжения и скорости сварки позволит иметь ванне минимальный объем, что в свою очередь позволит получить тонкие стенки наплавки.

Наибольшей толщины стенки можно добиться за счёт колебания сварочной головки в оси, перпендикулярной оси движения электрода. Для данной технологии возможно получение толстостенных деталей, однако

данный способ будет уступать способу полуавтоматической сварке плавящимся электродом по производительности.

Возможны варианты с переходящей толщиной стенки, например с широким основанием и тонкой серединой или наоборот, при чем в варианте, когда меньшая толщина переходит в большую процент расширения последующего слоя невелик и зависит от текучести металла, вида сварочной ванны и толщины слоя на который идет наплавка.

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом это процесс с высокой степенью защиты сварочной ванны. Это говорит о хорошей свариваемости активных металлов и их сплавов.

Само по себе аддитивное производство это дорогостоящий процесс и использование в нем недорогих металлов актуально только при невозможности произвести их альтернативными методами. Когда цена металла или сплава достигает определённого порога, встаёт вопрос о использовании аддитивного производства.

Предрасположенность сварки неплавящимся электродом к цветным металлам и их сплавам определяет её роль в аддитивном производстве. Этот процесс позволит получать качественные детали с высокими физическими свойствами нужного состава.

Использование порошковых проволок или сплетений из проволок в качестве присадки при аргонодуговой наплавке имеет огромное преимущество перед используемыми порошковыми присадками лазерных методов. Во-первых, это дешевизна производства в несколько раз; во-вторых, меньшее количество отходов в процессе наплавки; так же порошки имеют загрязнения в виде окислов по границам крупы и инородных тел внутри порошка, чего гораздо меньше в порошковых проволоках и почти нету в сплетениях из проволок. Помимо перечисленных преимуществ получить в сплетении проволок состав для наплавки сложного сплава гораздо легче, чем перемешивать порошки.

## 2.2 Основные характеристики процесса

При сварке в защитной среде аргона вольфрамовым электродом процесс можно представить в следующем виде: дуга, горящая в атмосфере аргона между вольфрамовым катодом и неиспаряющейся охлаждаемой металлической поверхностью, являющейся анодом. Схема показана на рисунке 2.1.

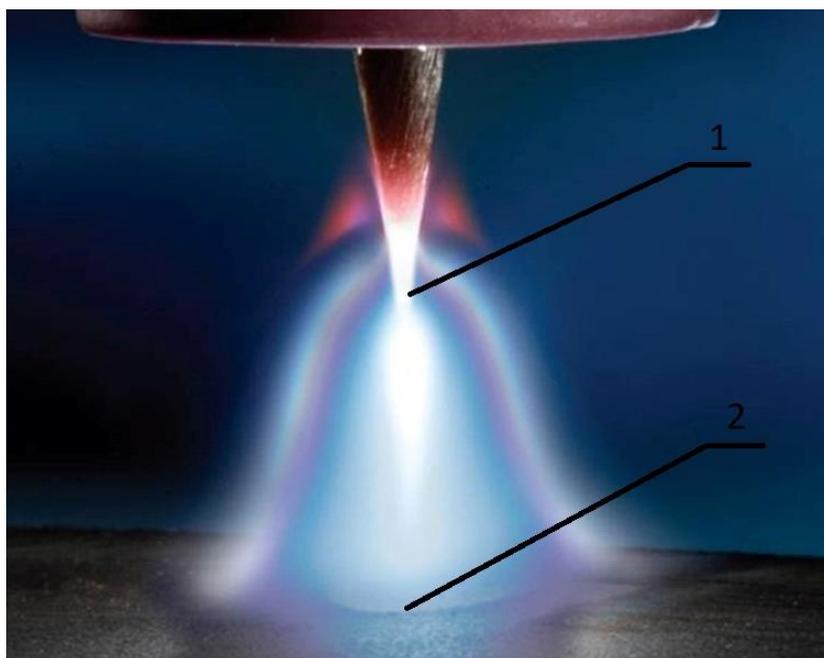


Рисунок 2.1 – Дуга, горящая в среде аргона [18], 1 – катодная область, 2 – анодная область

Плотность тока относительно велика на поверхности катода и вблизи него и постепенно убывает по направлению к аноду [18]. Увеличение зоны дуги по мере продвижения к аноду показано на рисунке 2.2, оно является следствием газового потока, входящего в зону дуги в районе катода и уходящего в радиальном направлении вблизи анода.

Максимально возможное давление в дуге возникает под действием электромагнитных сил. Радиальное сжатие обратно пропорционально сечению, через которое течёт ток.

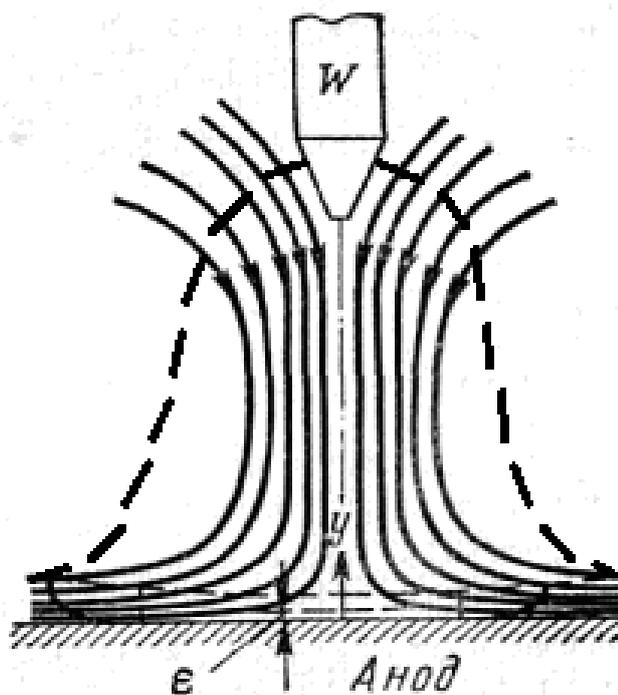


Рисунок 2.2 – Гидродинамика течения в сильноточной дуге;

W – вольфрамовый электрод;  $\varepsilon$  – область анодного падения напряжения [18]

Опираясь на рисунок 2.1, можно сказать, что давление постепенно убывает по направлению от катода к аноду. Следственно, действие электромагнитных сил максимально вблизи катода является максимальным и пренебрежимо мало в области анода.

Область, расположенная перед катодом, под действием электромагнитных сил забирает газ из окружающего пространства и выбрасывает его в направлении анода в виде свободной струи, смешивающейся с окружающим газом, и образующая расширяющийся поток.

В областях катодного и анодного падения напряжения напряженность поля значительно возрастает в сравнении с напряженностью поля в столбе дуги. Это связано с распределением напряжения по оси дуги, показанного на рисунке 2.3.

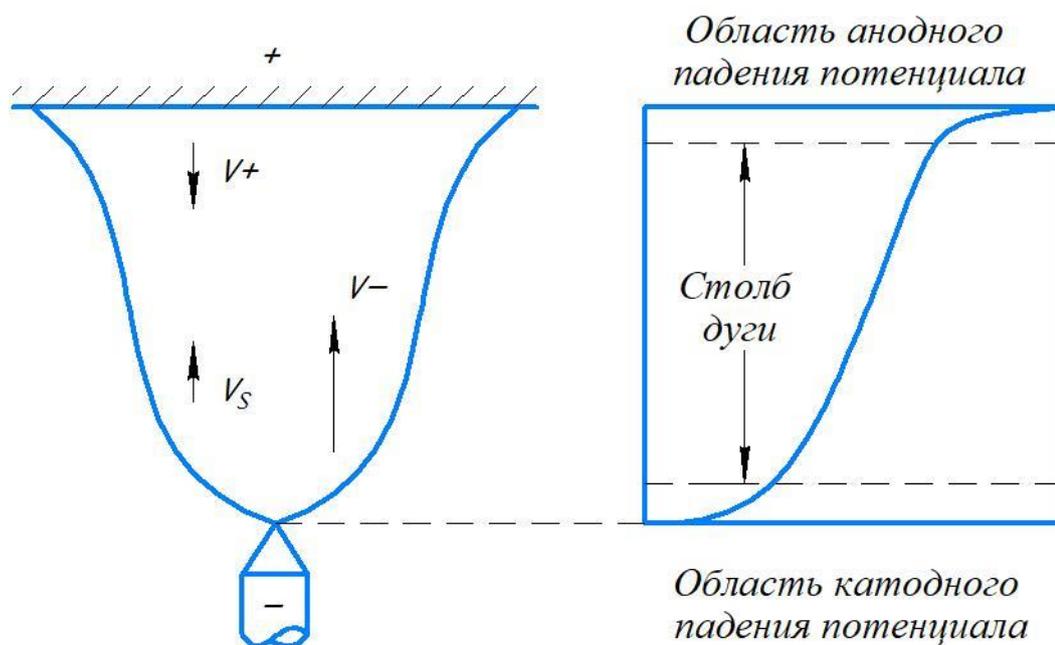


Рисунок 2.3 – Векторы скорости и распределение потенциала в дуге

Катодное падение напряжения связано с электронной эмиссией, образующей у катода ионы и электроны, и не представляет никакого интереса с точки зрения подвода энергии к аноду.

Анодное падение напряжения имеет большее значение для подвода энергии к аноду. Условия падения напряжения зависят от двух явлений: процесса образования ионов и температурного поля у анода. Рассмотрим область падения слаботочных дуг.

В слаботочных дугах ионы движутся от катода к аноду под действием электрического поля. Действие гидродинамического течения незначительно в этом случае. С точки зрения электрической нейтральности столба дуги, для поддержания постоянного потока ионов должно происходить их образование в тонком слое, прилегающем к аноду. Образование ионов в этом слое может происходить либо за счет ионизации полем, либо за счёт термической ионизации [18]. В обоих случаях необходима затрата энергии электрического поля. Энергия передаётся электронам и они, сталкиваясь с частицами, воспроизводят ионы. Однако только незначительная часть электронов участвует в процессе ионизации. Большая часть проходит через прианодный

слоем, не отдавая тяжелым частицам энергию. Таким образом, энергия поля прианодного слоя передаётся аноду путём соударения электронов.

Условия в области анодного падения напряжения сильноточных дуг отличаются от условий в слабых дугах. В сильноточных дугах движение ионов определяется катодной струей: в столбе дуги ионы движутся от катода к аноду. Количество ионов, образующихся в прианодной зоне, значительно уменьшается и ограничивается тем числом ионов, которые выносятся из дуги в радиальном направлении гидродинамическим течением.

Можно сказать, что при слаботочной дуге ионы и заряженные частицы движутся в разные стороны и в анодной области образуется слой ионов. В сильноточной дуге анодная область сдувается потоком газа в следствии чего уменьшается напряжение в области анодного пятна сильноточной дуги. Помимо этого, нагретый ионизированный газ является мощным теплоносителем, позволяющим вносить большую энергию на анод.

### **2.3 Требования к процессу**

Аддитивная наплавка предполагает непрерывное нанесение слоя материала. Это обеспечивает относительную постоянность сечения наплавляемого слоя. Если образование слоя прервать и начать заново, то в зоне прерывания образуется неоднородность сечения. Это объясняется образованием кратера при окончании наплавки и расплавлением с вытеканием металла при образовании сварочной ванны в момент начала наплавки [19].

Равномерность наплавляемого слоя обеспечивается постоянной скоростью наплавки, подачи присадочного материала и постоянного вноса тепла а также стабилизацией напряжения дуги, как при наплавке валика так и при автоматическом его поддержании при наложении на него следующего валика в случае при орбитальной наплавке. Разброс этих параметров по мере формирования слоя приведёт к геометрическим дефектам.

Так при отклонении скорости наплавки и подачи материала будет изменяться форма и площадь сечения шва. Возможно образование наплывов и разности высоты слоя. Эти явления не позволят качественно формировать последующие слои.

При увеличении и уменьшении вноса тепла присадочный материал может закипеть или вообще не проплавиться, что приведёт к внутренним дефектам наплавки и последующем браке детали. Так же возникают наплывы и проплавления сварочной ванны описанные в характеристике процесса.

Разные зоны детали требуют разных толщин, соответственно необходимо контролировать приход материала в сварочную ванну и ширину наплавляемого слоя.

При непрерывной наплавке, например, тел вращения, необходимо обеспечить своевременное поднятие головки при проходе каждого слоя. Также на возникающих неровностях на поверхности слоёв необходимо обеспечить постоянное напряжение дуги. Эти два условия требуют обеспечения управления напряжением дуги.

Таким образом можно сказать, что при дуговой наплавке необходимо обеспечить:

- равномерность прихода металла в сварочную ванну при небольших её размерах,
- стабилизацию напряжения дуги,
- дискретное плавление присадочного материала,
- стабильность горения дуги,
- обеспечение малых размеров ванны.

## **2.4 Выбор параметров режима**

Следует сказать, что при аддитивной наплавке нет возможности использовать длительное время сильноточной дуги. В противном случае ванна

тонкой стенки под действием мощного потока нагретого ионизированного газа расплавится. Однако можно использовать сильноточный источник на короткое время с тем, чтобы мелкими порциями плавить присадочную проволоку. Такие требования можно удовлетворить импульсным режимом питания.

### 2.4.1 Характеристика системы источник питания – дуга

Для сварки в аргоне требуется источник с крутопадающей вольт амперной характеристикой. Такая характеристика обеспечивает более устойчивое горение дуги. Схема крутопадающей характеристики приведена на рисунке 2.4.

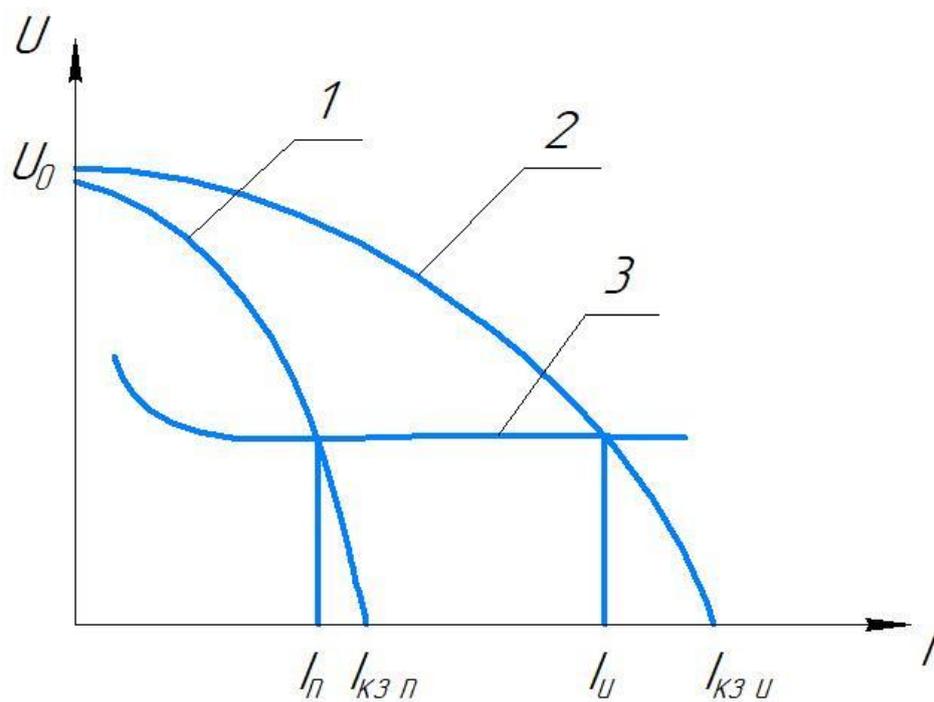


Рисунок 2.4 – Схема крутопадающей вольт амперной характеристики

На схеме находятся вольт амперные характеристики источника питания в паузе 1 и в импульсе 2, которые пересекают вольт амперную характеристику дуги в точках, соответствующих токам паузы  $I_n$  и импульса  $I_u$ .

Так же на схеме приведены токи короткого замыкания импульса  $I_{кз\ n}$  и паузы  $I_{кз\ и}$ .

Основными параметрами являются ток паузы, ток импульса и напряжение дуги. В процессе наплавки происходит переключение между токами импульса и паузы.

Импульсы сварочного тока дуги позволяют расплавлять проволоку мощным потоком тепла мелкими частями и при этом обеспечивать небольшие размеры сварочной ванны.

#### **2.4.2 Импульсный режим питания дуги**

Использование импульсного режима питания сварочной дуги позволяет снизить количество вводимой энергии в ванну.

Импульсный режим можно характеризовать как облегчающий сварку малыми токами. Постоянная циклическая смена сварочного тока импульсом и паузой позволяет снизить тепловложение. За счёт этого стабилизируется дуга, снижается нагрев детали и уменьшается вероятность коробления. Установив значение частоты пульсаций до среднего, можно добиться концентрированную форму дуги, это позволяет увеличить глубину проплавления, не повышая тепловложение; применительно к нержавеющей стали: импульсный режим средней частоты повышает коррозионную стойкость шва образуя мелкокристаллическую структуру.

Частота импульсного режима сварки определяется сменой нижнего и верхнего значения силы сварочного тока и напряжения дуги. Инверторные источники питания современного типа позволяют настраивать частоты в широком диапазоне (0,5-300) Гц. При переходе в диапазон высоких частот достигаются эффекты уменьшения размеров зёрен металла шва и уменьшение диаметра дуги. Низкочастотный диапазон улучшает управление сварочной ванной.

Описать процессы, происходящие в сварочной ванне, можно следующим образом: достигая тока импульса, дуга проплавляет основной металл образуя точечную ванну. Перейдя к току паузы тепловложение снижается, и ванна начинает затвердевать от краёв пока следующий импульс тока не повторит цикл, расплавив следующую часть основного металла. Таким образом, при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом в импульсном режиме происходит множество расплавлений и затвердеваний в сварочном шве; формируется множество соединённых внахлёстку сварных точек.

В таком режиме достигается меньший диаметр сварочной ванны в сравнении со сваркой на постоянном токе, позволяя сваривать тонкостенные детали. При этом обеспечивается достаточный провар детали. Для достижения вышеописанного эффекта необходимо обеспечить достаточную разницу температур сварочной ванны в фазе импульсного тока и тока паузы. Такой эффект достигается при частоте в пределах 50 Гц.

### 2.4.3 Циклограмма модуляции тока с программным управлением

Дуговая сварка относится к широко распространённому процессу и на данный момент разработано огромное количество устройств, обеспечивающих модулированные способы сварки как постоянным, так и переменным токами. Устройства для реализации и модуляции сварочного тока называются модуляторами.

