

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.03.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Технологии сварочного производства и инженерии поверхностей

(направленность (профиль)/специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Исследование теплового состояния плазмотрона при сварке на токе  
обратной полярности

Обучающийся

Е.С.Момсин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.Э.Советкин

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

Консультант

к.э.н., доцент, О.М.Сярдова

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

## **Аннотация**

В выпускной квалификационной работе исследовано тепловое состояние плазмотрона при сварке на токе обратной полярности.

Выпускная квалификационная работа выполнена на 44 листах и состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованных источников и графической части выполненной на 7 листах формата А1.

В выпускной квалификационной работе проводится исследование теплового состояния плазмотрона. Описываются различные способы сварки алюминиевых сплавов. Показываются результаты выполненных расчетных и экспериментальных данных. Цель выпускной квалификационной работы заключается в исследовании теплового состояния плазмотрона при сварке на токе обратной полярности. Также были представлены способы обеспечения безопасности персонала при внедрении разработанного технологического процесса в условиях наличия опасных и вредных производственных факторов.

## **Annotation**

In the final qualifying work, the thermal state of the plasma torch during welding with a reverse polarity current was investigated.

The thesis is made on 44 sheets and consists of an introduction, 4 sections, a conclusion and a list of sources used and a graphic part made on 7 sheets of A1 format.

The thesis examines the process of studying the thermal state for compressed arc welding. Various methods of welding aluminum alloys are described. The results of the calculated and experimental data are shown. The purpose of the final qualification work is to study the thermal state of the plasma torch during welding with reverse polarity current. The methods of ensuring the safety of personnel during the implementation of the developed technological process in the presence of dangerous and harmful production factors were also presented.

## Содержание

Введение.....	6
1 Анализ состояния вопроса.....	7
1.1 Анализ способов сварки алюминиевых сплавов.....	7
1.2 Описание процесса сварки сжатой дугой.....	12
1.3 Сведения о конструкциях плазмотронов.....	13
2 Исследование теплового состояния плазмотрона.....	16
2.1 Описание стенда и оборудования для проведения эксперимента.....	16
2.2 Методика проведения эксперимента.....	21
2.3 Методика проведения математического эксперимента.....	23
3 Экологичность и безопасность объекта исследование.....	30
3.1. Описание процесса экспериментов.....	30
3.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	31
3.3. Уменьшения влияния опасных факторов.....	32
4 Оценка экономической эффективности предлагаемых решений.....	33
4.1 Анализ затрат на проведение экспериментов.....	33
Заключение.....	39
Список используемых источников.....	40

## Введение

Алюминиевые сплавы находят все большее применение в современной промышленности в качестве материала для сварных конструкций и с каждым годом его потребление растет в таких сферах промышленности как вагоностроение, машиностроение, ракетостроение, автомобильной промышленности, строительство поэтому быстрая и качественная обработка металла имеет приоритет в промышленности.

Основной проблемой сварки алюминиевых сплавов является оксидная пленка, которая образуется на поверхности алюминия при контакте с кислородом.

Удаление оксидной пленки можно провести механически, химически, технологически за счет катодного распыления оксидной пленки. Сварку алюминиевых сплавов как правило ведут либо на постоянном токе обратной полярности, либо на переменном токе. Наибольшее распространение получили дуговые способы сварки в виде аргонодуговой, полуавтоматической, сварка сжатой дугой. Из дуговых способов сварки наиболее перспективным и эффективным способом является сжатая дуга или плазменная сварка.

Сварку сжатой дугой ведут на специальных сварочных горелках плазмотронах, однако возникает проблема в том, что плазмотроны для сварки менее распространены, чем плазмотроны для воздушно-плазменной резки.

Из-за чего возникает идея, о возможности использования плазмотронов для резки, в качестве плазмотронов для сварки. Очевидно, что технологические процессы резки и сварки отличаются. Поэтому одним из недостатков использования режущего плазмотрона в сварке это его тепловое состояние.

Изучить возможность сварки алюминиевых сплавов при помощи плазмотронов для воздушно-плазменной резки является актуальной темой на данное время.

Целью работы является повышение стабильности работы плазмотронов на токе обратной полярности, путем исследований их теплового состояния.

## 1 Анализ состояния вопроса

Сжатая дуга является перспективным направлением изучения среди дуговых способов сварки, поскольку имеет преимущества в сварке алюминиевых сплавов с наилучшими сварочными характеристиками, а также низкой стоимостью производства и простотой процесса по сравнению с остальными видами сварки сжатой дугой.

### 1.1 Особенности сварки сжатой дугой алюминиевых сплавов

Потребность в выборе способа сварки возникла из-за того, что разные способы сварки в разных ситуациях показывают себя лучше других и для того, чтобы определиться в выборе способа сварки необходимо проанализировать существующие способы сварки сжатой дугой.

#### 1.1.1 Сварка сжатой дугой на постоянном токе прямой полярности

«При сварке на прямой полярности, показана на рисунке 1, происходит более глубокое проплавление металла, чем при сварке на обратной полярности, при этом нагрузка на неплавящийся электрод значительно меньше, чем на обратной полярности» [10].

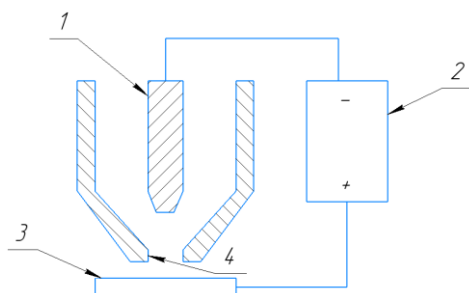


Рисунок 1 - Сварка на прямой полярности

Из-за уменьшенного тепловложения в сопло и электрод повышается срок их службы, а также не нуждается в интенсивном охлаждении. Однако из-за неспособности прямой полярности разрушить окисную пленку, данный способ не подойдет за проведения исследования.

### 1.1.2 Сварка сжатой дугой на постоянном токе обратной полярности

Сварка на обратной полярности позволит получить хорошую очистку окисной пленки на поверхности изделия благодаря катодному распылению, изображенному на рисунке 2, где анод - электрод плазмотрона, а катод - изделие. Благодаря простоте использования и меньшей сложности чем при сварке переменным синусоидальным током, можно использовать сварочные выпрямители или инверторы для источника питания.

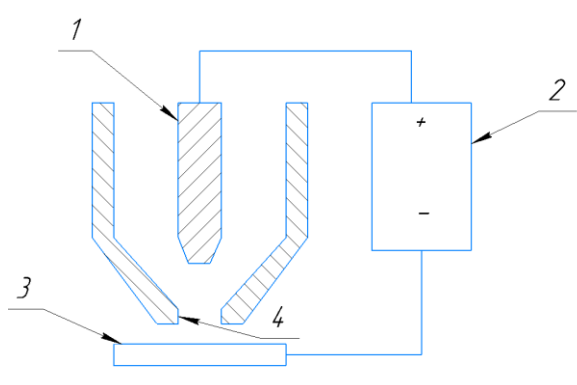


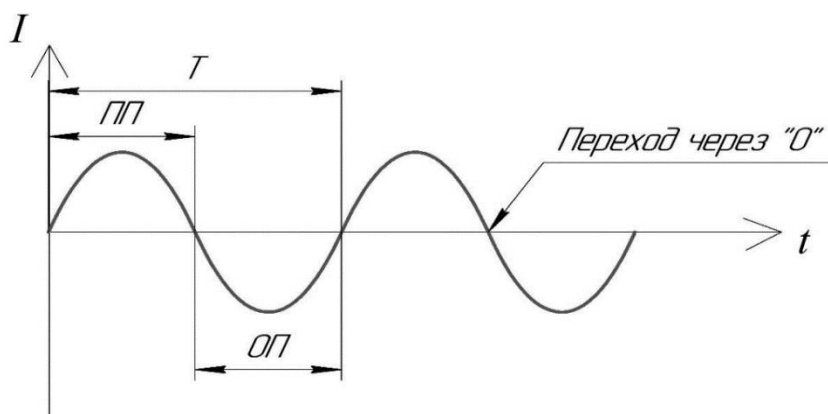
Рисунок 2 - Сварка на обратной полярности

Но у этого способа имеется важный недостаток, так при сварке на обратной полярности тепловложение воздействует на сопловую часть плазмотрона, тем самым перегревая его и уменьшая его срок службы, чтобы решить проблему перегрева сопловой части применяют интенсивное водяное охлаждение.