На рисунке 2.5 изображены эпюры тока при импульсной модуляции сварочного тока.

Величину среднего значения сварочного тока можно вычислить по формуле (учитывая малую инерционность сварочной цепи и то, что форма импульсов близка к прямоугольной):

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{и}}t_{\text{и}} + I_{\text{п}}t_{\text{п}}}{t_{\text{и}} + t_{\text{п}}} . \quad (2.1)$$

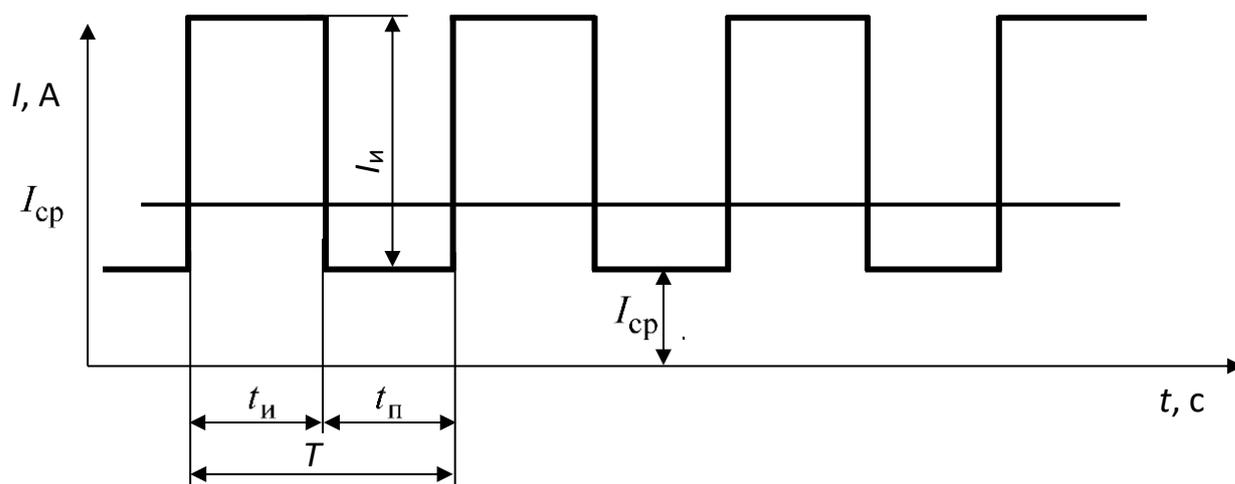


Рисунок 2.5 – Эюра тока при импульсном модулировании с программным управлением (для постоянных в процессе сварки длительности импульса и длительности пауз), где  $I_{п}$  – ток паузы,  $I_{и}$  – амплитуда импульса тока,  $t_{п}$  – длительность паузы,  $t_{и}$  – длительность импульса,  $I_{и}$  – амплитуда импульса тока,  $T$  – период следования импульсов

Система импульсного питания сварочной дуги должна обеспечивать надежное формирование валика при небольшом значении среднего сварочного тока и минимальных объемах сварочной ванны при гарантированном сплавлении валиков. Этого можно достичь, применив импульсную модуляцию сварочного тока, изображённую на рисунке 2.6. В промежутке основного импульса ток и напряжения постоянны, что увеличивает тепловложение и проплавление основного металла. Определить среднее значение сварочного тока можно определив частоту таких импульсов и их длительность.

В остальном промежутке эюра выглядит стандартно. Для уменьшения нагрузки на зазрение сварщика, в стандартном промежутке применяют импульсы тока длительностью (0,5-2) мс с частотой более 50 Гц. Это снижает контрастность излучения предотвращая усталость глаз.

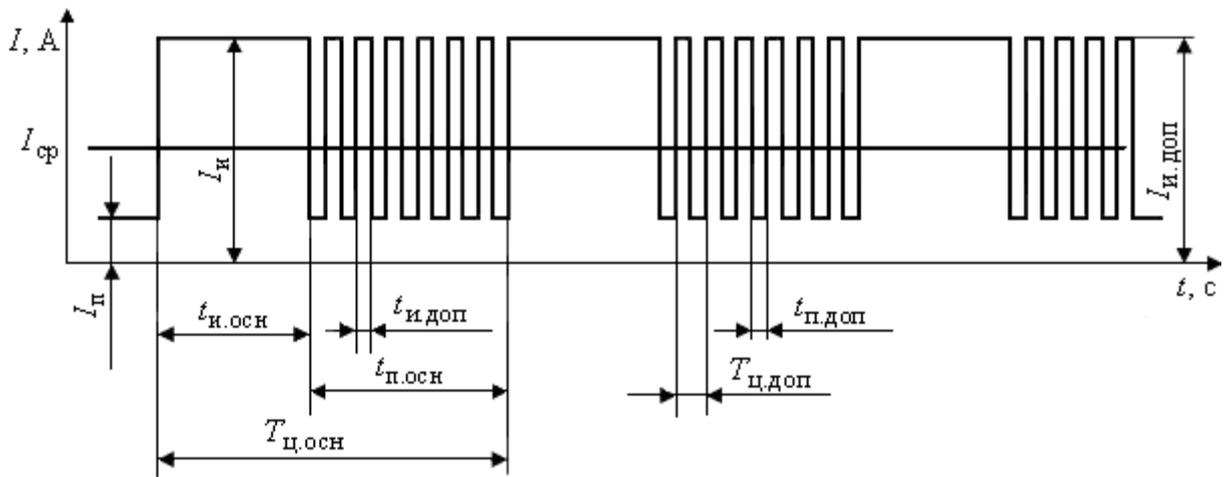


Рисунок 2.6 – Циклограмма способа электродуговой сварки с импульсной модуляцией тока по программе, где  $I_п$  – ток паузы,  $I_{и.доп}$  – ток дополнительного импульса,  $t_{и.доп}$  – период импульса,  $t_{и.осн}$  – период основного импульса,  $t_{п.осн}$  – период основной паузы,  $I_и$  – ток импульса,  $T_{ц.доп}$  – период дополнительного цикла дополнительного,  $I_{ср}$  – средний ток,  $t_{п.доп}$  – период дополнительной паузы,  $T_{ц.осн}$  – период основного цикла

Значение среднего сварочного тока для данного типа модуляции вычисляется по следующей формуле:

$$I_{ср} = \frac{I_и t_и + (I_и t_{и.доп})n + (I_п t_{п.доп})n}{t_и + t_п}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – количество дополнительных импульсов в паузе  $n = t_{п.осн} f_{и.допн}$  ;

$f_{и.допн}$  – частота дополнительных импульсов, Гц.

Вспомогательные импульсы большой частоты (50 Гц и выше) той же амплитуды что и основной сварочный ток помимо снижения нагрузки на зрение формируют шов с мелкочешуйчатой структурой.

Данный процесс можно применить в системах, где не возникают внешние и внутренние мгновенные возмущения; отсутствуют локальные зоны накопления тепла.

При этом за один период следования импульсов сварочного тока сварочная ванна совершает колебательное движение. Во время импульса увеличивается объем сварочной ванны и за счет силового давления сварочной дуги ванна перемещается в хвостовую часть по фронту кристаллизации. Во

время паузы вследствие резкого снижения давления сварочной дуги ванна возвращается под электрод также по фронту кристаллизации, но при этом часть металла ванны кристаллизуется на поверхности кристаллизации. Вследствие этого происходит слоистая кристаллизация металла, то есть кристаллизация идет не непрерывно, а дискретно.

Хотя импульсный режим позволяет снизить объем металла сварочной ванны, но вследствие накопления тепла и увеличения температуры изделия во время сварки, происходит увеличение объема сварочной ванны при программном управлении процессом (то есть при постоянных значениях длительности импульса тока и паузы) [19].

Если данный метод не удовлетворяет требованиям, применяется другой метод модуляции.

#### **2.4.4 Модуляция сварочного тока с активным управлением тепловой мощностью дуги**

В рассматриваемом методе импульсной модуляции сварочного тока в качестве параметра модуляции используют напряжение в дуговом промежутке  $U_d$ . Это параметр изменяется в пределах единиц вольт не нарушая защиты сварочной зоны.

За счёт изменения значений модулируемых параметров длительности тока импульса  $t_{и.осн}$  и тока паузы  $t_{п.осн}$  изменяется среднее значение величины сварочного тока  $I_{ср}$ . Длительности тока основного импульса и тока основной паузы можно регулировать как по отдельности, так и совместно.

При модулировании тока основного импульса  $t_{и.осн}$ , изображённого на рисунке 2.7, предоставляется возможность автоматической адаптации параметров режима сварки под заданные параметры. Среднее значение сварочного тока  $I_{ср}$  и соответственно масса сварочной ванны  $m_{ван}$  регулируется с учетом поведения сварочной ванны за счет импульсной модуляции

длительности импульсов при введении обратной связи по мгновенным значениям напряжения дуги.

Опираясь на отклонения мгновенного изменения напряжения дуги от заданного в интервале основной паузы, автоматически выставляется длительность основного импульса сварочного тока. Такие отклонения напряжения обусловлены колебаниями сварочной ванны.

Величина  $I_{cp}$  устанавливается следующим аналитическим выражением:

$$I_{cp} = \frac{I_{и} t_{и} (var) + (I_{и} t_{и,доп})n + (I_{п} t_{п,доп})n}{t_{и} + t_{п}} \quad (2.3)$$

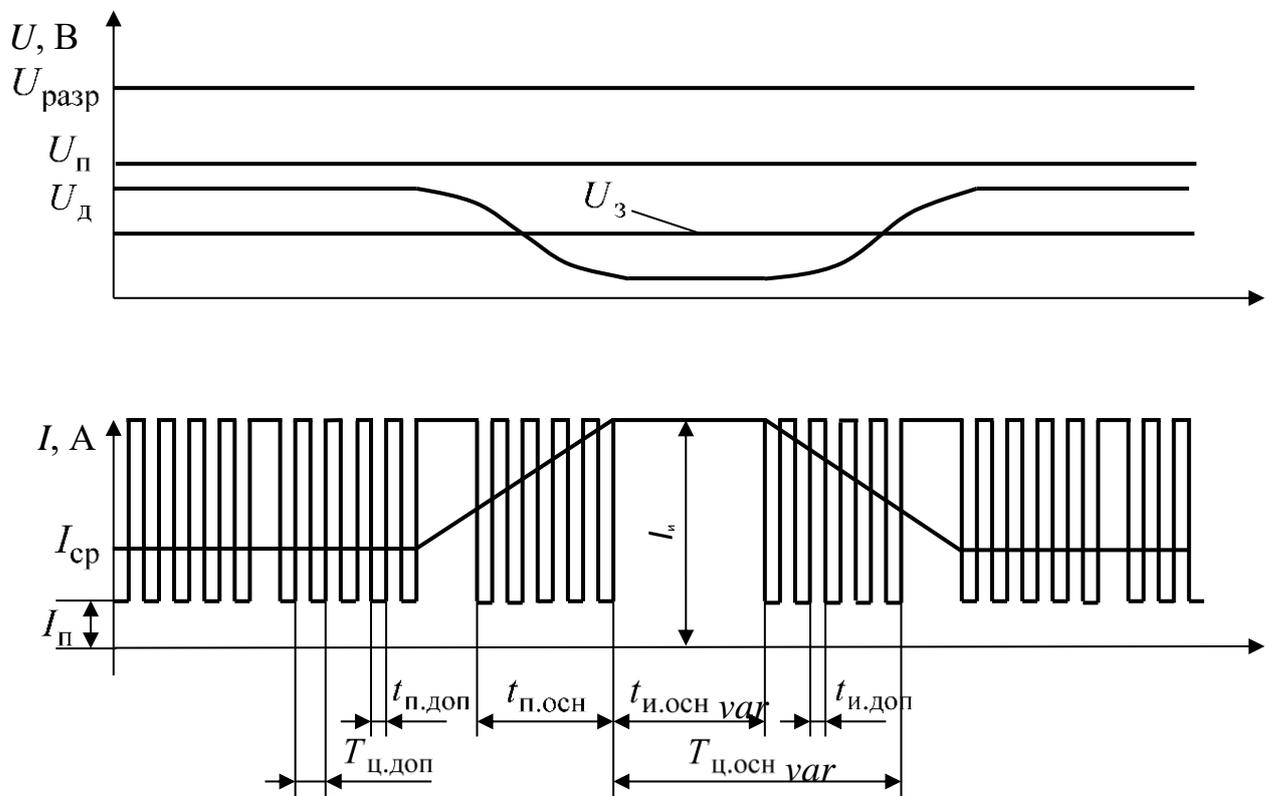


Рисунок 2.7 – Метод электродуговой сварки плавящимся электродом с импульсной модуляцией длительности основного импульса сварочного тока,

где  $U_{разр}$  – напряжение при разрыве дуги;  $U_{п}$  – пороговое напряжение

(величина напряжения, при котором появляются поры);

$U_{д}$  – напряжение дуги

## 2.5 Разработка способа наплавки диска на подложку в виде трубы

При аддитивной наплавке неплавящимся электродом основными возмущающими действиями является неравномерность и неоднородность наплавляемого слоя, являющиеся следствием отклонения основных параметров сварки. К основным параметрам относятся скорость сварки, скорость подачи проволоки и количество вводимой теплоты.

Расчёт вводимой энергии производится по формуле:

$$q = \mu \cdot U \cdot I, \quad (2.4)$$

где  $\mu$  – коэффициент полезного действия источника тепла (для аргонодуговой сварки  $\mu = 0,55$ ).

Скорость сварки и подачи материала определяется исходя из требований размера наплавляемого слоя. Их значения обычно приближённо высчитываются из отношения количества вводимого тепла и количества необходимого материала, с учётом параметров теплоотвода от зоны наплавки и удельной теплоёмкости материала. Далее методом итераций подбирается наиболее подходящий режим, при котором получается наиболее качественный шов, и производится наплавка.

С целью уменьшения объема сварочной ванны применяется импульсный ввод тепла, обеспечивающий снижение объема расплавленного металла сварочной ванны, за счет концентрированного ввода тепла в изделие во время импульса, во время которого тепло используется рационально, а во время паузы между импульсами при небольшом сварочном токе (5-10) А происходит некоторое снижение размеров сварочной ванны.

При этом за один период следования импульса сварочного тока сварочная ванна совершает колебательное движение. Во время импульса увеличивается объем сварочной ванны и за счет силового давления сварочной дуги ванна перемещается в хвостовую часть по фронту кристаллизации. Во время паузы вследствие резкого снижения давления сварочной дуги ванна

возвращается под электрод также по фронту кристаллизации, но при этом часть металла ванны кристаллизуется на поверхности кристаллизации. Вследствие этого происходит слоистая кристаллизация металла, то есть кристаллизация идет не непрерывно, а дискретно.

Хотя импульсный режим позволяет снизить объем металла сварочной ванны, но вследствие накопления тепла и увеличения температуры изделия во время сварки, происходит увеличение объема сварочной ванны при программном управлении процессом (то есть при постоянных значениях длительности импульса тока и паузы).

Такая чешуйчатая структура имеет разную высоту наплавки, а соответственно появляется разброс напряжения дуги по мере прохода последующего слоя. Помимо этого, при непрерывной наплавке слоёв необходимо поднимать дугу с каждым последующим слоем, чтобы обеспечить равномерный ввод тепла в область наплавки.

Для решение этой проблемы применяется система автоматического регулирования напряжения дуги.

Выводы по второй главе.

Описаны гидродинамические процессы, происходящие в дуговой области и физические процессы в дуге. Это позволило рассмотреть зависимость тепловложения от типа дуги (слаботочная и сильноточная).

Анализ процесса наплавки обозначил необходимые для него требования, такие как непрерывность подачи присадочного материала, управление напряжением дуги, непрерывное плавление, стабильность дуги, малые геометрические размеры ванны.

Разработан алгоритм питания дуги. Обозначены основные параметры режима и среднее значение тока при импульсном питании.

Выбранный способ наплавки позволяет: при минимальном значении среднего тока обеспечивать устойчивый процесс горения дуги и минимальные размеры сварочной ванны, обеспечивать возможность автоматической стабилизации параметров процесса на интервале одного периода следования

импульса, обеспечить различные алгоритмы управления и широкий диапазон изменения параметров режима (изменение длительности паузы или импульса). Введение импульсов большой частоты и малой длительности на интервале основной паузы позволяет интенсивно осуществлять дегазацию сварочной ванны и, кроме того, снижает нагрузку на зрение.

### **3 Разработка экспериментальной установки**

#### **3.1 Общий вид экспериментальной установки**

Экспериментальный стенд представлен в приложении Б. В него входят балластный реостат 1, источник питания, ИРС-1200 АД 2, система блоков автоматического регулирования БАРС-2 3, пульт управления 4, сборная сварочная головка 5, манипулятор с патроном 6, газовая аппаратура 7.

В газовую аппаратуру входит баллон защитного газа аргона, газовый клапан, редуктор с ротаметром и манометром.

#### **3.2 Система блоков автоматического регулирования процессом сварки «БАРС-2»**

В соответствии с разработанным алгоритмом аддитивной наплавки разработана функциональная схема установки, базирующаяся на блоке автоматического регулирования сварки, БАРС-2.

Система блоков автоматического регулирования процессом сварки БАРС-2В предназначена для управления автоматической варкой плавящимся и неплавящимся (с независимой подачей) электродами в среде защитных газов на переменном управлении сварочным током и скоростями сварки и подачи присадочной проволоки, колебание электрода, слежение по напряжению сварочной дуги.

Данная установка обладает следующими характеристиками:

- напряжение питания 220 В  $\pm$  10% 50 Гц,
- мощность потребления не более 2,4 кВт,
- выходная мощность регулятора сварочного тока не более 0,3 кВт,
- выходная мощность регулятора сварочного тока не более 0,6 кВт,
- напряжение сварочной дуги 3,5...27 В,
- зона нечувствительности при слежении за напряжением сварочной дуги не более 0,15 В.

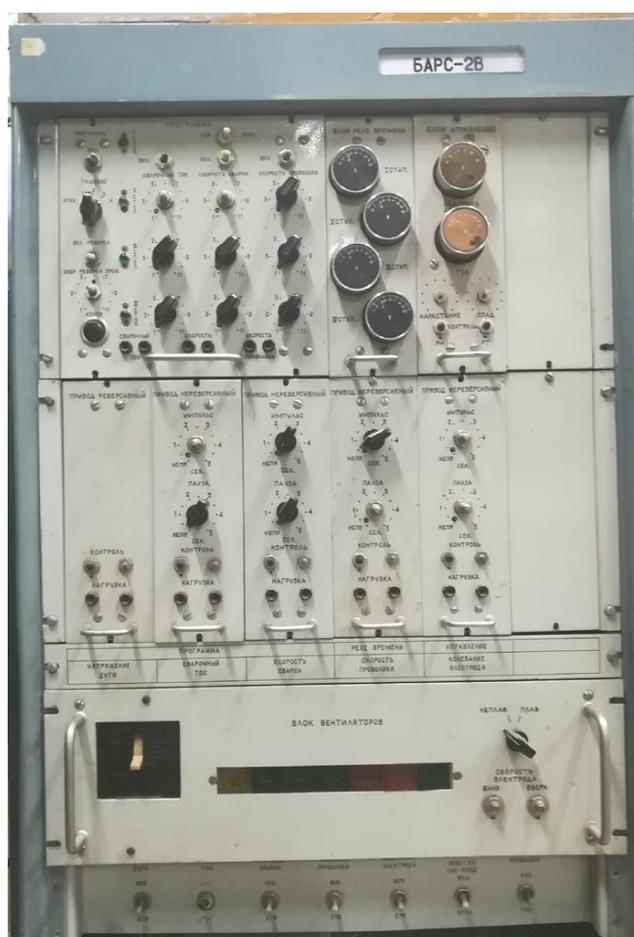


Рисунок 3.1 – Система блоков автоматического регулирования БАРС-2

Сама по себе установка БАРС-2 представляет собой шкаф с выдвижными блоками, отвечающими за различные процессы сварки (рис. 3.2). В зависимости от необходимого функционала можно подключать блоки регулирования и обратной связи.

В состав установки входят следующие элементы:

- силовой выпрямитель с крутопадающей регулируемой внешней характеристикой;
- импульсно-регулируемое сопротивление ИРС 300РПМ;
- сварочный автомат ГСП-2, модернизированный для сварки неплавящимся электродом в защитной среде аргона;
- осциллограф С8-17;
- пульт управления;
- пульт управления ручной.

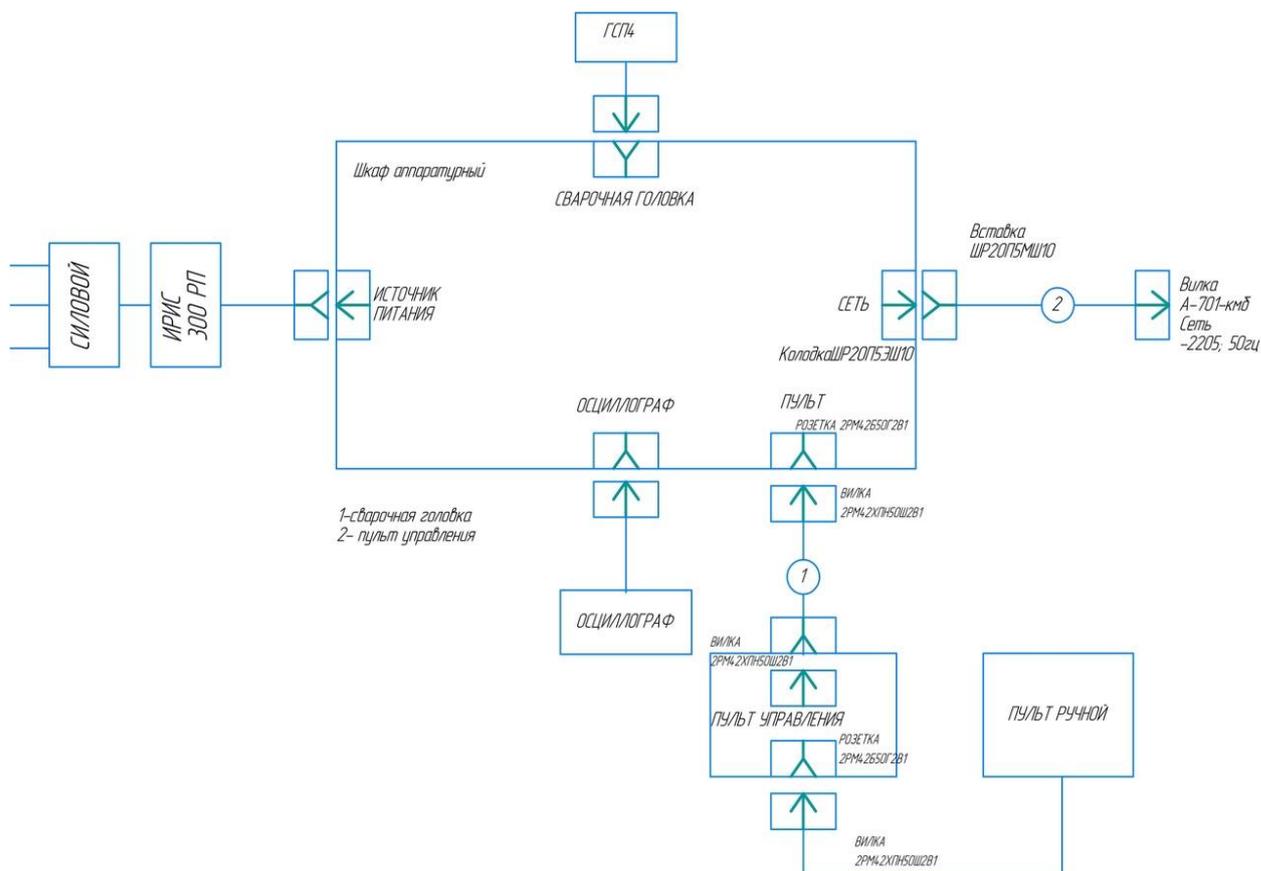


Рисунок 3.2 – Функциональная схема БАРС-2 с подключенным оборудованием

Стоит отметить, что в системе автоматике БАРС-2В блок питания двигателей подачи проволоки и скорости вращения реализует импульсно фазовое управление. Такое управление не подходит для двигателей головки ОКА 18-45, так как в ней прецизионные двигатели с полым ротором. Поэтому специально сделан блок адаптации с целью связи этих устройств.

### 3.3 Описание сварочной головки

При проведении эксперимента использовалась сварочная головка собранная изображённая на рисунке 3.3.

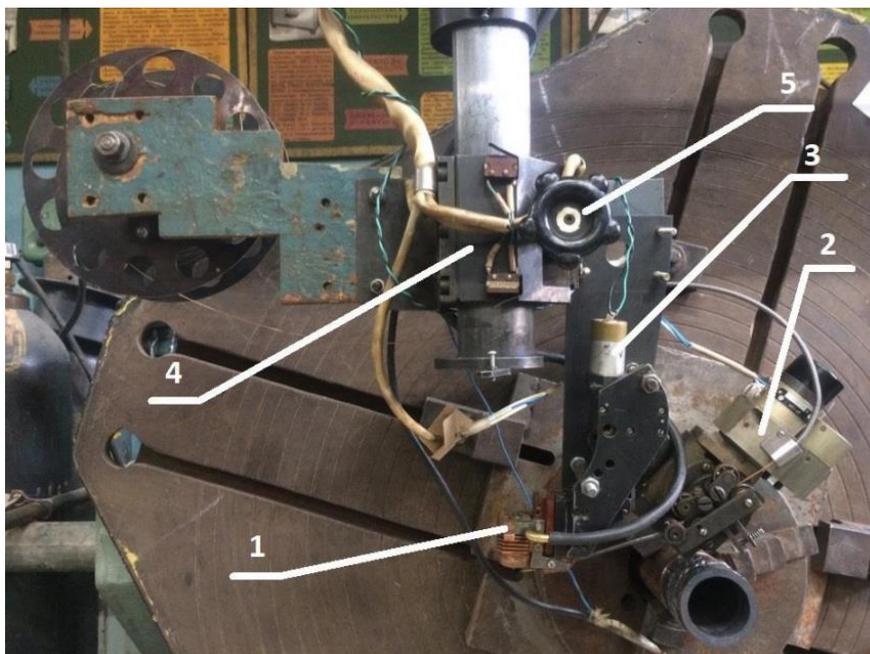


Рисунок 3.3 – Устройство сварочной головки

Согласно рисунку 3.3 в данной экспериментальной установке используется автомат сварочной головки, состоящий из горелки 1, привода подачи проволоки 2, привода колебаний 3, вертикального привода 4, установочного продольного привода 5.

Поставлена сварочная головка для неплавящегося электрода с соплом для подвода защитного газа, с цангой для зажатия электрода, с приводом подачи присадочной проволоки. Питание осуществляется от блока БАРС-2.

Горелка сварочной головки имеет конструктивные рёбра для охлаждения, выход на газопровод и использует вольфрамовый электрод диаметром 3 мм.

Привод подачи имеет диапазон диаметра используемой проволоки (0,8-2) мм, может обеспечить скорость подачи проволоки от (8-120) м/час и имеет две пары U-образных роликов.

Привод колебания имеет угол поворота в  $15^\circ$  в каждую сторону и колеблется в диапазоне (0,2-3) Гц.

### 3.4 Схема обратной связи

Для автоматического изменения режима при многослойной наплавке необходимо совершить автоматический переход к следующему слою, при этом напряжение дуги должно сохраниться постоянным. Поскольку система, подъезжая к новому слою уменьшает напряжение на дуге, она должна, преодолев зону нечувствительности, поднять головку чтобы выровнять напряжение на дуге.

Для этой задачи имеется система автоматического регулирования напряжения дуги (АРНД) которая поднимает и опускает головку в соответствии с заданным напряжением (рис. 3.4), но поскольку необходимо изменять напряжение от слоя к слою эта система была модернизирована.

В самой блоке автоматического регулирования введены изменения в блоке обратной связи по напряжению дуги. Увеличена ёмкость конденсатора до 1000 мкФ и поставлен обратный диод, чтобы коммутационные явления не проникали в цепь.

Модулятор обратной связи контролирует напряжение на интервале одного периода импульс-пауза. Возникают колебания ванны. Если колебания ванны большое, то ванна уходит далеко от электрода и напряжение возрастает или наоборот, при сокращении расстояния напряжение уменьшается. Этот фактор напрямую влияет на модулятор, который может увеличить или уменьшить паузу и импульс. Для того чтобы подавить скачки напряжения в интервале одного импульса необходимо поставить конденсатор на стабилизаторе. При этом стабилизатор будет реагировать на среднее изменение напряжения в большом интервале. Это позволит автоматически поднимать сварочную головку при изменении расстояния между электродом и изделием (переход на новый слой).

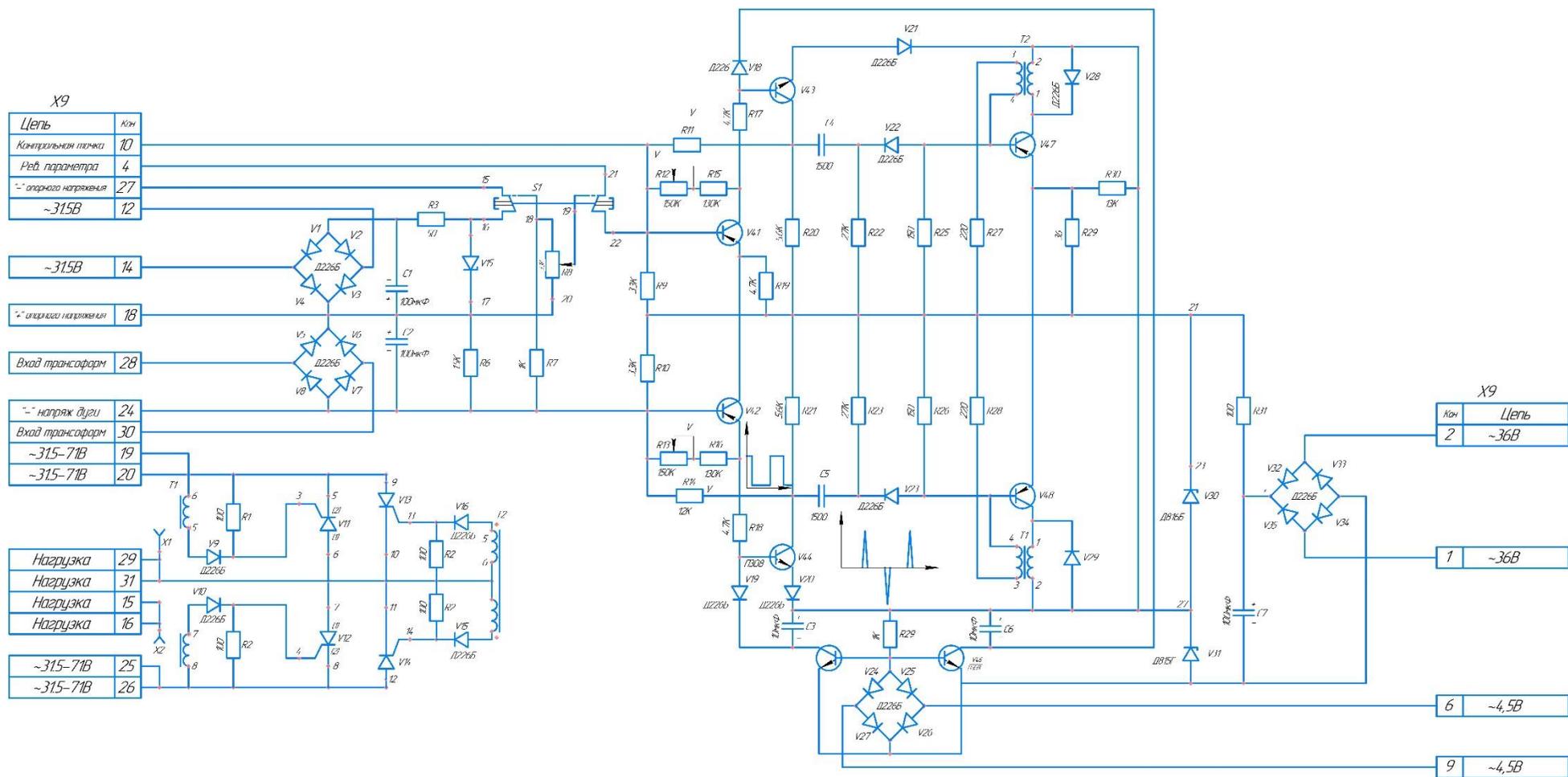


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема системы автоматического регулирования по напряжению дуги (АРНД)

Помимо конденсатора необходимо поставить последовательно диод, так как коммутационные процессы имеют отрицательный всплеск. Это приводит к тому, что при выпрямлении на модуляторе достигается большое значение напряжения, хотя процесс наплавки идет стабильно с заданным напряжением, и, соответственно, при сравнении с заданным напряжением привод головки получает сигнал о большой разнице, происходит движение головки к ванне и залипание электрода.

Выводы по третьей главе.

Экспериментальная установка позволяет производить послойную наплавку как тел вращения, так и плоских деталей благодаря манипулятору.

Установка обеспечивает автоматический переход к новому слою без вмешательства оператора при орбитальной сварке.



– блок формирования длительности вспомогательных импульсов  $t_{п\text{ вспом.}}$ .

Схема может работать в трех режимах: первый режим, когда длительность основного импульса  $t_{и\text{ основ}}$ , задана постоянной, а длительность основной паузы  $t_{п\text{ основ}}$ , переменна, второй когда длительность основной паузы  $t_{п\text{ основ}}$ , задана постоянной, а длительность основного импульса  $t_{и\text{ основ}}$ , переменна и третий, когда длительность основного импульса  $t_{и\text{ основ}}$  и длительность основной паузы  $t_{п\text{ основ}}$ .

Пусть  $t_{и\text{ основ}}$ , задается постоянным тогда в блоке формирования  $t_{и\text{ основ}}$ , формируется импульс с заданной длительностью. После отключения основного импульса на один из входов тиристорного триггера 1 подаётся сигнал, и он переходит в положение паузы. Тиристорный триггер 1 подает сигнал со своего выхода на вход тиристорного триггера 2. На выходе тиристорного триггера 2 формируется сигнал на размыкание ключа К и запуск линии задержки зарядного тиристора, через который происходит заряд коммутирующего конденсатора. Причем если фиксируется горение дуги, то заряд происходит через дуговой промежуток если дуга не горит, то заряд происходит непосредственно через источник питания.

Одновременно тиристорный триггер 1 запускает блок формирования частоты вспомогательных импульсов который включает блок формирования длительности вспомогательных импульсов. С блока формирования частоты вспомогательных импульсов и с блока формирования длительности вспомогательных импульсов поступают сигналы вход тиристорного триггера 2.

Длительность паузы будет определяться величиной отклонения среднего напряжения дуги от заданного значения. В соответствии с величиной этого отклонения блок формирования определяет длительность паузы, после чего с выхода блока формирования основной паузы на вход тиристорного триггера 1 поступает сигнал, который переводит триггер в положение импульса. При этом тиристорный триггер 1 переключается в состояние

импульса и с его выхода поступает сигнал на один из входов тиристорного триггера 2 на выходе которого появляется сигнал на включение ключа К. Одновременно тиристорный триггер 1 отключает блок формирования  $f_{\text{вспом}}$ , а он отключает блок формирования  $t_{\text{и вспом}}$  и дополнительные импульсы перестают генерироваться.

Когда длительность основной паузы  $t_{\text{п основ}}$  задана постоянной, то после окончания формирования её сигнала с выхода блока формирования  $t_{\text{п основ}}$  поступает на вход тиристорного триггера 1. При этом тиристорный триггер 1 переключается в состояние импульса и с его выхода поступает сигнал на один из входов тиристорного триггера 2 на выходе которого появляется сигнал на включение ключа К. Одновременно тиристорный триггер 1 отключает блок формирования  $f_{\text{вспом}}$ , а он отключает блок формирования  $t_{\text{и вспом}}$  и дополнительные импульсы перестают генерироваться.

Через дуговой промежуток протекает ток сварочного импульса. Блок формирования  $t_{\text{п основ}}$  будет формировать длительность основного импульса в зависимости от отклонения среднего напряжения дуги на интервале основного импульса от заданного напряжения

Можно сделать вывод, что функциональная схема выполнена на базе импульсно-регулируемого сопротивления и позволяет реализовать три режима работы.

## 4.2 Схема силовой части

Силовая часть установки – это импульсно-регулируемое сопротивление ИРС (рис. 4.2), которое представляет собой сопротивление, зашунтированное тиристором с принудительной коммутацией. В работе [19] показано, что наиболее полно всем требованиям работы в сварочных цепях переменного тока удовлетворяет схема двухступенчатой принудительной коммутации последовательного соединения.