### 1.1.3 Сварка сжатой дугой переменным синусоидальным током

«Чтобы обеспечить стабильное горение дуги, к установке для сварки алюминия свободной дугой, добавляли источник для питания дежурной дуги, которая обеспечивала ионизацию пространства между плазматроном и изделием в момент перехода синусоиды через «ноль», показан на рисунке 3» [8], [15].



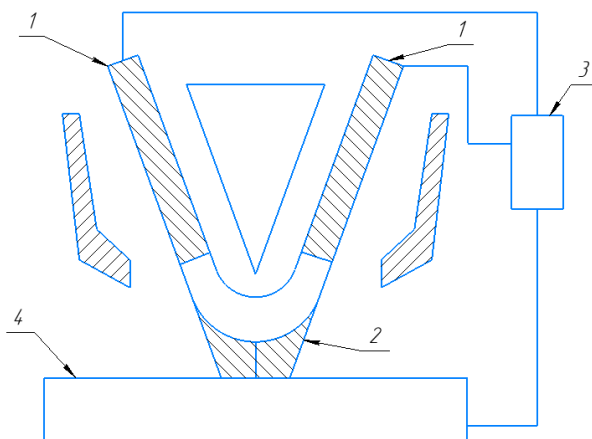
«Рисунок 3 - Ток синусоидальной формы» [6]

«Из-за сложности и дороговизны оборудования данным метод не получил большого распространения, хотя хорошо очищает поверхность сплава от оксидной пленки, в момент нахождения тока в отрицательном полупериоде, большинство тепла при этом сосредоточено на электроде» [6].

### 1.1.4 Сварка трехфазной сжатой дугой

«Сварка трехфазной дугой представляет собой способ, в котором используется два электрода внутри плазматрона, схема показана на рисунке 4. Процесс сварки протекает стабильно за счет того, что в определённый момент времени горит как минимум одна дуга, между электродами, или электродом и изделием. Но такой процесс сварки затруднителен ввиду таких сложностей как зажигание дуги. Существуют методы по зажиганию дуги введением вольфрамового стрежня и замыканием электродов между собой, по сколько возбуждать дугу касание об изделие не допускается. Применение

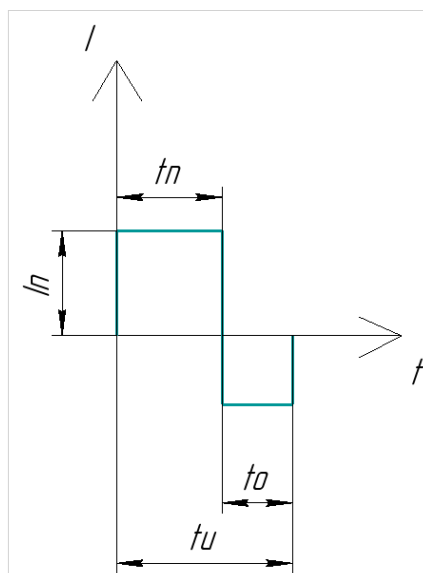
осциллятора не всегда возможно, ввиду отдаления основного источника питания, от сварочного поста, из – за сложностей в передаче высокочастотного разряда на далёкие расстояния, к тому же оборудование для трехфазной сварки имеет значительные массогабаритные размеры» [16], [19], [26].



«Рисунок 4 - Схема сварки трехфазной сжатой дугой» [26]

### **1.1.5 Сварка сжатой дугой разнополярными прямоугольными импульсами тока**

«Такой способ сварки отличался от сварки на переменном токе синусоидальной формы тем, что дополнительный блок, обеспечивающий стабильность горения дуги при переходе из одной полярности в другую за счет импульса тока, стал не нужным, поскольку прямоугольная форма сварочного тока позволяла обеспечить стабильный переход через «ноль», а также обеспечить стабильное возбуждение дуги. Для снижения тепловой нагрузки на неплавящийся электрод, сварку проводили с преобладанием прямой полярности, доля обратной полярности была минимально допустимая, для обеспечения эффективного катодного распыления» [27].



«Рисунок 5 - Сварка разнополярными прямоугольными импульсами тока»

[27]

«Примерное соотношение прямой и обратной полярности составляло 3:1, а сила тока обратной полярности была выше, чем прямой. Использование таких решений позволяет уменьшить количество тепла, воздействующего на плазматрон, а также увеличить его срок службы. Однако дальнейшего развития данный способ сварки не получил, ввиду сложности конструкций оборудования» [27], [32] .

По итогу лучшим способом будет являться сварка сжатой дугой на постоянном токе обратной полярности, поскольку хорошо очищает сварочную зону от оксидной пленки, имеет простую конструкцию, а также может работать почти с любыми сварочными источниками питания.

## 1.2 Особенности сварки сжатой дугой

«Технологический процесс сварки сжатой дугой как правило, осуществляется переменным или постоянным током. Процесс сварки начинают с возбуждения дуги с помощью осциллятора [30].

Осциллятор - это аппарат для бесконтактного возбуждения сварочной дуги при сварке неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде инертных газов как на постоянном, так переменном токе.

В качестве плазмообразующего газа используют аргон или гелий, которые также являются защитными.

В процессе сварки алюминиевых сплавов, используется переменный ток, для катодной очистки сварочной ванны от тугоплавкой оксидной пленки. В результате использование переменного тока увеличивается тепловложение в электрод. К примеру при сварки вольфрамовым электродом диаметром 3 мм на прямой полярности допустимый ток составляет 180 А, а при сварке на обратной 40 А. Последние исследования показали, что использование обратной полярности предпочтительней, так как тепловложение в изделие значительно больше [17]. Так 1 А обратной полярности примерно в 2 раза эффективней чем 1 А прямой. Однако возникает проблема обеспечения стойкости неплавящегося электрода. В таком случае прямое водяное охлаждение электрода в рассматриваемом плазмотроне идеально подходит для задач сварки, если использовать конструкцию электрода разработанного на кафедре [19]» [4].

### 1.3 Анализ конструкций плазмотронов

На текущее время наиболее распространенными являются плазмотроны для воздушно-плазменной резки, существуют также отдельные виды плазмотронов для сварки, но их распространение ограничено.

Поскольку плазмотроны для резки металла получили большее распространение в промышленности, чем плазмотроны для сварки эффективнее будет основываться именно на режущих плазмотронах, что позволит объединить процесс резки и сварки, а значит оптимизировать использование плазмотронов в производстве.

Типичный плазмотрон для воздушно-плазменной резки представлен на рисунке 6.

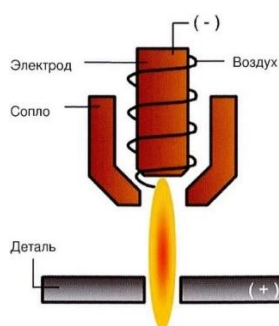
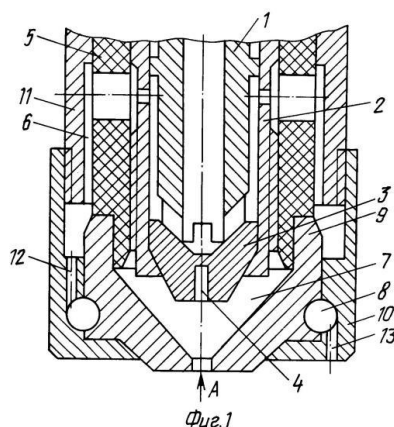


Рисунок 6 - Плазменная горелка

В патенте [23] представленном на рисунке 7 разработана конструкция плазмотрона для воздушно-плазменной резки, ее отличительной особенностью является специальные полости для воздушного охлаждения, которые обеспечивают высокую стойкость элементов плазмотрона, а также за счет быстрой замены комплектующих возрастает производительность.