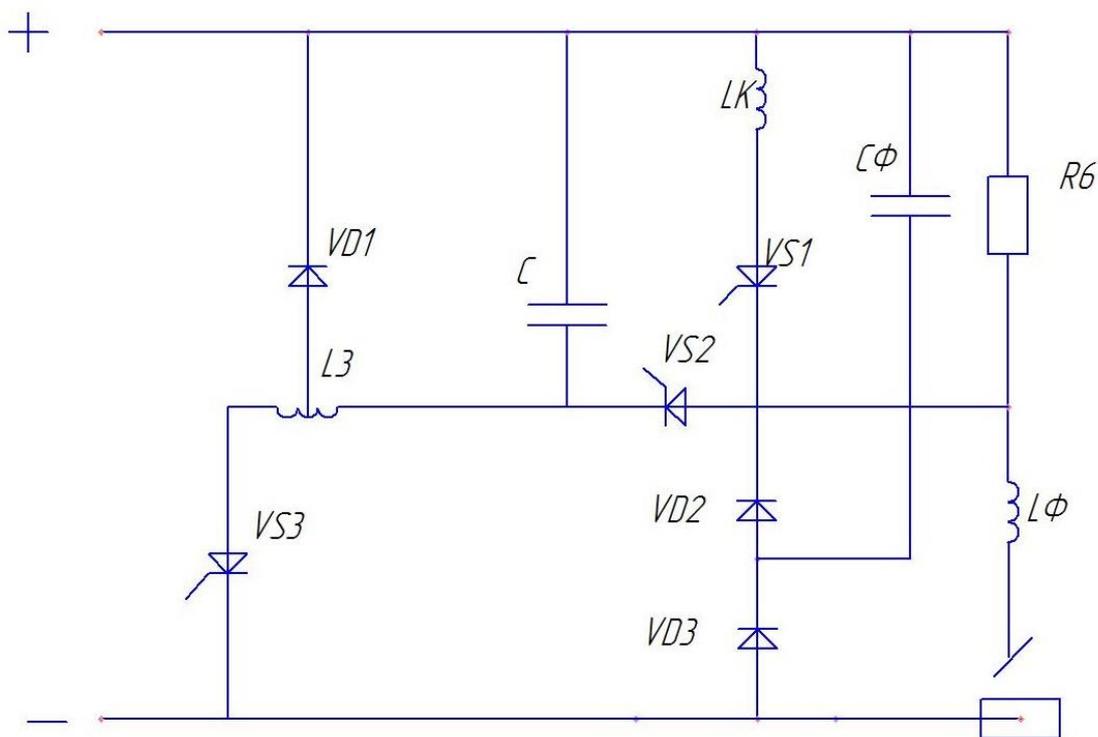


Рисунок 4.2 – Силовая часть импульсной системы питания

В источнике с жёсткой вольт амперной характеристикой величину сварочного тока регулируют в основном скоростью подачи присадочной проволоки. Напряжение холостого хода имеет постоянное значение и при коротком замыкании ток определяется сопротивлением сварочной цепи и величиной вылета электрода. Значение тока короткого замыкания практически не зависит от величины сварочного тока.

Следовательно, схема принудительной коммутации должна быть в состоянии отключать ток короткого замыкания как с холостого хода, так и при горении дуги в любой момент времени и исключать или ограничивать до допустимого уровня раскачку напряжения на коммутирующем конденсаторе за счет энергии, запасенной в коммутирующем дросселе от тока нагрузки. Кроме того, электромагнитные процессы должны быть ускорены без ухудшения физической устойчивости горения дуги.

С учетом изложенного, на базе схемных решений построена модернизированная схема силовой части импульсной системы питания.

### 4.3 Схема обратной связи

Схема обратной связи состоит из блока питания, датчика напряжения и исполнительных транзисторов, включенных последовательно. Функции контроля заданного напряжения дугового промежутка  $U_3$ , а также отработки рассогласования между  $U_3$  и  $U_3 \pm \Delta 2B$ , выполняет датчик напряжения дугового промежутка. Принципиальная электрическая схема датчика напряжения дугового промежутка представлена на рисунке 4.3.

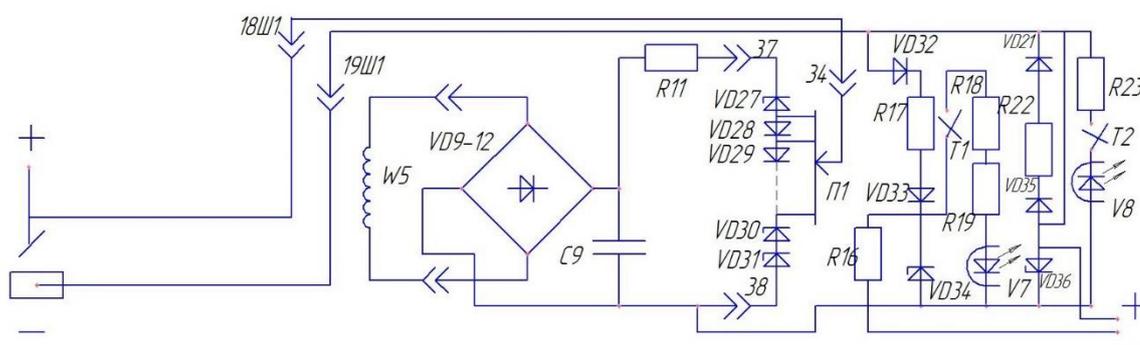


Рисунок 4.3 – Принципиальная электрическая схема датчика напряжения дугового промежутка

Работа датчика напряжения дугового промежутка происходит следующим образом. Если  $U_{d\text{cp.}}$  меньше  $U_3$ , то ток протекает по цепи: «-» дуга - VD87 - R56 - VD88 - VD89 - «-» ИП. При замкнутом тумблере SA4 ток протекает по цепи: «-» дуга VD87 - R56 - V2 - R57 - SA4 - «-» ИП, подсвечивая тем самым диод оптоэмиттера V2. В результате, сопротивление оптоэмиттера V2 уменьшается и поскольку он шунтируется переменным резистором R65, то происходит уменьшение общего сопротивления во время задающей цепи: R65 - R66 - VD96 - C11, что ограничивает длительность заряда конденсатора C11. Это приводит к уменьшению длительности основной паузы в процессе сварки и увеличению частоты следования основных импульсов. Если  $U_{d\text{cp.}}$  больше  $U_3$ , то ток протекает по цепи: «+» дуга - VD84 - VD85 - VD86 - VD92 - VD91 - R59 - VD90 - RS - «-» дуга. При

замкнутом тумблере SA5 ток протекает по цепи: «+» дуга - VD84 - VD85 - VD86 - SA5 - R60 - V3 - R59 - VD90 ~ RS - «-» дуга, подсвечивая тем самым диод оптотранзистора V3. В результате, сопротивление оптотранзистора V3 уменьшается и поскольку он шунтируется переменным резистором R73, то происходит уменьшение общего сопротивления во времязадающей цепи: R73 - R74 - VD99 - C13, что ограничивает длительность заряда конденсатора C13 и, как следствие, длительность основных импульсов.

При отключенном состоянии датчика реализуются алгоритмы способов с программным управлением частотой следования основных импульсов сварочного тока, либо серий дополнительных импульсов.

#### **4.4 Схема управления сварочным циклом**

Схема управления сварочным циклом (рис. 4.4) представляет собой мультивибратор, выполненный на гибридных тиристорах. Гибридный тиристор состоит из тиристора и однопереходного транзистора, в дальнейшем будем их обозначать V15 и V16. В анодные цепи тиристорov включены ограничительные сопротивления R65 и R36. Между анодами тиристорov включен коммутирующий конденсатор C18. В катодные цепи тиристорov включены диоды VD53 и VD54 для защиты тиристорov от обратных напряжений. Каждый из однопереходных транзисторov управляется времязадающей цепью, которая состоит из:

– для длительности импульса – из конденсатора C20, резистора R41, диода VD56 и переменного резистора R40, параллельно которому подключен оптотранзистор V8 обратной связи;

– для длительности паузы - из конденсатора C17, резистора R32, диода VD51 и переменного резистора R31, параллельно которому подключен оптотранзистор V7 обратной связи;

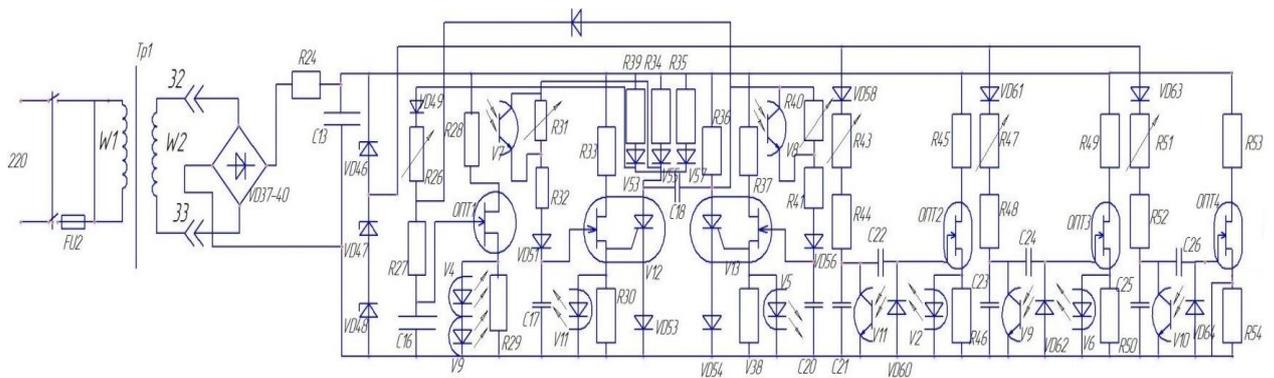


Рисунок 4.4 – Схема управления сварочным циклом

Питание времязадающей цепи осуществляется с анодов собственных тиристоров.

Работа схемы управления сварочным циклом происходит следующим образом. Пусть, например, тиристор гибридного тиристора V15 находится в открытом состоянии. В этом случае через него протекает сквозной ток, ограниченный резистором R35. При этом конденсатор C18 заряжен до напряжения источника питания “+” на правой обкладке. Тиристор гибридного тиристора V16 при этом закрыт. Поэтому с анода тиристора поступает напряжение на времязадающую цепь: C20 – VD56 – R 41 и переменного сопротивления R40. Напряжение на конденсаторе C20 нарастает по экспоненте, отсчитывается время импульса сварочного тока. Когда напряжение на конденсаторе C20 достигнет величины напряжения пробоя перехода эмиттер-база однопереходного транзистора гибридного тиристора V16, конденсатор C20 мгновенно разряжается через резистор R38. Импульс напряжения с резистора R38 одновременно поступает на управляющий электрод тиристора V16 и на светодиод оптотиристора V5, являющегося одним из входов триггера, выполненного на тиристорах VS6 и VS7, в катодные цепи которых включены диоды VD19 и VD20 для защиты от обратных напряжений. В анодные цепи включены ограничивающие сопротивления R14 и R15. Между анодами тиристоров включен коммутирующий конденсатор C10. При этом одновременно отпирается тиристор V16 и остается открытым, благодаря чему прекращается заряд конденсатора C20. Напряжение на

конденсаторе С18 оказывается приложенным к тиристор V15 в обратном направлении, в результате чего он переходит в непроводящее состояние, и подается питание с анода тиристора V15 на заряд конденсатора С17, определяющего длительность основной паузы в протекании сварочного тока и конденсатора С16, определяющего частоту следования вспомогательных импульсов на интервале основной паузы. Отпирается тиристор VS7 и остается открытым. Напряжение конденсатора С10 оказывается приложенным к тиристор VS16 в обратном направлении, и он переходит в непроводящее состояние. При этом конденсатор резонансно перезаряжается через обмотку импульсного трансформатора Тр4 и дозаряжается до напряжения источника питания по цепи “+” – R14 – VS7 –VD20 – “-”. Импульс тока первичной обмотки трансформатора Тр4 трансформируется во вторичную обмотку и поступает через контакты ШР8 и ШР9 на вспомогательный тиристор VS3 в схему принудительной коммутации силовой части, и со второй обмотки на светодиод оптооттранзистора V3. Оптооттранзистор V3 кратковременно отпирается и разрезает конденсаторы С25, С26, С27, С28 запуская тем самым две линии задержки выполненные на однопереходных транзисторах VT3 и VT5. Причем время задержки до срабатывания у линии на оптооттранзисторе V3 больше и поэтому при равных условиях линия задержки на оптооттранзисторе V3 будет срабатывать раньше.

Линия задержки срабатывает один раз, так как конденсатор С25 при частичном разряде конденсатора С26 заряжается и не дает возможность сработать линии задержки еще раз. Поэтому, конденсатор С26 просто дозаряжается до напряжения источника питания и остается в таком состоянии до прихода, следующего запускающего импульса.

Линия задержки на оптооттранзисторе V5 в режиме нагрузки не может работать, так как в режиме нагрузки на интервале паузы протекает ток дежурной дуги через баласный реостат R8. Параллельно этому баланскому реостату подключена цепь: диод VD3 – резистор R9 – стабилитрон VD4. Со стабилитрона напряжение подается через сопротивление R10 на светодиод

оптотранзистора V1. Поэтому при горении дуги, оптотранзистор V1 закорачивает конденсатор C27, срывая тем самым работу линии задержки на оптотранзисторе VT5.

В режиме холостого хода, когда через балстный реостат R8 не протекает ток, оптотранзистор V1 находится в непроводящем состоянии. Поэтому линия задержки и, поскольку, время задержки у нее меньше, то импульсы, снимаемые с сопротивления R56 и поступающие на светодиод оптотиристора V15, будут открывать этот тиристор. А он в свою очередь будет открывать тиристор VS9. При открытии тиристора VS9, конденсатор C19 резонансно заряжается через первичную обмотку трансформатора Tr3. Импульсы со вторичной обмотки поступают в тиристор VS5, обеспечивая тем самым перезаряд коммутирующего конденсатора C2 от источника питания, минуя дугу.

С момента включения гибридного тиристора V15 начинают работать линия задержки, определяющая длительность основной паузы и релаксационный генератор VT1 определяющий частоту вспомогательных импульсов. За время основной паузы релаксационный генератор, выполненный на однопереходном транзисторе VT1, успевает многократно сработать. При этом каждый раз, при заряде конденсатора C16 до напряжения пробоя перехода эмиттер-база однопереходного транзистора VT1, происходит его мгновенный разряд на сопротивление R29. При этом через светодиоды V9 и V4 протекает импульс тока. Светодиоды V9 и V4 одновременно: включают оптотиристор V9 который запускает линию задержки на оптотиристор V4, а V4 отпирает VS6. Триггер переходит в другое устойчивое состояние, при этом конденсатор C10 триггера резонансно перезаряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора Tr5. При этом VS6 остается открытым, а конденсатор перезаряжается с “+” на правой обкладке.

Импульсы со вторичной обмотки трансформатора Tr5 поступают на силовые тиристоры VS1 и VS2 которые откроются и начнет протекать вспомогательный импульс сварочного тока; оптотиристор V9 разрядит

конденсаторы C23 и C24 и начнется заряд конденсатора C23 по цепи: R48 – R47 – VD61 до пробивного напряжения эмиттер-база оптоотристора VT4. В это время определяется длительность вспомогательного импульса. При пробое перехода, конденсатор C23 мгновенно частично разрядится на сопротивление R50. При этом импульс тока через светодиод оптоотиристора V6 кратковременно откроет оптоотиристор V6. А он в свою очередь откроет тиристор VS7 триггера. При этом триггер перейдет в другое устойчивое состояние. Тиристор VS7 останется открытым, а тиристор VS6 перейдет в непроводящее состояние. Конденсатор C10 резонансно перезарядится через первичную обмотку импульсного трансформатора Тр4 и останется с “+” на левой обкладке. Импульс со вторичной обмотки трансформатора поступит на вспомогательный тиристор VS3, что приведет к выключению вспомогательного импульса сварочного тока, и одновременно на светодиод оптоотристора V3, что приведет в конечном итоге к включению тиристора VS4 и перезаряду коммутирующего конденсатора C2 от источника питания через дуговой промежуток.

Количество вспомогательных импульсов определяется как частотой их следования; так и длительностью основной паузы. Длительность основной паузы определяется временем заряда конденсатора C17 по цепи: VD51 – R32 – R31 до пробивающего напряжения перехода эмиттер-база однопереходного транзистора гибридного тиристора V15. При пробое перехода, конденсатор C17 разрядится на сопротивление R34. При этом одновременно отпирается гибридный тиристор V15 и остается в открытом состоянии. Выключается гибридный тиристор V16 и на его аноде появляется напряжение, от которого начинается заряд конденсатора C20, то есть начинается отсчет основного импульса сварочного тока.

Импульс тока через светодиод оптоотристора V11 запускает линию задержки на однопереходном транзисторе VT2 с малой длительностью задержки, необходимой для синхронизации момента включения основного и вспомогательного импульсов. Импульс тока с выхода этой линии через

светодиод оптодиода V21 поступает на вход триггера на тиристоры VS6 и VS7. С выхода этого триггера поступает импульс на включение силовых тиристоров. Начинает протекать основной импульс сварочного тока. Далее повторяется

Схема управления обратной связью предназначена для регулировки длительности импульсов и паузы. Если  $U_z > U_d$  то ток протекает по цепи: “+” – П1 – ШР34 –  $U_z$  – VD32 – R17 – VD33 – VD34 – “-”. Если тумблер T1 замкнут, то ток после сопротивления R17 пойдет по цепи: T1 – R18 – R19 – V17 и подсветит светодиод оптодиода V7. Сопротивление на оптодиодисторе будет уменьшаться и поскольку он шунтирует регулируемое сопротивление R31, то общее сопротивление в цепи заряда конденсатора C17 будет уменьшаться, то есть будет уменьшаться длительность паузы.

Если  $U_z < U_d$  то ток будет протекать по цепи: “+” – VD30 – VD31 – ШР38 – VD36 – R22 – VD35 – батарейка – “-”. Если тумблер T2 замкнут, то после сопротивления R22 ток потечет через светодиод оптодиода V8 – T2 – R23 – “-”. Сопротивление на оптодиодисторе будет уменьшаться и поскольку он шунтирует регулируемое сопротивление R40 то общее сопротивление в цепи заряда конденсатора C20 будет уменьшаться, то есть будет уменьшаться длительность импульсов.

Выводы по четвертой главе.

Схема силовой части представляет собой импульсно-регулируемое сопротивление – балластный реостат, зашунтированный тиристором со схемой двухступенчатой принудительной коммутацией последовательного типа, обеспечивающей коммутацию сварочного тока с амплитудой до 600 А и частотой 250 Гц.

Схема обратной связи контролирует напряжение дугового промежутка по среднему значению напряжения дуги на интервале одного периода импульса и реализует частотно-импульсную модуляцию второго рода.

Система импульсного питания осуществляет стабилизацию напряжения дуги в импульсном режиме при мгновенных колебаниях сварочной ванны.

Система обеспечивает экономичный режим на холостом ходу работая на малых частотах.

## 5 Эксперимент и его результаты

Для проведения эксперимента примерным расчётом в первом приближении были выбраны следующие параметры сварки:  $U=14$  В,  $I=80$  А, скорость подачи присадочного материала  $v_{п}=60$  см/мин, скорость вращения стола  $v_{вр}=0,8$  об/мин. Результаты наплавки приведены на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Первое приближение выбора параметров режима наплавки

При визуальном осмотре шва наблюдаются признаки кипения металла при наплавке, широкая область термического влияния и наплавленного слоя. Было принято решение увеличить ток  $I$  до 100 А и скорость вращения стола  $v_{вр}$  до 1,2 об/мин. Результаты второй итерации приведены на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Второе приближение выбора параметров режима наплавки

Анализируя этот шов можно сказать, что зона термического влияния увеличилась в сравнении с первой итерацией, но качество шва улучшилось, соответственно количество расплавляемого присадочного материала и скорость сварки соответствует энергетическим вложениям. Однако шов

получается слишком широким. Было принято решение уменьшить напряжение дуги  $U$  до 10 В с сохранением прочих параметров. Результаты итоговой итерации представлены на рисунке 5.3. В этом случае ширина шва удовлетворяет требуемым параметрам. Шов получается однородным с точки зрения геометрии и при визуальном осмотре шва не наблюдается дефектов. Параметры для наплавки приведены в таблице 5.1.



Рисунок 5.3 – Шов выполненный на оптимальных параметрах наплавки

Таблица 5.1 – Параметры режима наплавки

Напряжение дуги $U$ , В	Сила тока $I$ , А	Скорость сварки $v_{вр}$ , об/мин	Скорость подачи присадочного материала $v_{п}$ , см/мин
10	100	1,2	60

Далее была выполнена наплавка на несколько оборотов манипулятора. При проходе на один оборот сварочная головка смещается на высоту примерно равную высоте одного слоя. С каждым последующим слоем труба начинает нагреваться, теплоотвод с наплавки уменьшается и ванна начинает вести себя нестабильно. При наплавке слоёв, идущих после первого, система АРНД реагирует на неровности предыдущего слоя, и система вертикального привода начинает колебаться, пытаясь выровнять напряжение дуги. При

визуальном осмотре наплавки не замечено сильных отклонений ширины слоёв друг от друга. Отклонения от предполагаемых размеров отличаются на 20%, это может быть связано с погрешностью расчёта тепловых расчётов, расчётов на угар проволоки и отклонениями дуги от зоны подключения питания.

Выводы по пятой главе.

Путем последовательного подбора параметров режима был найден режим, при помощи которого можно осуществлять стабильную послойную наплавку.

В процессе сварки выяснилось, что необходимо иметь две системы автоматического регулирования: при переходе от слоя к слою в зоне нечувствительности на нескольких периодах импульса, в зоне нечувствительности с помощью системы импульсного питания.

В процессе эксперимента выяснилось, что по мере наложения слоёв происходит накопление тепла, при этом необходимо разработать коррекцию режимов. Система по мгновенным колебаниям ванны позволяет снижать режим при переходе от слоя к слою.

## **6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **6.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Выпускная квалификационная работа по теме «Повышение эффективности аддитивного электродугового процесса за счёт импульсного управления» выполняется в рамках научно-исследовательской работы для организации. Заинтересованными лицами в полученных данных будут являться сотрудники организации.

Суть работы заключается в исследовании и разработке процесса сварки неплавящимся электродом в аргоне дугой, подающей питание одиночным импульсом. В таблице 6.1 приведены сегментные показатели рынка для рассматриваемых способов сварки.

Таблица 6.1 – Сегментирование рынка

	Показатели		
	Низкий показатель	Средний показатель	Высокий показатель
Качество сварного шва	3	2	1
Скорость сварки	2,3	2	1
Возможность сварки тонкостенных труб малого диаметра	3	2	1,2

где 1 – Автоматическая аргонодуговая сварка в импульсном режиме; 2 – полуавтоматическая аргонодуговая сварка; 3 – ручная дуговая сварка.

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

## 6.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Для этого составлена оценочная карта, приведенная в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

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

где сокращения: Б<sub>ф</sub> – Сварка неплавящимся электродом в аргоне дугой, горячей в импульсном режиме; Б<sub>к1</sub> – Аргонно-дуговая сварка; Б<sub>к2</sub> – Ручная дуговая сварка.

Анализ конкурентных технических решений определили по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (6.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V<sub>i</sub> – вес показателя (в долях единицы);

B<sub>i</sub> – балл i-го показателя.

Таким образом, конкурентоспособность разработки составила 5, в то время как двух других аналогов 2,35 и 3,75 соответственно. Результаты

показывают, что данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной и имеет преимущества по таким показателям, как удобство в эксплуатации, затраты на сварочные материалы, качество сварного соединения, цена и предполагаемый срок эксплуатации. Итогом данного анализа является то, что метод, предложенный в нашей научно-исследовательской работе эффективнее методов конкурентов.

### 6.3 SWOT – анализ

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

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

Результатом проведения SWOT анализа предприятия является план действий с указанием сроков выполнения, приоритетности выполнения и необходимых ресурсов на реализацию (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Отсутствие данного процесса для повышения эффективности сварки неплавящимся электродом (отсутствие конкурентов на рынке).</li> <li>– Широкая область применения</li> <li>– Использование современного оборудования</li> <li>– Актуальность проекта</li> <li>– Наличие опытного руководителя</li> <li>– Экономия электроэнергии</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Развитие новых технологий</li> <li>– Перенастройка оборудования</li> <li>– Отсутствие квалифицированного персонала.</li> </ul>

### Продолжение таблицы 6.3

Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"><li>– Получение качественных сварных соединений</li><li>– Регулирование производительности</li><li>– Повышение стоимости конкурентных разработок</li><li>– Повышение эффективности сварки неплавящимся электродом</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Появление новых технологий</li><li>– Государство не даст средства для реализации темы.</li><li>– Введение дополнительных государственных требований и сертификации программы.</li><li>– Зависимость, незначительная от поставщика</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>– Применения для оборудования работающего в полевых условиях.</li></ul>	

Периодичность проведения SWOT анализа. Рекомендуется проводить SWOT анализа минимум 1 раз в год в рамках стратегического планирования и при формировании бюджетов. SWOT анализ очень часто является первым шагом бизнес-анализа при составлении маркетингового плана.

### **6.4 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований**

Морфологический подход основан на систематическом исследовании всех теоретически возможных вариантов, вытекающих из закономерностей строения (морфологии) объекта исследования. Синтез охватывает как известные, так и новые, необычные варианты, которые при простом переборе могли быть упущены. Путем комбинирования вариантов получают большое количество различных решений, ряд которых представляет практический интерес (табл. 6.4).

Реализация метода предусматривает следующие этапы:

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

Таблица 6.4 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

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

Возможные варианты решения технической задачи:

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

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

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

## 6.5 Планирование научно-исследовательских работ

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

### 6.5.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для разработки структуры работ необходимо определить их этапы, представленные в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	5	Календарное планирование работ	
Теоретические исследования	6	Изучение литературы по теме	Студент
	7	Подбор нормативных документов	
	8	Изучение установки	
Оценка полученных результатов	9	Анализ результатов	Научный руководитель, студент
	10	Вывод по цели	Научный руководитель, студент

### 6.5.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

Трудоёмкость выполнения работ определяется по формуле:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{минi} + 2t_{маxi}}{5} \quad (6.2)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (6.3)$$

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

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

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

### 6.5.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (6.4)$$

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

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

$k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (6.5)$$

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

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

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

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

Все рассчитанные значения вносим в таблицу (табл. 6.6).

После заполнения таблицы 6.6 строим календарный план-график (табл. 6.7).

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 6.6 – Временные показатели проведения научного исследования

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

Таблица 6.7 – Календарный план-график проведения ВКР по теме

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

★ – студент; ◆ – руководитель.

## 6.5.4 Расчёт материальных затрат НИИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (6.5)$$

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

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

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

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

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты представлены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Материальные затраты

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

## 6.5.5 Основная и дополнительная заработная плата

Расчет основной заработной платы сводится в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Составление и утверждение темы	Руководитель	2	2	2	3,6			8	8	8
2	Анализ актуальности темы	Студ.-рук.	1	1	1	4,4			5	5	5
3	Поиск и изучение материала по теме	Студ.-рук.	1	1	1	4,4			5	5	5
4	Выбор направления исследований	Руководитель	1	2	2	3,6			4	8	8
5	Календарное планирование работ	Руководитель	2	2	2	3,6			8	8	8
6	Изучение литературы по теме	Студент	10	10	10	0,8			8,9	8,9	8,9
7	Подбор нормативных документов	Студ.-рук.	3	4	4	4,4			14,8	19,7	19,7
8	Изучение установки	Студент	4	6	6	0,8			3,6	5,4	5,4
9	Модернизация установки	Студент	2	3	4	0,8			1,8	2,7	3,6
10	Анализ результатов	Студ.-рук.	2	2	2	4,4			9,8	9,8	9,8
11	Вывод по цели	Студент	3	3	3	0,8			2,7	2,7	2,7
Итого:									71,6	83,2	84,1

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

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

$$Z_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (6.6)$$

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

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

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

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (6.7)$$

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

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

#### **6.5.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)**

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (6.8)$$

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

Сумма отчислений во внебюджетные фонды представлена в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Отчисления во внебюджетные фонды

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

### 6.5.7 Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (6.9)$$

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

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

Далее формируется расчёт бюджета затрат научно-исследовательского проекта (таблица 6.11).

Таблица 6.11 – Расчёт бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	3770	3848	3900	Таблица 6.8
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	68200	80400	81400	Таблица 6.10
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8184	9648	9768	Таблица 6.10
4. Отчисления во внебюджетные фонды	23068	27195	27533	Таблица 6.10
5. Накладные расходы	16516	19375	19616	16 % от суммы ст. 1-4
6. Бюджет затрат НТИ	119738	140466	142217	Сумма ст. 1-5

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (6.10)$$

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

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

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{119738}{142217} = 0,84; \quad I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{140466}{142217} = 0,99;$$
$$I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{142217}{142217} = 1.$$

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

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (6.11)$$

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

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

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки,

устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 6.12).

Таблица 6.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

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

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

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

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

$$I_{исп.i.} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}}, \quad (6.12)$$

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

Сравнительная эффективность проекта (таблица 6.13):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.i}}{I_{исп.max}} \quad (6.13)$$

Таблица 6.13 – Сравнительная эффективность разработки

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

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

## **7 Социальная ответственность**

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

В данной работе рассмотрено исследование формирования структуры мартенситно-старяющей стали в процессе вакуумной электронно-лучевой наплавки, данный эксперимент проводится в офисных помещениях 16а корпуса НИ ТПУ, кабинета 112. В ходе научной работы была выполнена с использованием ЭВМ, а также специальных электронных оборудований для проведения испытания, поэтому в данном разделе ВКР рассматриваются вопросы анализа и выявления возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте инженера-лаборанта. Площадь занимаемого помещения составляет 40 м<sup>2</sup>, на которых располагаются 6 человек.

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях функционально взаимосвязанных средств производства (оборудования, оснастки, предметов труда и др.), необходимых для осуществления трудового процесса.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание и охране окружающей среды, а в частности, организации безотходного производства.

Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в городе Томске, наиболее типичной ЧС

является мороз. Так же, в связи с беспокойной ситуацией в мире, одной из возможных ЧС может быть диверсия.

### **7.1 Анализ выявленных вредных факторов**

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего человека в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности. В результате идентификации выявлены следующие вредные производственные факторы:

- электромагнитные поля в производственных помещениях;
- производственный шум;
- освещенность рабочей зоны;
- микроклимат в помещении.

### **7.2 Электромагнитные поля в производственных помещениях**

Основным вредным фактором является электромагнитное поле (ЭПМ). Находясь в электромагнитном поле, человек поглощает его энергию, в тканях возникают высокочастотные токи с образованием теплового эффекта.

Биологическое действие электромагнитного излучения зависит от длины волны, напряженности поля, длительности и режима воздействия. При воздействии на человека электромагнитного поля возникают нарушения электрофизиологических процессов в центральной нервной и сердечно-сосудистой системах. Функций щитовидной железы, генеративной функции организма.

Основными источниками электромагнитного излучения во время разработки проекта были электронный ускоритель, ЭВМ, а также электронный микроскоп и испытательная машина.

Согласно [16], временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ, составляют:

- напряженность электрического поля в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц, 25 В/м,
- напряженность электрического поля в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц, 2,5 В/м,
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 5 Гц- 2 кГц, 250 нТл,
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц, 25 нТл,
- электростатический потенциал экрана видеомонитора – 500 В.

Согласно СанПиН 2.2.4.1191-03 Предельно допустимые уровни облучения:

- при 8-часовой работе ПДУ магнитного поля составляет 10 мкВт/см<sup>2</sup>,
- при 2-часовой работе 10-100 мкВт/см<sup>2</sup>,
- при 20-минутной работе > 100 мкВт/см<sup>2</sup>.

Исходя из исследования [14], безопасным расстоянием от токоведущего кабеля до жизненно важных органов сварщика являются расстояния 0,1; 0,25 и 0,35 м при токах 200, 300 и 400 А соответственно. Экспериментальные исследования показали, что индукция поля вблизи корпуса выпрямителя ВДУ-506 при токах до 400 А на порядок ниже ПДУ. Это связано с тем, что выпрямитель экранируется металлическим корпусом.

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется посредством средств коллективной защиты:

- защита временем,
- защита расстоянием,
- снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения,
- экранирование источника заземленным металлическим ограждением.

Так же применяют средства индивидуальной защиты, которые включают в себя очки из металлической решетки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами. Экранирование источника излучения и рабочего места осуществляется специальными экранами по ГОСТ 12.4.154.

К средствам защиты от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят комбинезоны, очки, спецобувь, заземляющие браслеты, заземляющие устройства, устройства для увлажнения воздуха, антиэлектростатические покрытия и пропитки, нейтрализаторы статического электричества.

Основным коллективным средством защиты от воздействия ЭМП является экранирование источника электромагнитного излучения или же объекта защиты. При возможности эффективной защитой является удаление источника излучения из рабочей зоны. В качестве средств индивидуальной защиты, при значительном действии электромагнитного поля, используют одежду, которая изготавливается из металлизированной ткани или другой ткани с высокой электропроводностью. Ограничение времени пребывания в зоне действия ЭПМ так же является эффективной защитой.

К средствам защиты от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят комбинезоны, очки, спецобувь, заземляющие браслеты, заземляющие устройства, устройства для увлажнения воздуха, антиэлектростатические покрытия и пропитки, нейтрализаторы статического электричества.

В процессе выполнения научного исследования не были превышены нормы СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года) [14].

### 7.3 Производственный шум

Шум является общебиологическим раздражителем и в некоторых условиях может оказывать влияние на системы организма человека. Шум на рабочем месте инженера-лаборанта возникает от работы ПК, а также может проникать извне. Длительное воздействие шума большой интенсивности приводит к патологическому состоянию организма, к его утомлению.

Интенсивный шум вызывает изменения сердечно-сосудистой системы, сопровождаемые нарушением тонуса и ритма сердечных сокращений, изменяется артериальное кровяное давление.

Методы установления предельно допустимых шумовых характеристик стационарных машин изложены в межгосударственном стандарте ГОСТ 12.1.003-2014 "Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности" [15].

Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в дБ, в октавных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром, для офисных помещений уровень звукового давления должен не превышать 82 дБА (по СанПиН 3359-16) [16].

Дополнительные средства для коллективной защиты (СКЗ) от шума извне могут служить современные пластиковые окна и шумоизоляционные панели стен.

Сама панель – это многослойная конструкция (триплекс). Сам ее каркас выполнен из композита на основе натуральных целлюлозных волокон. Плоские слои разделены пространством, которое обеспечивают волнообразные переемычки, по типу гофрированного картона. Все пустоты внутри панели заполнены минеральным гранулятом на базе очищенного кварцевого песка

Шум от работы ПК можно понизить, используя малошумные вентиляторы охлаждения, либо водяное охлаждение системного блока.

В качестве средств индивидуальной защиты (СИЗ) можно использовать не дорогие шумопоглощающие наушники. Так же источниками шума в лаборатории могут быть работающие микроскопы и испытательные аппараты, для этого рекомендуется защита в виде беруш или специальных наушников.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной защиты:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко – и вибропоглощающие материалы (резины и мастики, фольгоизол, листовые пластмассы; звукоизоляционные материалы с волокнистым каркасом, ячеистые, смешанные);
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

#### **7.4 Освещённость рабочей зоны**

Согласно СП 52.13330.2016 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общегоосвещения не должна быть ниже 200 лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

Освещение рабочего места – важный фактор создания нормальных условий труда. Согласно СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [17], рабочее место инженера должно освещаться как естественным, так искусственным

освещением. Естественное освещение попадает в аудитории через большое окон светлое время суток. Естественное освещение по своему спектральному составу является наиболее приемлемым. Искусственное освещение отличается относительной сложностью восприятия его зрительным органом человека.

Слабая освещенность рабочего места инженера не только уменьшает остроту зрения, но и вызывает утомление организма в целом, что приводит к снижению производительности труда и увеличению опасности заболеваний человека. Поэтому с целью обеспечения требуемых норм освещенности необходимо произвести расчет искусственной освещенности. Для расчета общего равномерного освещения при горизонтальной рабочей поверхности основным является метод светового потока (коэффициента использования), учитывающий световой поток, отраженный от потолка и стен. При работе с персональным компьютером в сочетании с нормативной работой и технической документацией согласно действующим нормам СП 52.13330.2016 [17] для искусственного освещения регламентирована наименьшая допустимая освещенность, а для естественного и совмещенного определены коэффициенты естественной освещенности (КЕО).