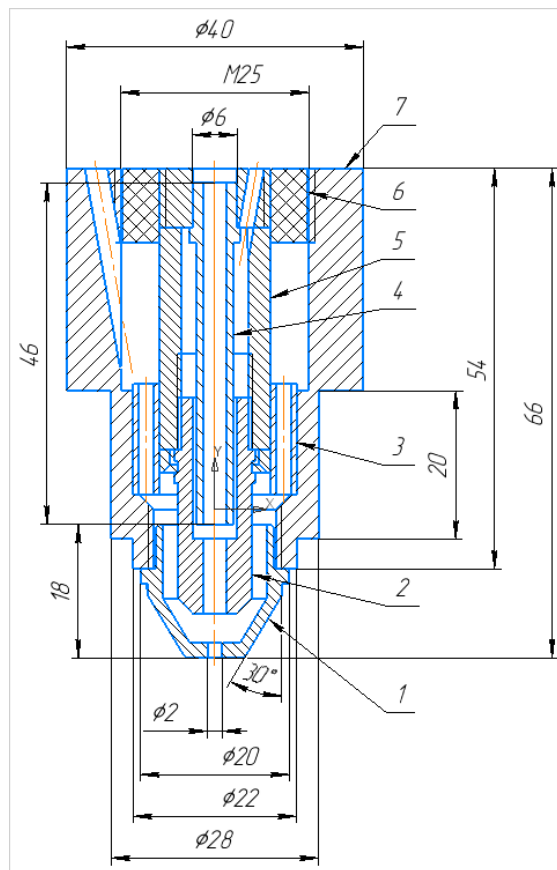
Плазмотрон мог бы подойти для исследования в условиях сварки, но главным недостатком является сложность конструкции плазмотрона.



«Рисунок 7 – Схема плазмотрона для воздушно-плазменной резки» [23].

На кафедре «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» уже проводились исследования по сварке сжатой дугой и поэтому там уже находится плазмотрон для воздушно-плазменной резки металла FY-A200H, главным преимуществом этого плазмотрона является наличия в нем трубки для жидкостного охлаждения, что возможно позволит использовать его для работ по сварке алюминия, но поскольку плазмотрон разрабатывался под резку, то сопловая часть не способна выдержать тепловые нагрузки которые будут на неё подаваться.

Доработка сопловой части режущего плазмотрона под сварку проводилась на базе кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» на рисунке показан чертеж плазмотрона «FY-A200H».



1 - сжимающее сопло, 2 - водоохлаждаемый электрод, 3 - корпус, 4 - диэлектрическое кольцо, 5 – керамическое кольцо, 6 – корпус системы охлаждения, 7 – трубка подачи жидкости

Рисунок 8 - Схема плазмоторн «FY-A200H»

В конструкции плазмоторна для резки, изменению подвергается в первую очередь сопло чертеж которого представлен на рисунке 9, которое изготавливалось из бронзы небольшой толщины 1 мм, что не обеспечивало его стойкость в процессе сварки.

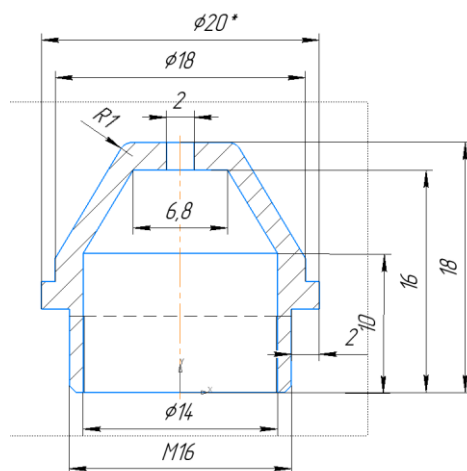


Рисунок 9 - Сжимающее сопло из бронзы

Для обеспечения стойкости сжимающего сопла материал изменили на чистую техническую медь марки М1т, а геометрические размеры переработали в сторону увеличения стенок с 1 мм до 3 мм, чертеж показан на рисунке 10.

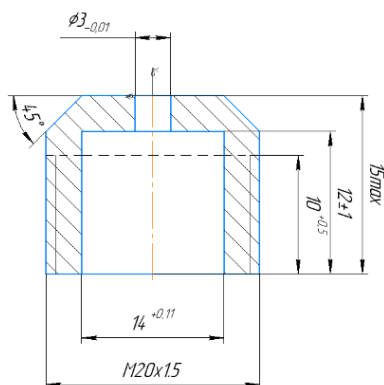


Рисунок 10 - Сжимающее сопло из меди

Увеличение диаметра сжимающего сопла потребовало изменение геометрии сопловой части плазмотрона на максимально возможное, поэтому диаметр увеличился до 20 мм.

Далее изменению подвергается электрод показанный на рисунке 11, так как ранее электрод имел циркониевую вставку, а он как известно окисляется



при высоких температурах, поэтому он заменяется на вольфрам показанный на рисунке 13, что позволит повысить стойкость электрода.

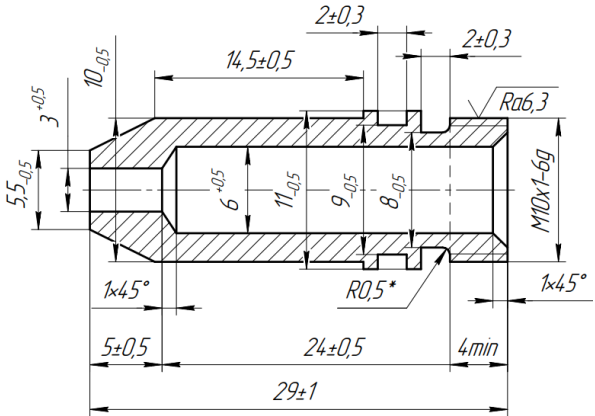


Рисунок 11 - электрод с циркониевой вставкой

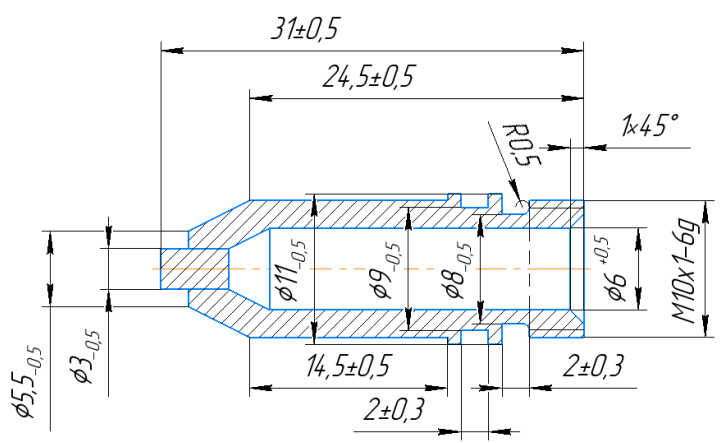
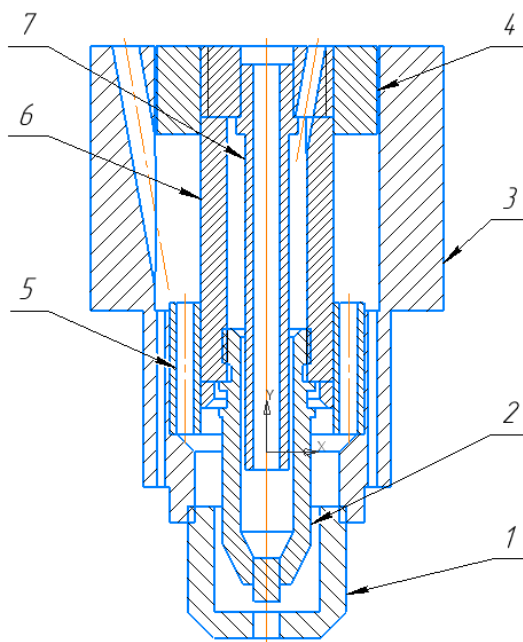


Рисунок 12 - электрод с вольфрамовой вставкой



1 - сжимающее сопло, 2 - водоохлаждаемый электрод, 3 - корпус, 4 - диэлектрическое кольцо, 5 – керамическое кольцо, 6 – корпус системы охлаждения, 7 – трубка подачи жидкости

Рисунок 13 - Схема плазмотрона после модернизации «FY-A200H»