Нормативное значение КЕО для третьего пояса светового климата (расположение города Томска) в соответствии с СП 52.13330.2016 [17] при третьем разряде зрительной работы (III г: контраст малый и средний, фон - светлый и средний), при естественном боковом освещении КЕО,  $e_n = 1,2 \%$ , освещенность при искусственном освещении – 200 лк, ослепленность 40 ед. и пульсации искусственного освещения не более 15 %. Рекомендуемая освещенность для работы с экраном дисплея составляет 200 лк, а при работе с экраном в сочетании с работой с документами 400 лк согласно СП 52.13330.2016[17].

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента

светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. [18]

Для расчета принимаем что длина помещения  $A=5$  м, а ширина  $B=8$  м, высота  $H=3,5$  м. Высота рабочей поверхности  $h_p = 0,8$  м. Требуемая освещенность по СНиП 23-05- 95  $E= 400$  лк.

Коэффициент отражения стен  $R_c = 50 \%$ , потолка  $R_p = 70 \%$ .

Коэффициент запаса  $k = 1,5$ , коэффициент неравномерности  $Z=1,1$

Рассчитаем систему общего люминесцентного освещения.

Выбираем светильник типа ОД,  $\lambda = 1,4$ . принимаем высоту подвеса светильника от уровня потолка  $h_c= 0,2$  м; получаем высоту подвеса светильника над расчетной поверхностью  $h = 3,5-0,8-0,2=2,5$  м;

Определим расстояние между рядами светильников, используя соотношение:

$$L = \lambda * h, \quad (7.1)$$

$$L = 1,4 * 2,5 = 3,5 \text{ м.}$$

При ширине помещения  $A = 5$  м, получаем число рядов светильников:

$$n = A/L = 5/3,5 = 1,4 \sim 2. \quad (7.2)$$

Определим число светильников в одном ряду:

$$N_p = (B-2l)/l_{\text{св}}, \quad (7.3)$$

где  $l_{\text{св}}$  – длина светильника, для светильника типа ОД–2–40  $l_{\text{св}} = 1,23$  м.

$$N_p = (8-2*1,17)/1,23 = 4,6 \sim 4.$$

Таким образом, общее число светильников  $N$ :

$$N = N_p * n, \quad (7.4)$$

$$N = 4 * 2 = 8.$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильников типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1230мм и шириной 266 мм), при этом разрывы между светильниками в ряду составят (50...500) см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рис. 7.1). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $N = 8*2=16$ .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = S / h(A + B), \quad (7.5)$$

$$i = 40 / [2,5 \cdot (5 + 8)] = 1,23.$$

Расчетным уравнением метода коэффициента использования светового потока является [17]:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta}, \quad (7.6)$$

По таблицам [18] определяем коэффициент использования светового потока для данной формулы  $\eta = 0,53$ . Отсюда получаем:

$$\Phi = \frac{400 \cdot 40 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 0,53} = 3113 \text{ лм.}$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов. По таблице 1 [19] выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛБ 40 Втс потоком 3200 лм. Делаем проверку выполнения условия [19]:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{ст} - \Phi_{расч}}{\Phi_{ст}} \cdot 100\% \leq 20\%. \quad (7.77)$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$-10\% \leq \frac{3200 - 3113}{3200} \cdot 100\% \leq 20\%.$$

$$-10\% \leq 2,7\% \leq 20\%.$$

Потребляемая мощность осветительной установки составит:

$$P = 16 \cdot 40 = 640 \text{ Вт.}$$

Таким образом, выбранная система освещения обеспечивает требуемую освещенность рабочего места. К дополнительным мерам, можно отнести использование местного освещения на рабочих местах (настольные лампы).

Для схематического изображения размещения светильников необходимо рассчитать расстояние вдоль стен и от торца помещения:

$$L = Na \cdot L_1 + 2/3 \cdot L_1 + N \cdot L_1;$$

Соответственно расстояние до лампы от стены длиной 8 м  $L_1$ , а для расстояния от стены длиной 5 м  $L_2$ .

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

Составим уравнение с 1 неизвестной:

$$5000 = L_1 + 2/3 * L_1 + 2 * 266,$$

$$8000 = 3 * L_2 + 2/3 * L_2 + 4 * 1230,$$

отсюда:

$$5000 - 2 * 266 = L_1 * (1 + 2/3),$$

$$8000 - 4 * 1230 = L_2 * (3 + 2/3).$$

Следственно получаем уравнения:

$$L_1 = \frac{5000 - 2 \cdot 266}{1 + 2/3} = 2600 \text{ мм} - \text{расстояние вдоль помещения,}$$

$$L_2 = \frac{8000 - 4 \cdot 1230}{3 + 2/3} = 840 \text{ мм} - \text{расстояние от торцов помещения.}$$

Размещаем светильники в 2 ряда по 4 светильника. На рисунке 7.1 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

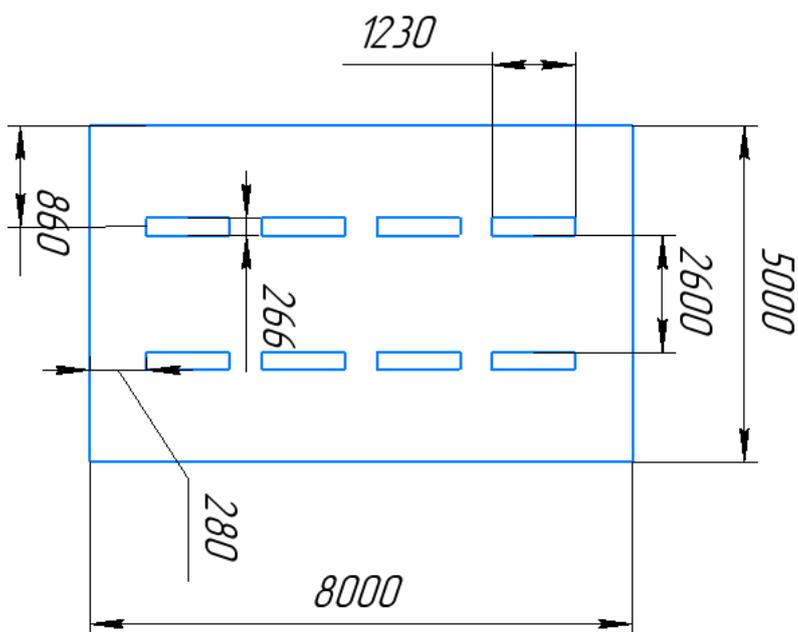


Рисунок 7.1 – План размещения светильников с люминесцентными лампами, размеры установлены в мм

## 7.5 Микроклимат в помещении

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды помещения, который определяется влияющими на человека сочетаниями температуры, влажности и скорости перемещения воздуха, а также температуры окружающих предметов ГОСТ Р 2.2.2006-05. Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда [20]. Согласно ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны, оптимальные микроклиматические условия создают общее и локальное ощущение теплового комфорта во время восьмичасового рабочего дня, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают условия для высокой производительности труда.

Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны должны отвечать ГОСТ 12.1.005-88 [21]. Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости перемещения воздуха приведены в таблице 7.1 и 7.2 [21].

Таблица 7.1 – Оптимальные параметры микроклимата

Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
19-22	40-60	0,2

Таблица 7.2 – Допустимые параметры микроклимата

Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
15-28	20-80	0,5

В нашем случае рассматривается рабочий кабинет размерами 8х5 м, как показано на рисунке 19, высота кабинета 3,5 м.

Согласно, установленным размерам рабочего кабинета в нем располагается 6 человек. Объем помещения 140 м<sup>3</sup>, общая площадь 40 м<sup>2</sup>, тогда

на одного человека приходится  $23,3 \text{ м}^3$  и  $6,7 \text{ м}^2$ , соответственно, что удовлетворяет санитарным требованиям помещения.

Объем и площадь производственного помещения, которые должны приходиться на каждого работающего, по санитарным нормам –  $20 \text{ м}^3$  и  $6,5 \text{ м}^2$ , соответственно. Высота помещения должна быть не менее 3 м [21].

Для категории работ I(б), к которым относится работа лаборанта, характерны такие работы, интенсивность энергозатрат которых равна  $121\text{--}150 \text{ ккал/ч}$  ( $140\text{--}174 \text{ Вт}$ ), это работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторыми физическими напряжениями.

Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года применяется водяное отопление, а в теплый период года для обеспечения защиты от попадания прямых солнечных лучей применяются жалюзи.

Одними из основных мероприятий по оптимизации микроклимата и состава воздуха в производственных помещениях являются обеспечение надлежащего воздухообмена с использованием механической приточно-вытяжную вентиляции, тепловая изоляция нагретых поверхностей оборудования, воздухопроводов и трубопроводов.

Во время разработки устройства для сварки дугой, горячей в импульсном режиме в 16а корпусе ТПУ микроклимат, отвечал нормам, изложенным ниже.

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

## **7.6 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды**

### **7.6.1 Факторы электрической природы**

Все оборудование должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [25].

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

– помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность,

– помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой,

– особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования свыше 1000 В и до 1000 В при наличии двух и более из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям.

Комната, в которой выполнялась работа, относится к категории помещений без повышенной опасности, поскольку она характеризуется следующими признаками: температура воздуха и влажность в норме, а также электрооборудование и электрические сети выполнены в соответствии

с «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) и оборудование используемое в помещении и там преобразуется входящее переменное напряжение в постоянный ток напряжением +3,3 В, +5 В, +12 В Но в процессе деятельности с ЭВМ и электронных микроскопов и испытательных машин, работающих от источника тока, может возникнуть опасность поражения электрическим током. Основными причинами этого могут послужить следующие факторы: прикосновение к токоведущим частям или прикосновение к металлическим конструктивным частям, оказавшимся под напряжением. Для предотвращения опасности поражения электрическим током следует соблюдать правила электрической безопасности:

- перед включением ЭВМ в сеть, необходимо визуально проверить ее электрическую часть, на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие токопроводящих частей на корпусе компьютера,

- рабочее место инженера с ЭВМ, электронных микроскопов и испытательных машин, не должны быть размещены вблизи силовых кабелей и высоковольтных трансформаторов,

- ЭВМ, электронный микроскоп и испытательная машина, подключается через блок питания или питающее устройство, которые имеют сетевой фильтр, конденсаторы которого предназначены для шунтирования через провод зануления, и соответствующие трехполосные вилку и розетку высокочастотных помех питающей сети на землю,

- при выявлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической цепи ЭВМ, электронный микроскоп или испытательную машин,

- запрещается подключать корпус ЭВМ к батареям отопления, т.к. при неисправности источника питания ЭВМ батареи могут оказаться под напряжением,

- запрещается при работающей ЭВМ в то же время прикасаться к приборам, имеющим естественное заземление.

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

В корпусе 16а ТПУ используются следующие защитные меры от поражения электрическим током при работе с электроустановками:

– защитное заземление – предназначено для предотвращения «замыкания на корпус» в «замыкание на землю» с тем, чтобы уменьшить напряжение прикосновения и напряжение шага до безопасных величин (выравнивание самый распространенный способ защиты от поражения электрическим током),

– зануление при замыкании на корпус электроустановок – отключение участка электрических цепей,

– системы защитного отключения – отключение электроустановок в случае проявления опасности пробоя на корпус,

– защитное разделение сетей,

– предохранительные устройства.

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

Сейчас безопасным для человека считается напряжение электрической сети 42 В (до недавнего времени – было 36 В), используемое для переносных осветительных и бытовых приборов на воздухе и в доме и 12 В, при условии использования переносных светильников и приборов внутри котлов, металлических резервуаров и пр.

Допустимым же для человека током принято считать силу тока, при которой он самостоятельно может освободиться от его воздействия. И он так допуски будут соответствовать  $I = 0.1 \text{ А}$ , а  $R_{\text{заземления}}$  – не более 4 Ом.

Максимально допустимая величина тока, проходящего через тело человека, зависит от времени его воздействия. Для тока переменного, с его частотой 50 Гц допустимое напряжение прикосновения по ГОСТ12.1.038-82 составляет всего 2 В, а сила тока - всего 0,3 мА [26]. Для постоянного тока – допустимое напряжение прикосновения всего-то 8В, при силе тока в 1,0 мА (данные приведены для времени воздействия менее 10 мин в сутки).

Безопасные для человека уровни напряжения электрической сети в доме получают из нашей бытовой осветительной сети напряжением 220 В, используя при этом понижающие трансформаторы, или напрямую – используя для этого аккумуляторные батареи номинальным напряжением 12 и 24 В.

Так как используется оборудование с напряжением до 1000 В то применяются следующие СИЗ:

В условиях работы на оборудовании с напряжением, не достигающим 1000 В, используются:

- специальные прорезиненные перчатки, выполненные с использованием современным полимеров, которые способны длительное время выдерживать большое напряжение,

- изолирующие штанги, выполненные с использованием диэлектрического металла, которые прикрепляются к источнику электричества и служат в качестве основного заземлителя, в результате чего обеспечивается безопасная работа,

- специальные клещи, которые могут использоваться в места. Где применение штанги невозможно. С помощью данных клещей также осуществляются ремонтные мероприятия; специальное оборудование с указателями напряжения, для измерения силы и напряжения тока,

- специальное оборудование с указателями напряжения, для измерения силы и напряжения тока.

Также используются дополнительные средства защиты. К материалам, которые применяются в качестве дополнительных устройств с оборудованием при напряжении менее 1000 В относятся:

- специальная прорезиненная обувь, выполненная с применением современных полимеров, которая надежно обеспечивает защиту персонала,
- подставки, выполненные из дерева для осуществления работы с оборудованием без использования штатного заземления,
- специальные лестницы, выполненные из не проводимого металла, которые применяются при проведении работы на определенной высоте.

При выполнении мер защиты в электроустановках напряжением до 1 кВ классы применяемого электрооборудования по способу защиты человека отпоражения электрическим током по ГОСТ 12.2.007.0-75 «ССБТ Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» [21] следует принимать в соответствии с таблицей 7.3.

Таблица 7.3 – Применение электрооборудования в электроустановках напряжением до 1 кВ.

Класс по ГОСТ12.2.00 7.0 РМЭК536	Маркировка	Назначение защиты	Условие применения электрооборудования в электроустановке
Класс 0	-	При косвенном прикосновении	1. Применение в непроводящих помещениях. 2. Питание от вторичной обмотки разделительного трансформатора только одного электроприемника
Класс I	Защитный зажим – знак  или буквы РЕ, или желто-зеленые полосы	При косвенном прикосновении	Присоединение заземляющего зажима электрооборудования к защитному проводнику электроустановки
Класс II	Знак 	При косвенном прикосновении	Независимо от мер защиты принятых в электроустановке
Класс III	Знак 	От прямого и косвенного прикосновения	Питание от безопасного разделительного трансформатора

В результате проведенного анализа для предотвращения случаев электротравматизма на рабочем месте, рекомендуется применение электрооборудования класс 0. Помимо этого в качестве дополнительной

защиты использовать сетевые фильтры, источники бесперебойного питания, использование закрытых розеток.

При анализе рабочего места инженера в 16а корпусе ТПУ отклонений от требований, изложенных выше, не выявлено. Использующиеся средства коллективной защиты:

Защитное заземление предназначено для превращения «замыкания на корпус» в «замыкание на землю» с тем, чтобы уменьшить напряжение прикосновения и напряжение шага до безопасных величин (выравнивание самый распространенный способ защиты от поражения электрическим током,

- зануление – замыкание на корпус электроустановок,
- системы защитного отключения – отключение электроустановок в случае проявления опасности пробоя на корпус,
- защитное разделение сетей,
- предохранительные устройства.

К работам на электроустановках допускаются лица, достигшие 18 лет, прошедшие инструктаж и обученные безопасным методам труда. К тому же электробезопасность зависит и от профессиональной подготовки работников, сознательной производственной и трудовой дисциплины. Целесообразно каждому работнику знать меры первой медицинской помощи при поражении электрическим током. Безопасные номиналы  $I=0,1$  А,  $U=(12-36)$  В,  $R_{\text{заземления}} = 4$  Ом.

Производственные помещения по степени опасности поражения людей электрическим током в соответствии с ПУЭ подразделяется на три категории. Производственное помещение относится к третьей категории, т.е. к помещениям без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие «повышенную опасность» (агрессивная среда) и «особую опасность» (установки, работающие под напряжением свыше 1000 В).

## 7.6.2 Факторы пожарной безопасности и взрывной природы

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 В4, Г и Д, а здания в свою очередь (как сказано в нормативном документе) - на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории АН, БН, ВН, ГН и ДН.

Для нашего помещения установлена категория пожарной опасности В. Одна из наиболее важных задач пожарной защиты защита помещений от разрушений и обеспечение их достаточной прочности в условиях воздействия высоких температур при пожаре. Учитывая высокую стоимость электронного оборудования 1ба корпуса, а также категорию его пожарной опасности, здания корпуса и части здания другого назначения, в которых предусмотрено размещение ЭВМ, должны быть первой и второй степени огнестойкости. [21] Для изготовления строительных конструкций используются, как правило, кирпич, железобетон, стекло, металл и другие негорючие материалы. Применение дерева должно быть ограничено, а в случае использования необходимо пропитывать его огнезащитными составами [21].

Пожары в корпусах ТПУ представляют особую опасность, так как сопряжены с большими материальными потерями. Характерная особенность 1ба корпуса ТПУ небольшие площади помещений. Как известно, пожар может возникнуть при взаимодействии горючих веществ, окислителя и источников зажигания. В помещениях корпуса присутствуют все три основных фактора, необходимые для возникновения пожара [21].

Горючими компонентами помещения 1ба корпуса являются: строительные материалы для акустической и эстетической отделки помещений, перегородки, двери, полы, перфокарты и перфоленты, изоляция кабелей.

Источниками зажигания в 1ба корпусе могут быть короткое замыкание и перегрев ЭВМ, приборы, применяемые для технического обслуживания,

устройства электропитания, кондиционирования воздуха, где в результате различных нарушений образуются перегретые элементы, электрические искры и дуги, способные вызвать загорания горючих материалов.

В современных ЭВМ очень высокая плотность размещения элементов электронных схем. В непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты. При этом возможно оплавление изоляции. Для отвода избыточной теплоты от ЭВМ служат системы вентиляции и кондиционирования воздуха. При постоянном действии эти системы представляют собой дополнительную пожарную опасность.

Разработана инструкция с мероприятиями по обеспечению пожарной безопасности. Такая инструкция ПБ должна быть размещена на каждом рабочем месте.

На рабочем месте запрещается иметь горючие вещества. В помещениях запрещается:

- зажигать огонь;
- включать электрооборудование, если в помещении пахнет газом;
- курить;
- сушить что-либо на отопительных приборах;
- закрывать вентиляционные отверстия в электроаппаратуре.

Источниками воспламенения являются:

- искра при разряде статического электричества
- искры от электрооборудования
- искры от удара и трения
- открытое пламя

При возникновении пожароопасной ситуации или пожара персонал должен немедленно принять необходимые меры для его ликвидации, одновременно оповестить о пожаре администрацию. Помещения с электрооборудованием должны быть оснащены огнетушителями типа ОУ-2.

На стене рядом с местом расположения огнетушителя должна находиться таблица с номерами телефонов экстренного вызова местной и городской пожарной команды [21].

Помещение инженера-лаборанта соответствует нормам пожарной безопасности. В качестве дополнительных мер по предотвращению пожаров предлагается использовать автоматизированные системы оповещения и пожаротушения.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

## **7.7 Охрана окружающей среды**

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

Для перехода к безотходным производствам в ремонтном цеху необходимо осуществлять сбор (установить контейнеры с обозначенным предназначением), сортировку и прессовку металлолома, огарков с последующей транспортировкой в перерабатывающие предприятия. Также с помощью промышленных пылесборников собрать пыль, и упаковать её и транспортировать на ближайший строительный объект.

Вышедшие из работы лампы, подлежащие переработке, необходимо собирать в коробки (до установленного объема) для транспортировки на перерабатывающее предприятие.

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов. Абразив после очистки швов направлять в строительную промышленность, вольфрамовые электроды – на изготовление крючков и мормышек для рыбаков.

## **7.8 Защита в ЧС**

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приведет к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели на газе (с катализатором). Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась. В здании должен храниться трехдневный запас воды на всех сотрудниках.

В случае отсутствия электроэнергии должны быть предусмотрены генераторы энергии (на дизеле), а также генераторы, способные поддерживать стабильное питание сварочного оборудования.

В сильные морозы возможен выход из строя транспорта. В гаражном парке должны находиться запасные автобусы и микроавтобусы. Также для

перевозки людей в удаленные районы нужно предусмотреть менее габаритные автомобили, способные работать в сильные морозы.

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

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

## Перечень нормативно – технической документации

1. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
3. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах
4. СП 952-72 Санитарные правила организации процессов пайки мелких изделий сплавами, содержащими свинец.
5. ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны
6. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
7. Трудовой кодекс РФ;
8. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования
9. ГОСТ 22269-76. Система «Человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования
10. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
11. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов
12. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования

## **Заключение**

В выполнения магистерской диссертации на основе анализа аддитивных процессов наплавки был выбран процесс электродуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов. Анализ показал, что дуговой аддитивный процесс является наиболее перспективным.

Применение в качестве источника тепла сварочной дуги, позволяет повысить параметры качества и производительности. Так же дуговая наплавка подразумевает использование проволоки, которая гораздо дешевле порошка. Оборудование для дугового аддитивного производства дешевле аналогичного оборудования для лазерного аддитивного производства, а структура наплавки качественнее чем у лазерных методов.

Для реализации выбранного процесса был разработан метод импульсного питания сварочной дуги неплавящимся электродом в аргоне с подачей присадочной проволоки, при котором на интервале основной паузы на сварочную дугу накладываются кратковременные импульсы с частотой не менее 5Гц.

После описания гидродинамических процессов, происходящих в дуговой области и физических процессов в дуге, были рассмотрены рассмотреть зависимость тепловложения от типа дуги (слаботочная и сильноточная).

Анализ процесса наплавки обозначил необходимые для него требования, такие как непрерывность подачи присадочного материала, управление напряжением дуги, непрерывное плавление, стабильность дуги, малые геометрические размеры ванны.

Разработан алгоритм питания дуги. Обозначены основные параметры режима и среднее значение тока при импульсном питании.

Выбранный способ наплавки позволяет: при минимальном значении среднего тока обеспечивать устойчивый процесс горения дуги и минимальные размеры сварочной ванны, обеспечивать возможность автоматической

стабилизации параметров процесса на интервале одного периода следования импульса, обеспечить различные алгоритмы управления и широкий диапазон изменения параметров режима (изменение длительности паузы или импульса). Введение импульсов большой частоты и малой длительности на интервале основной паузы позволяет интенсивно осуществлять дегазацию сварочной ванны и, кроме того, касаясь вопросов социальной ответственности, снижает нагрузку на зрение.

Разработана экспериментальная установка, которая позволяет производить послойную наплавку как тел вращения, так и плоских деталей благодаря манипулятору. Установка обеспечивает автоматический переход к новому слою без вмешательства оператора при орбитальной сварке.

Для реализации модуляции сварочного тока разработан функциональная схема, силовая часть которой представляет собой импульсно-регулируемое сопротивление – балластный реостат, зашунтированный тиристором со схемой двухступенчатой принудительной коммутацией последовательного типа, обеспечивающей коммутацию сварочного тока с амплитудой до 400 А и частотой 250 Гц.

Разработанная схема позволяет контролировать напряжение дугового промежутка на интервале одного периода импульса и реализует частотно-импульсную модуляцию второго рода. Система импульсного питания осуществляет стабилизацию напряжения дуги в импульсном режиме при мгновенных колебаниях сварочной ванны. Также система обеспечивает экономичный режим на холостом ходу работая на малых частотах.

В ходе экспериментов, путем последовательного подбора параметров режима был найден режим, при помощи которого можно осуществлять стабильную послойную наплавку. Эксперименты показали, что необходимо иметь две системы автоматического регулирования: при переходе от слоя к слою в зоне нечувствительности на нескольких периодах импульса, в зоне нечувствительности с помощью системы импульсного питания. По мере наложения слоёв происходит накопление тепла, при этом необходимо

разработать коррекцию режимов. Система по мгновенным колебаниям ванны позволяет снижать режим при переходе от слоя к слою.

Расчёт и анализ ресурсоэффективности и ресурсосбережения показал необходимые для исследования вложения. По сравнению с перспективой использования технологии необходимые финансовые вложения не велики.

В разделе социальной ответственности была проанализирована рабочая обстановка в лаборатории. Оценены вредные факторы и предложены средства индивидуальной и коллективной защиты. Оценены проблемы защиты в ЧС и охраны окружающей среды.

Результаты работы в полной мере показывают необходимость продолжения исследований по данной теме, так как совершенствование технологии аддитивной наплавки в последствии может найти применение для массового производства изделий в промышленных масштабах.

Внедрение разработанной технологии в производство возможно после проведения опытов и различных видов контроля.

## Список использованных источников

1. Зленко М.А., Нагайцев М.В. Аддитивные технологии в машиностроении. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов. – М.: МГТУ, 2006. – 664 с.
3. Безобразов Ю.А., Зотов О.Г. Анализ структуры образцов, полученных DMLS и SLM-методами быстрого прототипирования // 6-я Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург: Урал. – 2012. – С. 154-157.
4. Тимирязев В.А., Использование аддитивных технологий для изготовления деталей машин // Машиностроение. – 2018. – №11. – С. 136-144.
5. Безобразов Ю.А. Анализ структуры образцов, полученных DLMS и SLM методами быстрого прототипирования // Машиностроение. – 2018. – №11. – С. 154-157.
6. Шоек П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. – М.: Энергия. – 1966. – С. 110–139.
7. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
8. Князьков А.Ф., Вережкин А.В., Князьков С.А. Особенности удержания сварочной ванны в положениях отличных от нижнего. // IV Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» г. Томск Изд-во ТПУ, – 2008. – С. 323–328.
9. Князьков В.Л., Князьков А.Ф. Повышение эффективности ручной дуговой сварки трубопроводов. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2008. – 103 с.
10. Барабохин Н.С., Шиганов Н.В. Газодинамическое давление открытой импульсной дуги. // Сварочное производство. – 1976. – №2. – С. 4-6.

11. Столпнер Е.А., Славин Г.А. Методика определения динамического давления импульсной дуги. // Сварочное производство. – 1971. – №9. – С. 8-10.
12. Данилов В.А., Чернышов Г.Г. О механизме воздействия импульса тока на ванну. // Сварочное производство. – 1974. – №4. – С. 54-56.
13. Барабохин Н.С., Шиганов Н.В. Газодинамическое давление открытой импульсной дуги. // Сварочное производство. – 1976. – №2. – С. 4-6.
14. LI X.R., ZHANG Y.M. Monitoring and Control of Penetration in GTAW and Pipe Welding. // Welding Journal. – 2013. – №92. – С. 190-196.
15. Goldschmitz M., Karlsson L., Pedersen R. Developments in the welding of supermartensitic stainless steels: recent developments and applications. // Welding International. – 2004. – №18. – С. 543-549.
16. Lohse M., Trautmann M., Siewert E. Predicting arc pressure in GTAW for a variety of process parameters using a coupled sheath and LTE arc model // Welding in the World. – 2018. – №62. – С. 629-635.
17. Baeva M., Uhrlandt D. Nonequilibrium simulation analysis of the power dissipation and the pressure produced by TIG welding arcs // Welding in the World. – 2019. – №2. – С. 377-387.
18. Семёнов А. П. Методы математического моделирования процессов формирования и переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом (Обзор). // Автоматическая сварка. – 2014. – №10. – С. 3-11.
19. Daehyun B., Hyeong S., Sang-Hu P. Development of an automatic orbital welding system with robust weaving width control and a seam-tracking function for narrow grooves // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – №93. – С. 767-777.

Приложение I  
(справочное)

**Improving the efficiency of the additive electric arc process due to pulse control**

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1ВМ91	Болтрушевич Александр Евгеньевич		06.05.2021

Руководитель ВКР

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Гордынец А.С.	к.т.н., доцент		06.05.2021

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Преподаватель	Цепилова А.В.	к.п.н.		06.05.2021

## **Introduction**

Additive manufacturing (AM) has a series of unmatched advantages traditional subtractive techniques, such as high flexibility, no need for mold, faster response to design and no structural restrictions. High-quality AM methods are not only required under regular conditions but also strongly demanded in vacuum or under sub-atmosphere conditions, such as in the space. The above-mentioned characteristics make AM become a suitable method for fabricating small components with higher geometric complexity, less material and lower time consumption.

**The goal of the present work** is to develop the process of additive surfacing with a non-consumable electrode in the pulse mode and technical means for its implementation.

### **The objectives of the present work are:**

- to analyze the current state of additive process methods and justify the choice of electric arc surfacing;
- to develop an additive surfacing process in the pulse mode;
- to develop a model of the welding bath;
- to suggest welding parameters;
- to develop a special installation;
- to conduct an experimental test.

**The research object** is the process of welding with a non-consumable tungsten electrode in argon.

**The research methods** are development of the process of additive surfacing of a product with a non-consumable electrode in the pulse mode.

**The practical value** of the work lies in the fact that the work uses a method of welding in pulse mode with automatic transition from layer to layer due to an automatic arc voltage regulator.

### **Structure and volume of the work**

The work has 128 pages (excluding appendix) and consists of an introduction, seven basic units, a conclusion, a list of references and appendices.

Each unit consists of several logically interconnected chapters followed by a conclusion where we enumerate the results of our work concerning that unit. Our references consist of 19 sources represented by books of Russian and foreign authors.

## **1.1 The wire and arc additive manufacturing (WAAM) method**

The wire and arc additive manufacturing (WAAM) method based on an indirect arc between two non-consumable tungsten electrodes in confined space has been proposed and preliminarily investigated, which is applicable in vacuum or sub-atmosphere ambient conditions. Visual inspection results showed that the stable burning arc kept continuously melting the metallic wire. Because there is no current flowing through the droplets and molten pool, the important process feature of low heat input was revealed. A cubic boron nitride (CBN) ceramic nozzle is used to force the arc and to produce droplets passing through it for additional constriction and trajectory regulation. The constricted-shielding gas and arc plasma offer fine protection and additional heating for the melted droplets during the whole process. The arc length increased as the gas flow rate rose from 4 L/min to 10 L/min. The arc shapes became dispersed when the gas flow rate exceeded 10 L/min. The arc shapes and droplets transfer process can be improved by the ceramic nozzle. Both of the forming characteristics and metallurgical bonding strength can be dramatically improved. The geometrical dimensions of each layer can be effectively regulated through adjusting wire feed and depositing speed.

Additive manufacturing (AM) has a series of unmatched advantages traditional subtractive techniques, such as high flexibility, no need for mold, faster response to design and no structural restrictions [1]. High-quality AM methods are not only required under regular conditions but also strongly demanded in vacuum or under sub-atmosphere conditions, such as in the space. The above-mentioned characteristics make AM become a suitable method for fabricating small components with higher geometric complexity, less material and lower time consumption [2]. Raw material costs and scrap can be effectively reduced by simplifying the processing procedures, resulting in lower environmental impact and better economic balance. In addition, the additive manufacturing of metallic materials represents the direction of advanced manufacturing technology, as these materials are widely applied on the global market. At present, the widely used AM

technologies include selective laser melting (SLM) and laser melting direct forming (LMDF) taking laser beam as a heat source, and selective electron beam melting and sintering (SEBM, SEBS) taking electric beam as a heat source. These methods fabricate components with high molding precision and material utilization. However, all the mentioned techniques have several disadvantages such as high equipment and usage cost and low manufacturing efficiency, and component size is inevitably limited by the enclosed working envelope. Therefore, increasing number of colleges, universities and research institutes have been focusing on the method of wire arc additive manufacturing (WAAM).

WAAM is based on an incremental principle of layer-by-layer [3], and metallic wire as feed stock to be melted by ignited arc through the Metal Inertia Gas Arc Welding (MIG), Tungsten Inertia Gas Arc Welding (TIG) or Plasma Arc Welding (PAW), and the liquid metal droplets are continuously transferred to the base-plate or a previous layer based on the CAD model to form the metal parts. This technique has a series of advantages like higher efficiency and lower cost-competitive, additionally, metallic wire as feed stock is cleaner and environmentally friendly, which helps to avoid exposing the operators to potentially threatening power environment.

However, Ding and Hönnige J R et al. pointed out that there are still several unresolved problems, such as residual stress and distortion (even the collapse of the beads) caused by excessive heat input or heat accumulation, stair-effecting caused by uneven heating and cooling. Besides, melted droplets transfer trajectory is difficult to control [4]. In addition, the current AM technologies are generally not applicable for the vacuum and sub-atmosphere conditions.

Researches have been extensively carried out to work out the problems. Horger et al. indicated that the hot crack and porosity, for AA5183 during the WAAM process, could be produced with the reheating effect in the multilayer deposition process, and these defects were reduced effectively by controlling excessive heat input. Denlinger et al. pointed out that the residual stress and deformation of titanium and nickel alloy parts processed by additive manufacturing

technology were directly related to the thermophysical properties and interlayer temperature during processing. Wu et al. reduced heat input with low frequency pulse current to fabricate the horizontal structure of Ti-6Al-4V and illustrated that grain size and oxidation of the metal part changed along the direction of construction because of heat accumulation. This phenomenon was more obvious in the first few layers. Wang et al. reported that the mechanical properties exhibited anisotropy along the vertical direction due to changes in temperature gradient and cooling rate during the forming process, and the top of the deposited layers expressed the highest hardness and tensile strength. Gu et al. studied the relationships between heat input, mechanical properties and microstructure during the manufacturing process of Al-Cu-Mg alloy and aimed to minimize cracking during deposition. They pointed out that higher heat input and lower density would significantly increase the cracking tendency. Foteinopoulos et al. pointed out that the residual stresses and distortion caused by the non-homogeneous thermal phenomena (heating and cooling) in the processing of additive manufacturing, which deteriorated the mechanical properties and dimensional accuracy of parts. Therefore, they indicated that the thermophysical process was essential for the manufacturing procedure, which determined parts microstructure, mechanical behaviors and final dimensions. Henkell et al. used compressed gas, such as Ar, N<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>, to increase the top layer cooling rate and cyclic heating initial deposition layers in WAAM process of G<sub>4</sub>Si<sub>1</sub> wire, and got a near net shape structure with a fine grain size.

Other researchers have reduced heat input by designing new torch structures. Wang et al. used a non-direct arc generated between a non-consumable tungsten electrode connected to the negative pole of the power source and a consumable metal wire connected to the positive pole of the power source, and most of the heat of the power source was transmitted to the metallic wire, which increased the forming efficiency. In addition, the arc was not directly generated between the wire and the work-piece or last deposition layer, the heat input could be reduced significantly. Nevertheless, two problems with this structure were inevitable. First, when the melted droplets were transferred to the substrate or the upper cladding layer, the

temperature of the metal droplets dropped rapidly, so that the metallurgical bonding strength was not guaranteed. Additionally, the trajectory of melted droplets was affected by many factors, therefore, the precision of the molded parts was not particularly ideal [5]. Liu et al. proposed a similar variant WAAM method and reported that the geometrical dimensions of each layer can be effectively controlled by regulating the travel speed of the torch and the thermal input can be controlled in a wide range by adjusting the process parameters, but inevitably, it was also difficult to control the droplet trajectory.

Arc heat source is one of the key factors in WAAM system, researchers have conducted extensive investigation on the arc heat source modes in WAAM process. Zuo et al. used a novel wire and arc additive manufacturing method with TIG-MIG hybrid heat source to fabricate 5356 aluminum alloy components. It was reported that the microstructure of all components fabricated by TIG-MIG hybrid arc mold is represented by equiaxed grain which has higher constitutional super cooling than a single heat source mold. Wang et al. used a variable polarity GTWA (VP-GTAW) heat source to quickly form 4043 aluminum alloy components and studied the influence of VP-GTAW processing parameters on molding. They pointed out that the variations in the feeding rates of a filler metal applied to WAAM process may result in different arc lengths and different arc voltage, which directly affects the heat input, thus, suitable arc length is necessary for precisely controlling heat input [6]. Cong et al. studied the porosity under different cold metal transfer (CMT) arc modes and discussed the mechanism of porosity generation. They found that porosity can be eliminated effectively by using variable polarity CMT (VP-CMT) and confirmed that the key factors of pore elimination are the low heat input and fine equiaxed grain structure. Jonas Näsström et al. studied the laser enhancement of wire arc additive manufacturing process and reported that the use of arc-laser hybrid processes has significantly improved molding accuracy compared to a single arc heat source. In addition, the authors also revealed the forming difference between having the beaming in a leading or a trailing position, relative to the wire and arc.