### Заключение по разделу

В результате проведенного анализа по способам сварки и анализе конструкции плазмотрона целью дальнейшей работы будет являться повышения производительности плазмотронов на токе обратной полярности, путем исследований их теплового состояния, а также удалось решить проблему низкой стойкости сопловой части плазмотрона, что позволит нам провести эксперимент на практике без выхода из строя комплектующих. Далее требуется поставить следующие задачи для достижения поставленной цели работы:

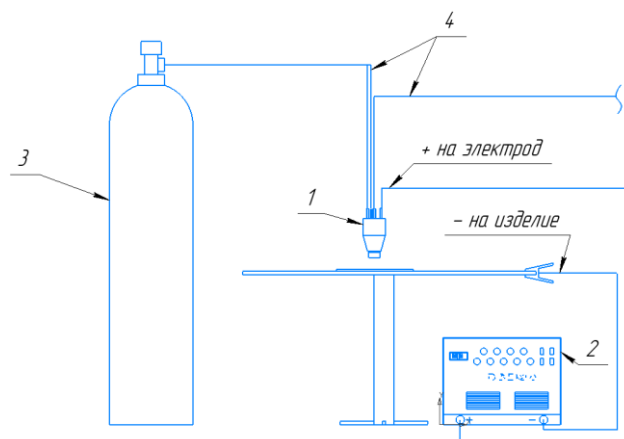
1. Провести реальный эксперимент работы плазмотрона на токе обратной полярности и получить результат.

2. Провести математические расчеты при помощи программы и получить данные по тепловому состоянию плазмотрона, и сравнить его с данными эксперимента.

## 2 Исследование теплового состояния плазмотрона

### 2.1 Описание стенда и оборудования для проведения эксперимента

Исследование тепловых процессов и теплового состояния плазмотрона производили на установке представленной схематично на рисунке 14.



1 – плазмотрон, 2 — источник питания TIG-200 AC / DC BRIMA,  
3 — баллон с защитным газом, 4 — шланги подачи газа и воды  
Рисунок 14 - Стенд для точечной сварки сжатой дугой

На стенде устанавливался плазмотрон для плазменной резки металлов FY-A200H. Конструкция данного плазмотрона предполагает нераздельную подачу плазмообразующего и защитного газа. Плазмообразующий газ подается через специальное керамическое кольцо, которое формирует завихренный поток вокруг электрода. Защитный газ вытекает через специальные отверстия и направляется с помощью сопловой части к сжатой дуге, для ее стабилизации. Отличительной особенностью данной конструкции плазмотрона является прямое жидкостное охлаждение электрода.

Характеристики источника питания приведены в таблице 1. Общий вид источника представлен на рисунке 15.

«Таблица 1 — характеристики источника питания» [22]

Параметры источника питания	BRIMA TIG 200 AC/DC
Напряжение сети, В	220
Напряжение холодного хода	56
Частота сети, Гц	50/60
Максимальный сварочный ток, А	200А
Диапазон регулировки тока	10-200
Баланс переменного тока	20-80
Потребляемая мощность, кВт	5,9
КПД, %	85



Рисунок 15 - BRIMATIG 200 AC/DC

В качестве источника питания использовался TIG-200 AC / DC BRIMA предназначенный для ведения аргодуговой сварки и сварки плавящимся электродом. В процессе аргодуговой сварки на переменном токе этот источник питания формирует прямоугольные импульсы с возможностью регулирования баланса, изменяя соотношение длительности прямой и обратной полярности.

## 2.2 Методика проведения эксперимента

Измерение температуры производили с помощью откалиброванной термопары, на удалении 6 мм от среза сопла, на внешнем его диаметре. Сварку на постоянном токе производили с шагом 10 А в диапазоне 40-80 А. На переменном токе с балансом 50/50% использовали ток 110 А, в результате получили зависимости изменения температуры сжимающего сопла и тепловложения в изделие.

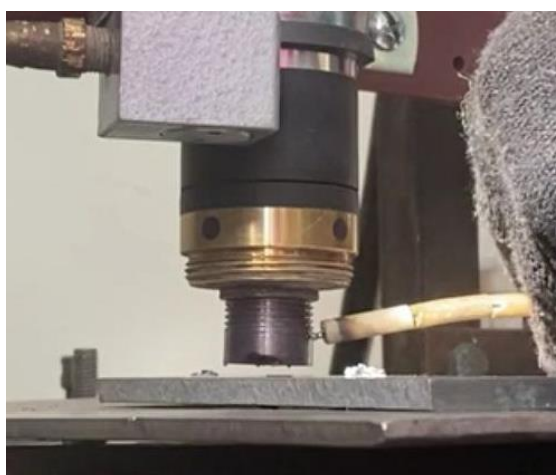


Рисунок 16 - Контроль температуры сжимающего сопла термопарой

В процессе испытаний плазмотрона для плазменной резки перекрывали подачу защитного газа. Для этого в корпусе плазмотрона перекрывали отверстия поз.1 на рисунке 17.

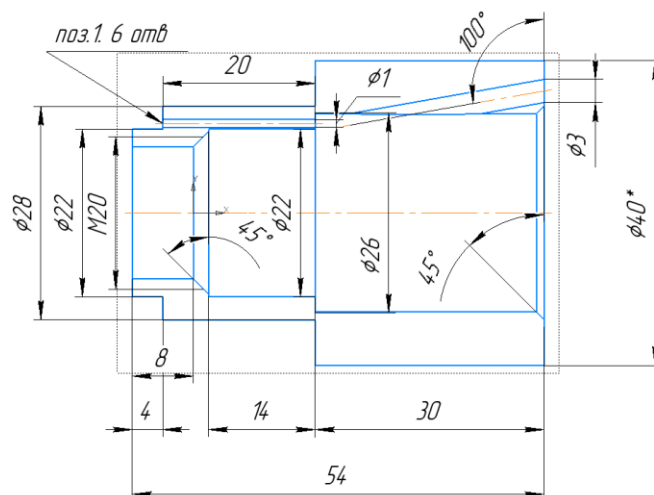


Рисунок 17 - Корпус плазмотрона

Контроль плазмообразующего газа, осуществляли с помощью ротаметра РМ-3А, (предел измерения 1л/мин).



Рисунок 18 – Ротаметр РМ-3А

«Процесс сварки на токе 80 А прямой полярности, показал, что сопловая часть плазмотрона, быстро выходит из строя от тепловой нагрузки. Электрод с запрессованной циркониевой вставкой при циклических нагрузках быстро оплавляется и выпадает из медной оболочки» [17].

## 2.3 Методика проведения математического эксперимента

Математический эксперимент проводили с помощью численного моделирования теплового состояния плазмотрона в системе NxThermal/Flow показано на рисунке 19.

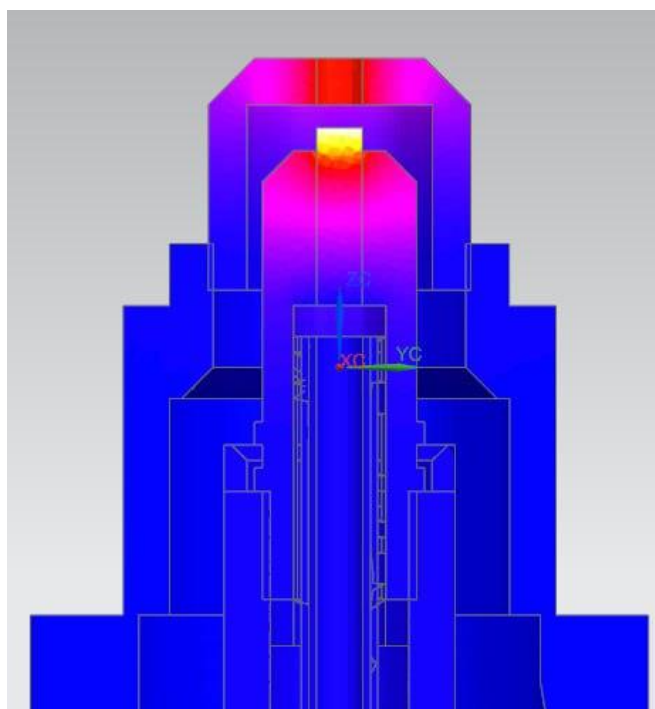
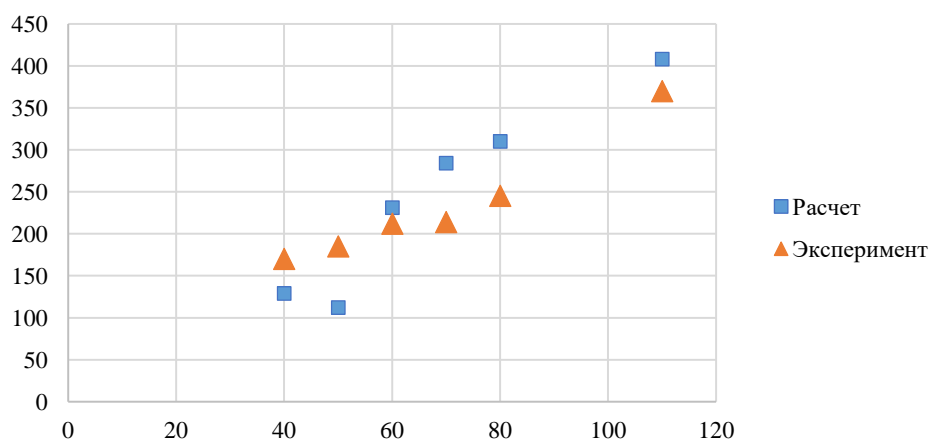


Рисунок 19 - Математическая модель плазмотрона

При расчете учитывались следующие граничные условия: тепловыделение в электрод и сопло, учет движение потока охлаждающей жидкости внутри плазмотрона, стенки плазмотрона адиабатические. Адиабатические стенки, достаточно грубое предположение, однако тепловой расчет рассматривается с точки зрения наиболее уязвимых мест, поэтому расчет предположительно будет иметь температуры чуть выше, что и требуется для запаса прочности.

На рисунке 20 приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения температуры сжимающего сопла» [17].

### Изменение температуры сжимающего сопла плазмотрона



«Рисунок 20 – Изменение температур сжимающего сопла» [17]

«Из рисунка 20, следует, что математический расчет хорошо описывает изменение температурного состояния сжимающего сопла в зависимости от тока сварки. Отсюда следует, что на тепловое состояние сопла по большей степени влияет ток сварки, расход плазмообразующего газа, а также его геометрические размеры, при этом род тока существенного влияния не оказывает, например так, как это происходит с электродом» [17].

Точная копия плазмотрона была построена в программе Компас 3д далее модель была сконвертирована в формат для использования ее в программе NX.

Уже в NX было использовано приложение Advanced Simulation/Thermal Flow где по загруженной модели плазмотрона была построена математическая сетка для тела плазмотрона 1 мм, для сопла и электрода 0.5 мм, форма сетки тетрагональная с 4 гранями, все связи поверхностей представляются как идеальный контакт на рисунке 21. Внутри системы охлаждения плазмотрона подается массовый расход воды 1 л/мин, постоянной температурой 20 °С.



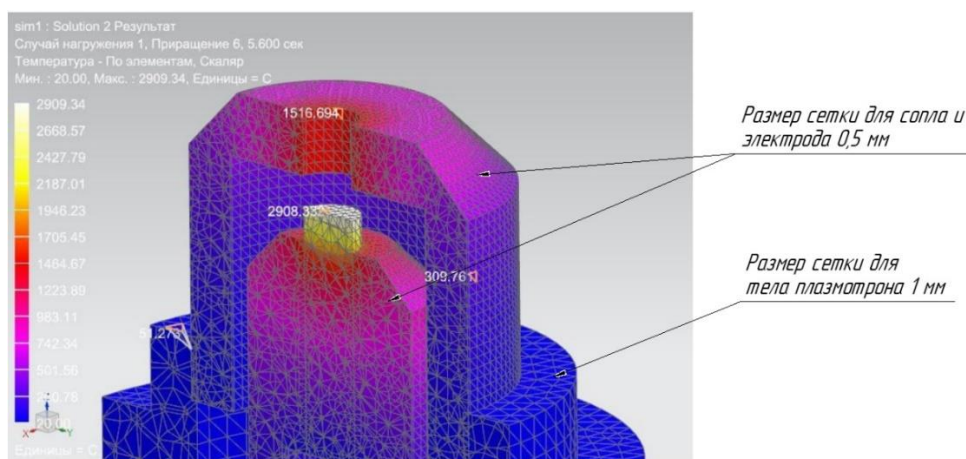


Рисунок 21– Настройка модели сетки сжимающего сопла, электрода и плазматрона

«Настройка материалов модели следующая: корпус плазматрона – латунь, водоохлаждаемый электрод - медь-вольфрам, сжимающие сопло - медь. Теплофизические свойства принимали зависящими от температура, но только для элементов модели из меди и вольфрама» [17].

При помощи приложения Face Contact происходило соединение деталей плазматрона друг с другом в месте их контакта, а также соединяли воду с деталями плазматрона показано на рисунках 22,23.

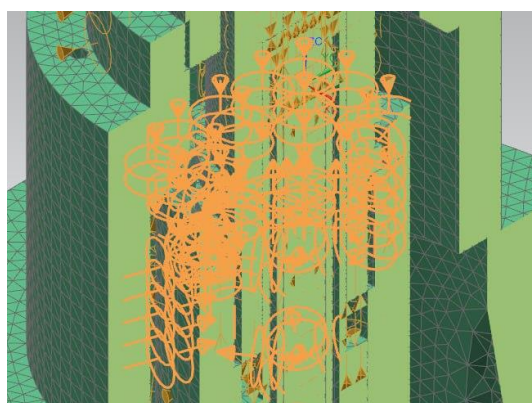


Рисунок 22 – Соединение деталей плазматрона друг с другом



Рисунок 23 – Соединение деталей плазмотрона с водой

Было проведено 7 экспериментов и на каждый из них требуется задать нагрузку, так для 80А была задана нагрузка на электрод в 480 В, а для сжимающего сопла 422 В показано на рисунках 24,25.