The poor bonding between layers not only poses grave threat to the mechanical properties of the printing parts, but also largely limits the application and promotion of additive manufacturing technology in extreme environments. Some researchers reported that since 3D printing is based on an additive principle of layer-by-layer, it is possible that there are small voids in the material, and the presence of voids would store gas that would later vent slowly into the vacuum, making the forming parts unsuitable for ultrahigh vacuum environments. Therefore, researchers are studying how to promote the application of AM technology in the vacuum field by reducing the porosity of forming parts. Shihab AL-Hasni et al. carried out research on the additive manufacturing process of Fused Deposition Modelling (FDM) and Stereolithography (SLA), in which porosity was assessed through Scanning Electron Microscopy (SEM). And results showed that SLA 3D printing produces pore-free structures, and the porosities cannot be eliminated by optimizing the printing parameters in FDM 3D printing process. Evgeniy G. Gordeev et al. carried out research on the porosity of FDM and they found that the porosity of FDM-products depended most strongly on the extrusion flow rate, the porosity can be effectively reduced by optimizing the molding parameters, and the application of 3D printed parts under vacuum conditions can be promoted. Jiaqi Guo et al. developed an in-situ monitoring system for electron beam wire-feed additive manufacturing working under vacuum and high temperature environment. The results showed that the system adaptability performance could be enhanced with lifting voltage. This monitoring system can also be applied to other 3D printing processes like laser wire-feed additive manufacturing [7]. At present, the research and application of 3D printing process in the vacuum environment is still at the preliminary stage, especially for the vacuum wire arc additive manufacturing.

In order to solve the problems caused by excessive heat input, improve molding accuracy and optimize interlayer bonding, the WAAM method based on an indirect arc between two non-consumable electrodes was proposed and preliminarily investigated in this paper. The indirect arc was generated between two non-consumable tungsten electrodes in the confined space with pure argon (99.99%) as

the shielding gas. The arc was subjected to thermal compression and forced compression with the ceramic nozzle. Both the arc plasma and melted droplets were ejected out of a ceramic nozzle with regulated trajectories. Since the arc was not generated between the wire and the based-plate, the heat input was significantly reduced. Due to the constricting effect of ceramic nozzle on droplets transfer process, trajectory was more regular. The compressed arc has an additional heating effect on the liquid droplets during the whole process, which could help to optimize the interlayer bonding and reduce the porosity. Furthermore, it may promote the application of 3D printing in vacuum or under subatmosphere conditions.

## **1.2 Torch design and fundamental principle**

In the WAAM process, in order to reduce the heat input and realize the effective control of the Droplets transfer, a new AM principle is proposed and a customized torch is employed in this paper. The torch structure is presented in figure 1. It consists of bakelite shells, a hydroelectric conduit, a copper cover, a non-consumable electrode, a ceramic nozzle and some other accessories. In this designed WAAM torch, the angle between the two non-consumable electrodes is fixed at  $90^\circ$ .

The schematic description of the working principles of this new additive manufacturing method is presented in figure 2. The innovative point, compared with the other WAAM, lies in that the arc is ignited between two non-consumable electrodes rather than between the metallic wire and the work-piece or previous AM layer. The two tungsten electrodes are respectively connected to the positive pole and negative pole of the power source, and the shielding gas is injected from the gas inlet to fill the copper casing. The continuously feeding metallic wire is melted into a liquid droplet under the effect of the high temperature arc, the metallic droplets and arc plasma are ejected out of the ceramic nozzle vertically under the effect of the thermal compression provided by the shielding gas and the mechanical compression provided by the funnel-shaped ceramic nozzle.

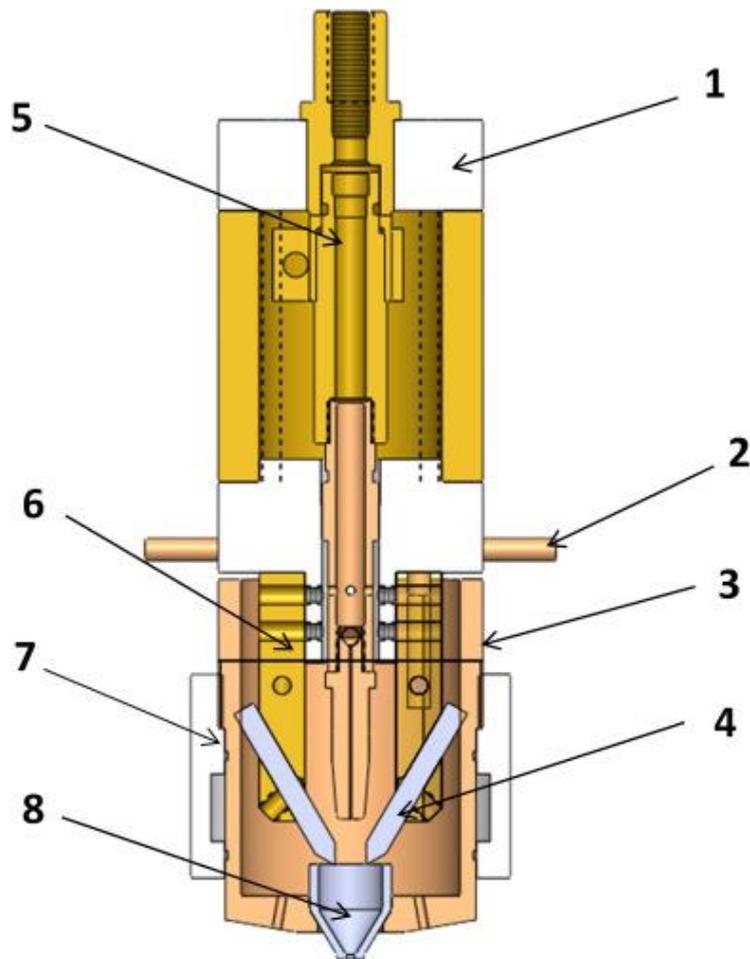


Figure 1 – Schematic description of the torch: 1-bakelite shell, 2-hydroelectric conduit, 3-copper cover, 4-non-consumable tungsten electrode, 5-torch barrel, 6-conductive block, 7-water cooling shell, 8-ceramic nozzle

The innovative points of the torch lie in the fact that compulsively constricted arc is ejected out along the inner wall of the ceramic nozzle to the work-piece or previous layer, and the liquid droplets are protected effectively by the high temperature arc and high purity argon during the whole process, therefore, droplets temperature reduction could be slow to guarantee a reliable metallurgical bonding strength. In addition, since the arc is not directly generated between the tungsten electrode and the substrate, most of the heat is not transferred to the base plate or previous layer, the heat input of manufacturing process can be decreased effectively, therefore, the residual stress, deformation, and even collapse of the parts can be avoided effectively. What's more, the size of the additive manufacturing layers can be adjusted flexibly by adjusting the torch moving speed and the wire feeding speed.

There are other methods to control the heat input, such as adjusting the travel speed, manufacturing process parameters and distance from the ceramic nozzle to the previous layer, etc.

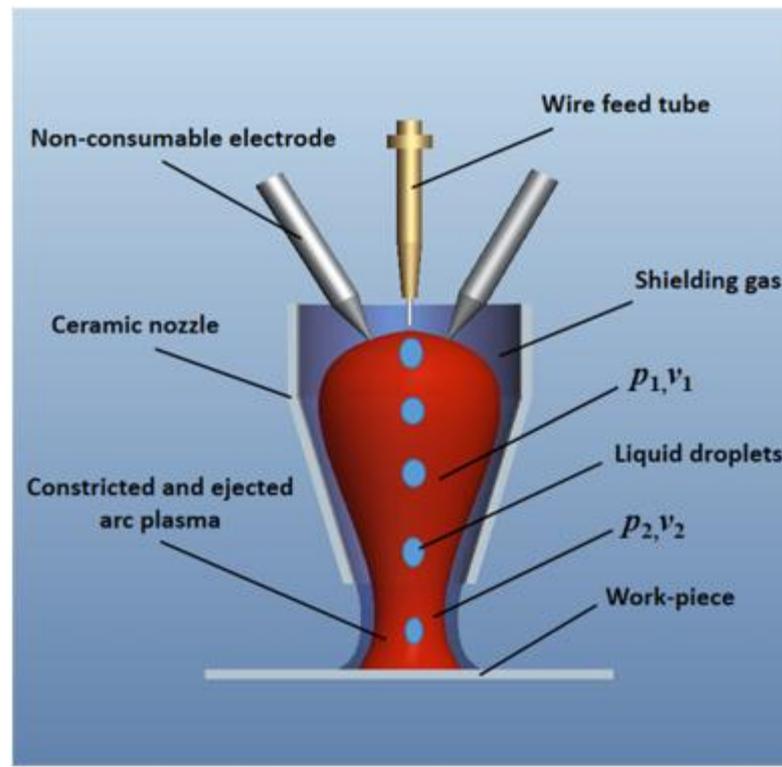


Figure 2 – The novel WAAM based on an indirect arc between two tungsten electrodes

### 1.3 The arc shapes and droplet transfer process

The arc shapes under different constraint conditions and different shielding gas flow rates are studied. The arc shapes are shown in figure 3, and the high-speed images of the droplets transfer and arc plasma behaviors are presented in figure 4.

Figure 4 shows the arc shapes under different constraint conditions and different shielding gas flow rates. Figure 3 (a) shows the arc shapes without the ceramic nozzle. It can be found that the arc length and outline of arc increased gradually with the gas flow rate increasing from 4 L/min to 8 L/min, however the arc did not reach the substrate. When the gas flow rate exceeded 10 L/min, the burning arc transfer was unstable due to the turbulence of the shielding gas [8].

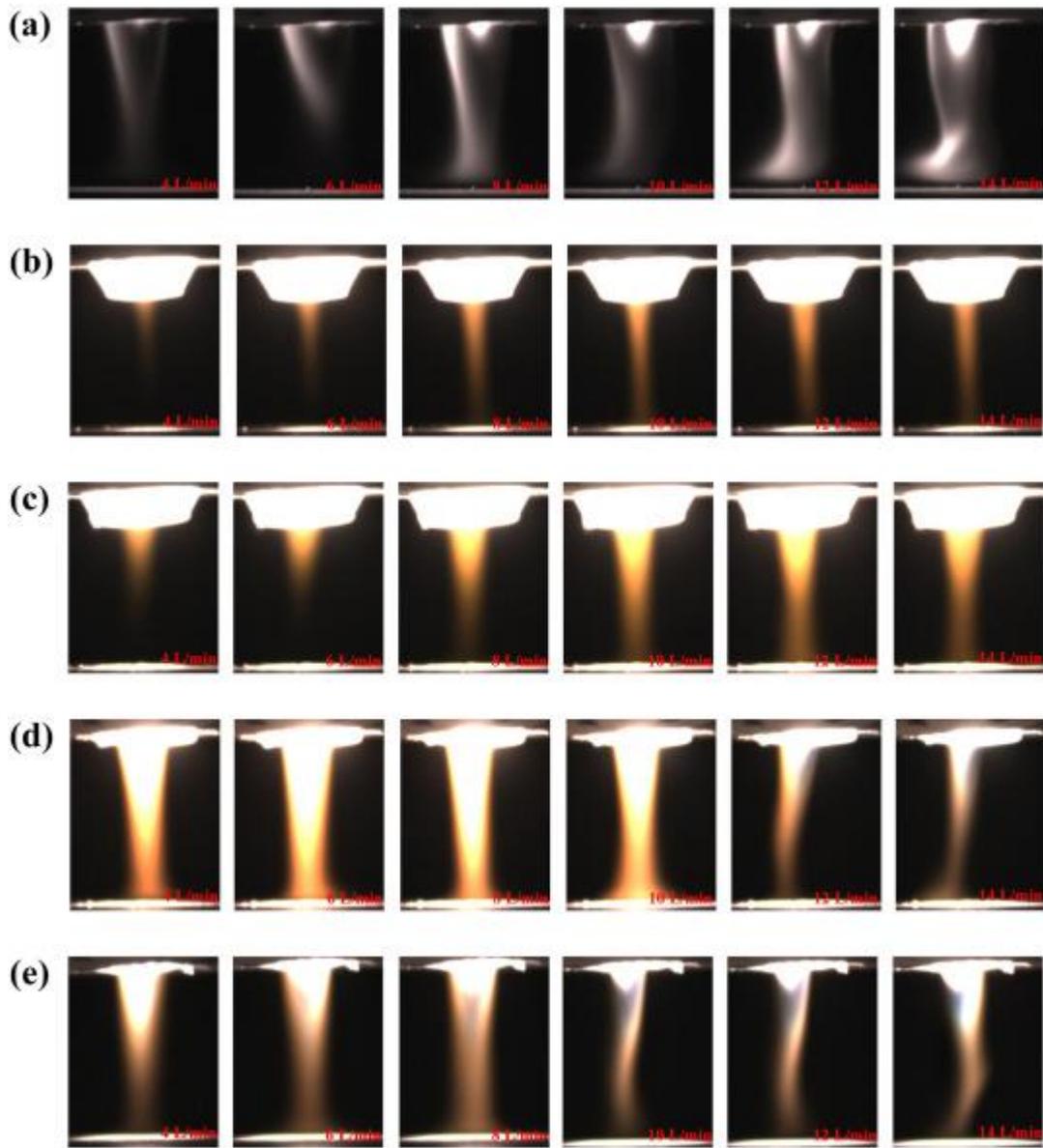


Figure 3 – The arc shapes under different constraint conditions and different shielding gas flow rate. (a) The arc shapes without the ceramic nozzle, (b) the arc shapes under 3 mm ceramic nozzle, (c) the arc shapes under 4 mm ceramic nozzle, (d) the arc shapes under 5 mm ceramic nozzle, (e) the arc shapes under 6 mm ceramic nozzle [9]

Figure 3 (b) and figure 3 (c) show the arc shapes with a 3 mm diameter ceramic nozzle and a 4 mm diameter ceramic nozzle respectively under different shielding gas flow rate. As the gas flow rate increased, the arc length and stiffness increased, and the arc dispersed phenomenon was not obvious. However, due to the small diameter of the nozzle, the arc might reach a small part of the substrate, which would not guarantee the melted droplets achieve continuous insulated and

metallurgical bonding strength. Figure 3 (d) shows the arc shapes with a 5 mm diameter ceramic nozzle. In the case of the smaller shielding gas flow rate, there were more arcs ejected from the ceramic nozzle, and the touching area between the arc and substrate was larger and the burning arc was stable. When the gas rate flow exceeded 12 L/min, the arc was strongly interfered by the shielding gas and became unstable. Figure 3 (e) shows the arc shapes with a 6 mm diameter ceramic nozzle. Compared to ceramic nozzles of other diameters, the restriction effect of 6 mm diameter nozzle was reduced. When the gas flow rate was less than 8 L/min, the arc stiffness was better and the arc was stable. What's more, the arc diameter was slightly larger than the nozzle diameter. When the shielding gas flow rate exceeded 10 L/min, the arc shapes was greatly affected by the flow rate and tended to disperse.

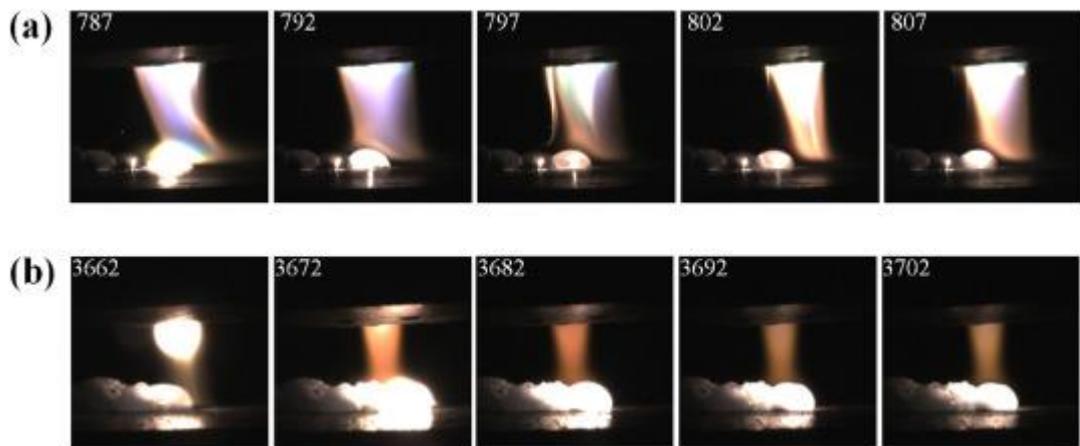


Figure 5 – The high-speed images of the droplets transfer and arc plasma behaviors. (a) The droplet transfer process and arc plasma behaviors (without ceramic nozzle), (b) The droplet transfer process and arc plasma behaviors (with 5 mm ceramic nozzle and air flow rate 6 L/min) [9]

Through the above analysis, it can be found that when the nozzle diameter is 5 mm or 6 mm with the shielding gas flow rate varies from 4 L/min to 8 L/min, the arc shape is stable, and the substrate and melted droplets can be heated continuously to ensure satisfactory metallurgical bonding strength.

Figure 4 shows the droplets transfer proceedings with or without ceramic nozzle. Numbers on the left top corner of each figure indicate the number of frames. Different frame intervals for the two forming processes were selected to show more

details. As shown in figure 4 (a), since there was no constraint effect of the ceramic nozzle, the arc was poorly constrained and its stiffness was poor. In addition, the arc was significantly affected by the shielding gas flow, and there was obvious dispersion and swing, which cannot effectively provide additional heat input to the droplets and the substrate, therefore, the outline between the droplets can be clearly seen. As shown in figure 4 (b), under the effect of mechanical compression of the ceramic nozzle, the stiffness of the arc increased significantly and the restraint became better, the melted droplets were under the protection of the constricted and vertical arc during the entire transfer process, and the liquid droplets can be continuously heated and insulated. The droplets transfer trajectory was less affected by arc interference, and the droplet transition was stable. The substrate was also subject to good thermal effects, thereby ensuring an effective metallurgical bond between the additive manufacturing layers. In addition, the presence or absence of ceramic nozzles, there was no significant effect on the droplets transition frequency. After calculation, the droplets transition frequencies are 1.651 Hz with a ceramic nozzle and 1.629 Hz without a ceramic respectively.

## **Conclusion**

The WAAM method based on an indirect arc between two non-consumable tungsten electrodes in confined space has been proposed and preliminarily investigated. Visual inspection results showed that the stable burning arc kept the metallic wire continuously melting and producing oriented droplet transfer and low heat input, which is applicable under various atmospheric conditions or even in vacuum.

The produced indirect arc between two tungsten electrodes can effectively reduce the excessive heat input; there are several methods to control the heat input such as adjusting the travel speed, manufacturing parameters and distance from the ceramic nozzle to the previous layer, etc.

When using a nozzle, the arc diameter is slightly larger than the nozzle diameter. The arc stiffness increases with the gas flow rate increasing and the arc would be dispersed when the gas flow rate exceeds 10 L/min.