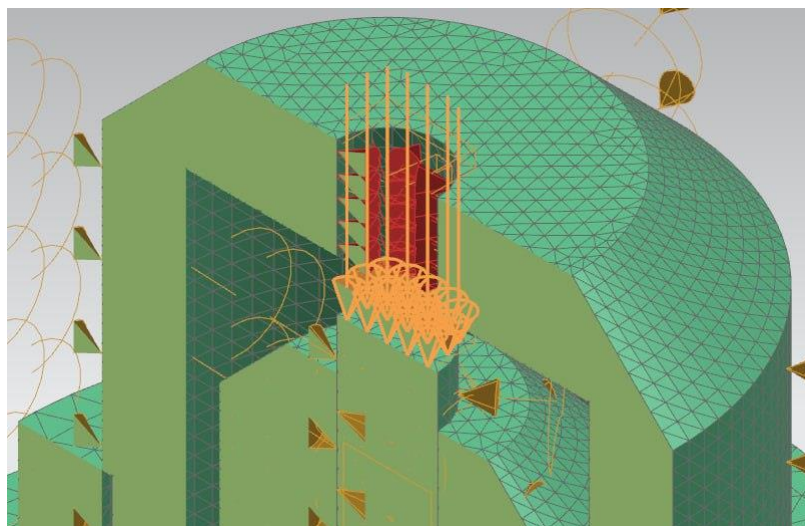


Рисунок 24 – Установка нагрузки на электрод

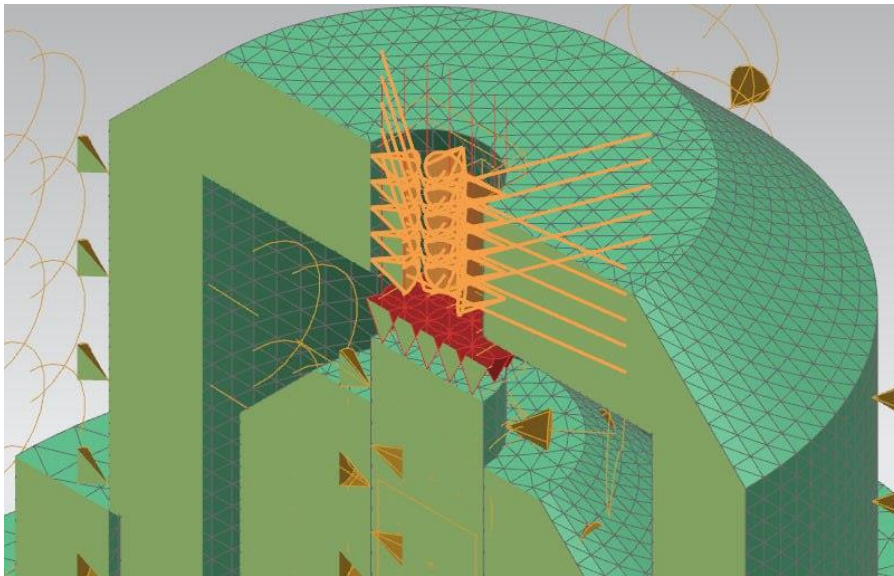


Рисунок 25 – Установка нагрузки на сжимающее сопло

Настройка решателя: Метод решения неявный, шаг расчета по времени 0.1, число интеграций по шагу 100. Расчетное время в соответствии с таблице 4. В конце запускаем решение и программа при помощи математических вычислений на основе ранее заданных нагрузок и граничных условий просчитывает результат.

```

TIME STEP = 100   SIMULATION TIME = 5.60E+00   CPU SECONDS = 7.15E+03
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| CSOLVER | Minimum | Location | Maximum | Location | Average | Convg |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| T-Solid | 2.00E+01 | 68894 | 2.91E+03 | 290716 | 1.56E+02 | OK |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Coupled Solution Summary |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

Maximum Temperature: 2909.345 at Element 290716
Minimum Temperature: 20.000 at Element 68894
Average Temperature: 156.129

Maximum Heat Transfer Coefficient: 1.120E+04
Minimum Heat Transfer Coefficient: 7.108E+01
Average Heat Transfer Coefficient: 3.127E+03
Total capacitance: 0.127E+09
Convective time constant: 0.190E+02
Heat flow into temperature B.C.s: 1.040E+02
Heat flow from temperature B.C.s: 0.000E+00
Heat convected to fluid: 8.629E+07
Heat convected from fluid: 0.000E+00
Total heat load on non-fluid elements: 9.020E+08

Maximum Coupled Solution Temperature Change: 2.355E-02
Normalized Convective Heat Imbalance in Coupled Solution: 1.356E-03

```

Рисунок 26 – Вычисление температур в плазмотроне на шаге 100

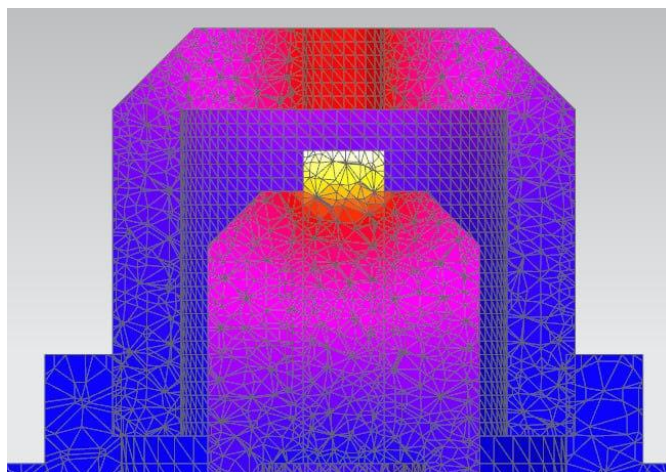


Рисунок 27 - Симуляция результата после решения

В конце программа предоставляет доступ к просмотру результата, на нем видно как распределяется температура в зависимости от заданных нагрузок, на рисунке 27 показано тепловложение в плазмотрон при 80А.

По результатам проведенных экспериментов были составлены таблицы по которым можно провести сравнение реального опыта и математического расчета.

Так в таблице 2 представлены значения изменения эффективной мощности дуги при сварке сжатой дугой током обратной полярности. В таблице 3 представлены результаты эффективной мощности сжатой дуги на переменном токе с балансом полярностей 50/50, для тока 110 А» [17].

«Таблица 2 – Изменение эффективной мощности дуги при сварке сжатой дугой обратной полярностью от водоохлаждаемого электрода» [17].

Ток сварки, А	Удельная эффективная мощность, Вт/А	Эффективная мощность
40	17.5	701
50	15,7	773
60	17.9	1056
70	19.9	1371
80	19.38	1530

«Таблица 3 – Изменение эффективной мощности дуги при сварке сжатой дугой на переменном токе 110 А» [17].

Ток сварки, А	Удельная эффективная мощность, Вт/А	Эффективная мощность
110	14.6	1604
110	13.2	1456

«Таблица 4 - Результаты изменения температуры сжимающего сопла» [17].

Ток сварки, А	Температура сжимающего сопла, °С	Время сварки, с
40	170.2	5
50	195	3.4
60	212	5.8
70	214	6.0
80	245	5.6
110	370	5.2
110	295	4.8

«Полученные значение измерения температуры сжимающего сопла, сравнивали с математическим экспериментом.

#### **Заключение по разделу**

Полученные экспериментальные данные в таблицах и по тепловому состоянию плазмотрона, свидетельствуют о том, что применение постоянного тока обратной полярности при сварке сжатой дугой более эффективно. Переменный ток не обеспечивает эквивалентного тепловложения при сварки ввиду возможного образования аварийного режима сварки и выхода сжимающего сопла из строя, это в свою очередь приводит к снижению производительности процесса или изменению плотности распределения теплового потока по причине вынужденного увеличения диаметра сжимающего сопла.

### **3 Экологичность и безопасность объекта исследование**

На кафедре «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы» Тольяттинского государственного университета, осуществились опыты по исследованию теплового состояния плазмотрона при сварке на токе обратной полярности, схема стенда для сварки показана на рисунок 14.

#### **3.1 Описание процесса экспериментов**

В дипломной работе, прописан технологический процесс проведения исследования, в котором показаны этапы проведения работ. Осуществили подготовку заготовок из алюминия Амг с толщиной 5 мм. При помощи испытуемого плазмотрона в котором был вкручен разработанный электрод, включили на источнике питания прямую полярность, подключили плазмообразующий газ к плазмотрону и открыли вентиль на баллоне, а также подключается шланги с охлаждающей жидкостью для последующей сварочной операции. На ЧПУ станке задают необходимые координаты для работы, чтобы получить пластины длиной 200 мм и шириной 50 мм. Включают установку, плазмотрон вырезает пластины по заданным размерам. Перед сварочной операцией изменяется только полярность на источнике питания с прямой на обратную полярность для разрушения оксидной пленки которая образуется на поверхности образцов и увеличивают расход газа на баллоне для стабилизации сжатой дуги. Во время выполнения сварки следуют держать дистанцию во время выполнения работ, это позволит снизить воздействие сварочной дуги и ультрафиолетового излучения на работников. Полученные сварные образцы нуждаются в остывании, после их можно осмотреть и провести визуальный и измерительный контроль, чтобы контролировать глубину провара сварного шва.

### 3.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Необходимо учитывать, что при выполнении научного исследования могут происходить опасные и вредные производственные факторы, которые могут привести к получению травм и увечий здоровью рабочих, выполняющих операции в процессе работы. Существуют факторы, которые могут привести к опасным последствиям в процессе подготовки и проведения резки и сварки. Это может быть: высокое напряжение, высокая температура или УФ-излучение, наличие опасных газов.

Опасные источники, операции и факторы входящие в состав процесса приведены в таблице 5

Таблица 5 - Анализ опасных и вредных факторов

Операции	Источник опасности	Факторы
Резка пластин	-Плазмотрон с электродом для резки -Источник питания Вгima TIG 200 AC/DC -Баллон с плазмообразующим газом (Аргон)	-Ультрафиолетовое излучение -Инфракрасное излучение - Повышенная концентрация газов -Высокая температура металла
Сварка пластин	-Плазмотрон с электродом для резки -Источник питания Вгima TIG 200 AC/DC -Баллон с плазмообразующим газом (Аргон)	-Ультрафиолетовое излучение -Инфракрасное излучение - Повышенная концентрация газов -Высокая температура металла

Подробное описание опасных и вредных факторов, возможно анализируя следующие операции, которые входят в состав процесса исследования:

Резка пластин, сварка пластин;

### 3.3 Уменьшения влияния опасных факторов

Проведя анализ возможных опасных факторов, в таблице 6 приведены мероприятия по снижению воздействия их при выполнении исследовательской работы.

Таблица 6 – Снижение вредных и опасных факторов

Операции	Факторы	Мероприятия
Резка пластин	-Плазмотрон с электродом для резки -Источник питания Вгima TIG 200 AC/DC -Баллон с плазмообразующим газом (Аргон)	-Проведение вводного инструктажа -Выдачи СИЗ, спецодежды -Вентиляция помещения во время проведения работ
Сварка пластин	-Плазмотрон с электродом для резки -Источник питания Вгima TIG 200 AC/DC -Баллон с плазмообразующим газом (Аргон)	-Проведение вводного инструктажа -Выдачи СИЗ, спецодежды -Вентиляция помещения во время проведения работ

#### Заключение по разделу

Выполняя раздел «Экологичность и безопасность объекта исследование» в выпускной дипломной работе были найдены и проведены анализы вредные и опасные факторы, которые присутствуют в каждой операции процесса исследования, они же могут принести вред здоровью лиц задействованных в исследовании.

Результатом анализа опасных факторов будет использование методов по предотвращению факторов несущих вред здоровью во время проведения работ. В этой научно-исследовательской работе приведено достаточно методов для снижения опасных факторов и не требует денежных вложений для специальных технологий для защиты находящихся работников у установки, так как средства для защиты уже находятся на кафедре.



## 4 Оценка экономической эффективности предлагаемых решений

Выпускная квалификационная работа не влечет за собой получение выгоды, а является научно – исследовательской, так и или иначе, но для нее требуется обосновать экономическую часть.

### 4.1 Анализ затрат на проведение экспериментов

Для выполнения анализа затрат, необходимо задать данные для расчета. Исходные данные приведены в таблице 7.

«Таблиц 7 - Исходные данные для расчета экономической эффективности»[13]

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Проектный вариант
Цена основного материала	Цм	р/кг	474
Дневная ставка участника НИР	См	р	800
Коэффициент премиальных доплат	Кпр	–	1,5
Норма отчислений на социальные нужды	Нсоц	%	30
Суммарная стоимость предоставленного оборудования	Цоб	р	80300
Норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию	На	%	24
Мощность оборудования	Моб	кВт	5
Коэффициент полезного действия	КПД	–	0,85

«Продолжение таблицы 7» [13]

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Проектный вариант
Стоимость электроэнергии	Цэ-э	р	30
Норма отчислений на текущий ремонт оборудования	Н.тр	%	22,9

«Производиться расчет экономической эффективности с учетом производственных затрат. Поскольку работа является научно - исследовательской, производственные затраты будут текущими. Формула для расчета взяты из методических указаний» [13].

«Расчет текущих затрат производится по следующей формуле» [13].

$$З_{тек} = ЗМ + ФЗП + Ос.н + Зэ-э + Зоб + Зпр + НР \quad (1)$$

«где ЗМ - затраты на основные и вспомогательные материалы» [13].

«ФЗП - фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная плата научно– технического персонала» [13].

«Ос.н - отчисления на социальные нужды» [13].

«Зэ-э - затраты на электроэнергию для выполнения исследований» [13].

«Зоб - затраты, связанные с эксплуатацией оборудования» [13].

«Зпр - прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов или макетов» [13].

«НР - накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и охрану труда» [13].

«Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле:» [13].

$$ЗМ = ЗМ_{осн} + ЗМ_{всп} \quad (2)$$

«ЗМ<sub>осн</sub> - затраты на основной материал» [13].

«ЗМ<sub>всп</sub> - затраты на вспомогательный материал» [13].

«Затраты на основной материал рассчитываются по формуле:» [13].

$$ЗМ_{осн} = Н_p + Ц_m + U, \quad (3)$$

«где  $Н_p$  - норма расхода основного материала на 1 образец для испытаний» [13].

« $Ц_m$  - оптовая цена 1 кг основного материала» [13].

« $U$  - количество образцов, шт» [13].

«Затраты на вспомогательный материал принимаем равными 20% от затрат на основной материал:» [13].

$$ЗМ_{всп} = 0,2 \cdot ЗМ_{осн} \quad (4)$$

Проведя изучения интернет источников была взята информация по цене за 1 пластину алюминиевого сплава АМг – 6 равную 395 рублей

$$ЗМ_{осн} = 0,5 \cdot 395 \cdot 8 = 1580 \text{ руб.}$$

$$ЗМ_{всп} = 0,2 \cdot 395 = 79 \text{ руб.}$$

$$ЗМ = 395 + 79 = 474 \text{ руб.}$$

«Затраты на заработную плату научно– технического персонала:» [12].

$$ФЗП = ЗПЛ_{осн} + ЗПЛ_{доп} \quad (5)$$

« $ЗПЛ_{осн}$  - основная заработная плата научно–технического персонала» [13].

« $ЗПЛ_{доп}$  - дополнительная заработанная плата научно - технического персонала» [13].

«Основная заработная плата вычисляется по формуле:» [13].

$$ЗПЛ_{осн} = \Sigma T_{раб} \cdot C_d \cdot K_{пр} \cdot И \quad (6)$$

« $\Sigma T_{раб}$ – суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях)» [13].

« $C_d$  – дневная ставка каждого участника НИР, руб.» [13].

« $K_{пр}$  – коэффициент премиальных доплат (можно принять =1,5)» [13].

« $И$ – количество исполнителей на каждом этапе, чел» [13].

$$ЗПЛ_{осн} = 5 \cdot 800 \cdot 1,5 \cdot 1 = 6000 \text{ руб.}$$

«Дополнительная заработная плата определяется по формуле:» [13].

$$ЗПЛ_{\text{доп}} = 0,1 \cdot ЗПЛ_{\text{осн}} \quad (7)$$

$$ЗПЛ_{\text{доп}} = 0,1 \cdot 6000 = 600 \text{ руб.}$$

$$ФЗП = 6000 + 600 = 6600 \text{ руб.}$$

«Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле:» [13].

$$\text{Ос.н} = N_{\text{соц}} \cdot \text{ФЗП} / 100 \quad (8)$$

«где  $N_{\text{соц}}$  - норма отчислений на социальные нужды = 30%» [13].

$$\text{Ос.н} = 30 \cdot 6600 / 100 = 1980 \text{ руб}$$

«Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний:» [12].

$$З_{\text{э-э}} = \frac{M_{\text{об}} \cdot t_{\text{исп}}}{\eta} \cdot Ц_{\text{э-э}} \quad (9)$$

«где  $M_{\text{об}}$  - мощность оборудования (5 кВт)» [13].

« $t_{\text{исп}}$  - время проведения испытаний, час» [13].

« $\eta$  - коэффициент полезного действия оборудования (0,85)» [13].

« $Ц_{\text{э-э}}$  - цена 1 кВт·часа электроэнергии = 5,04 руб.» [13].

$$З_{\text{э-э}} = 5 \cdot 10,85 \cdot 5,04 = 30 \text{ руб.}$$

«Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:» [13].

$$З_{\text{об}} = A_{\text{об}} + P_{\text{т.р}} \quad (10)$$

«где  $A_{\text{об}}$  - амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования» [13].

« $P_{\text{т.р}}$  - расходы на текущий ремонт оборудования» [13].

«Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле:» [13].

$$A_{\text{об}} = \Sigma Ц_{\text{об}} \cdot \frac{N_{\text{а}} \cdot t_{\text{исп}}}{\Phi_{\text{эф}} \cdot 100} \quad (11)$$

«где  $N_{\text{а}}$  - норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 %» [13].

« $\Sigma Ц_{\text{об}}$  - суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб.» [13].

«Фэф - эффективный фонд времени работы оборудования (можно принять равным 1984 часа)» [13].

« $t_{исп}$  - время проведения испытаний, час» [13].

«Стоимость оборудования которое использовалось приведены в таблице 8» [13].

«Таблица 7 - Наименование и цены предоставленного оборудования» [13].

Наименование оборудования	Цена (руб.)
Плазмотрон для резки металлов FY-A200H	7500
Инверторный сварочный аппарат Brima TIG 200 AC/DC	72800

$$A_{об} = 72800 \cdot 24 \cdot 11984 \cdot 100 = 8,8 \text{ руб.}$$

«Расходы на ремонт оборудования:» [13].

$$P_{тр} = \sum C_{об} \cdot N_{т.р} \cdot k_{зФэф} \cdot 100 \quad (12)$$

«где  $N_p$  – норма отчислений на текущий ремонт оборудования (принимаем равный 35%)» [13].

« $K_з$  – коэффициент загрузки оборудования» [13].

$$K_з = \frac{\text{поб. расчет}}{\text{поб. прин}} \quad (13)$$

$$K_з = \frac{1}{1}$$

$$P_{тр} = \frac{80300 \cdot 35 \cdot 1}{1984 \cdot 100} = 14,1 \text{ руб.}$$

$$Z_{об} = 8,8 + 14,1 = 22,9 \text{ руб.}$$

«Прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов, принимаем в размере 5% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:» [13].

$$\text{Зпр} = 0,05 \cdot \text{ФЗП} \quad (14)$$

$$\text{Зпр} = 0,05 \cdot 6600 = 330 \text{ руб.}$$

«Накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и на охрану труда) принимаем в размере 55% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:» [13].

$$\text{НР} = 0,55 \cdot \text{ФЗП} \quad (15)$$

$$\text{НР} = 0,55 \cdot 6600 = 3630 \text{ руб.}$$

Оборудования и инструмента уже есть на кафедре в лаборатории, поэтому дополнительные финансы не требуются на покупку.

### **Заключение по разделу**

Так было посчитано экономическое затраты на выполнение исследования теплового состояния плазмотрон для сварки на токе обратной полярности. Результаты потраченных ресурсов приведены в таблице 9.

Таблица 8 - Необходимые затраты на проведение исследования

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Затраты на материал	395
Фонд заработной платы	6600
Отчисления на социальные нужды	1980
Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний	30
Затраты на оборудование	22,9
Прочие затраты	330
Накладные расходы	3630
Общие затраты на проведение работы	12987,9

## Заключение

В выпускной квалификационной работе «Исследование теплового состояния плазмотрона при сварке на токе обратной полярности» была достигнута цель работы по исследованию теплового состояния плазмотрона на токе обратной полярности, что привело к повышению производительности режущих плазмотронов для использования в сварке.

Проведен анализ способ сварки сжатой дугой и выбран способ сварки сжатой дугой на обратной полярности для сварки алюминиевых сплавов, и описан технологический процесс способа сварки, так же проведен анализ конструкции плазмотронов для воздушно-плазменной резки и доработана конструкция плазмотрона для ведения сварки.

Проведен реальный эксперимент состояния плазмотрона при помощи калориметрирования, а также проведены опыты математической модели плазмотрона и полученные экспериментальные данные, свидетельствуют о том, что применение постоянного тока обратной полярности при сварке сжатой дугой более эффективно. Переменный ток не обеспечивает эквивалентного тепловложения при сварке ввиду возможного образования аварийного режима сварки и выхода сжимающего сопла из строя, это в свою очередь приводит к снижению производительности процесса или изменению плотности распределения теплового потока по причине вынужденного увеличения диаметра сжимающего сопла.

Развитием данного проекта будет внедрение модернизированного плазмотрона на предприятия, чтобы получить сведения о работоспособности плазмотронов в полноценных рабочих условиях и впоследствии доработки под условия производства.

В дальнейшем будут проводиться исследования стального неплавящегося электрода для сварки алюминиевых сплавов, что позволит увеличить стойкость электрода.

## Список используемых источников

1. Аль – Шамки А.А.О., Шепелев А.Ф., Финаев В.И. Особенности плавления присадочного и основного металла при плазменной сварке в аспекте создания систем автоматического управления // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1
2. Баженов А. М. Плазменная сварка алюминиевых сплавов малых толщин / А. М. Баженов, А. И. Панов, И. А. Гилев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17. – № 3. – С. 5– 12. – DOI 10.15593/2224– 9877/2015.3.01.
3. Бурмистров Е. Г. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте : учебник / Е. Г. Бурмистров. –3– е изд., стер. – Санкт– Петербург : Лань, 2020. –552 с. – ISBN 978– 5– 8114– 5234– 7. – Текст : электронный // Лань : электронно– библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/138176> (дата обращения: 15.11.2020). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Вашуков Ю.А. Особенности сварки легких конструкционных материалов: учебное пособие / Ю.А. Вашуков. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – 80 с.: ил.
5. Вартгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Вартгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
6. Гилев И. А. Исследование работы двухдугового плазматрона на токе обратной полярности / И. А. Гилев, С. Д. Неулыбин, Ю. Д. Щицын // Техника и технологии машиностроения : Материалы IV международной студенческой научно– практической конференции, Омск, 25–30 марта 2015 года / Редакционная коллегия: Е.Н. Еремин (отв. редактор), Ю.О. Филиппов, А.Г. Анатольев. - Омск: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2015. – С. 286– 290.



7. ГОСТ ISO 6848-2020. Межгосударственный стандарт: Дуговая сварка и резка электроды неплавящиеся вольфрамовые. Классификация: Arc welding and cutting. Nonconsumable tungsten electrodes. Classification: дата введения 2020-12-01 / Саморегулируемая организация Ассоциация "Национальное агентство контроля сварки" (СРО Ассоциация "НАКС") – Изд. официальное . - М.: Стандартиформ, 2020 – 10 с.

8. Григорьев, Е. Г. Сварка высоковольтным импульсом тока титана ВТ1–0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т / Е. Г. Григорьев, В. Н. Базанов // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Естественные науки. - 2008. - № 2. - С. 84 - 88.

9. Гринюк А. А. и др. Основные тенденции развития плазменно–дуговой сварки алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. – 2015. – №. 11. – С. 39– 50.

10. Дедюх Р. И. Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом (обзор) // Сварочное производство. - 2014. - №. 5. - С. 34 - 39.

11. Демидов Л. И. Плазменная сварка алюминиевых сплавов // Итоги и перспективы интегрированной системы образования в высшей школе России: образование–наука–инновационная деятельность. – 2011. – С. 396.

12. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах М. : Металлургия, 1989. – 384 с.

13. Краснопевцева И.В. Методическое пособие по выполнению экономической части дипломного проекта производственно технологического характера для студентов специальности 150700.02.65 и направления подготовки 15.03.01 / И. В. Краснопевцева. –Тольятти: ТГУ, 2015. –С.3– 22

14. К.В Васильев; Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы; Газоэлектрическая резка металлов; Москва 1963

15. Лемешко Е. В. Исследование технологии сварки импульсным

питанием при сварке неповоротных стыков на сварочной установке A21 PRB 33– 90 / Е. В. Лемешко, А. М. Токенова // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2020. – № 9. – С. 81– 83.

16. Лопухов Ю. И. Исследование импульсной сварки TIG высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / Ю. И. Лопухов, Б. М. Токтаубаев // Вестник Восточно– Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2016. – № 2. – С. 101– 105

17. Момсин Е.С, Самсонов С.С, Кочкаров И.И, Советкин Д.Э. Оценка эффективности плазмотрона при сварке на токе обратной полярности // 2024. С.5.

18. Михальченков А.В., Р.Ш. Цыплаков. Электронно-лучевая сварка. Преимущества и недостатки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики.-2017.-Т.1.-С.414.

19. Моторин К. В. Сварка точками 3 – х фазной сжатой дугой / К. В. Моторин, Г. М. Короткова // Сварка. Реновация. триботехника : тезисы докладов VIII Уральской научно– практической конференции, Нижний Тагил, 02–03 февраля 2017 года / ответственные редакторы В. А. Коротков, В. Ф. Пегашкин; Министерство образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагильский технологический институт (филиал). – Нижний Тагил: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – С. 16– 20.

20. Патент № 2798648 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/02, В23К 9/167, В23К 10/02. Неплавящийся электрод для дуговой сварки : № 2022133144 : заявл. 16.12.2022 : опубл. 23.06.2023 / В. П. Сидоров, Д. Э. Советкин

21. Патент № 2757877 С1 Российская Федерация, МПК В23К 31/12, В23К 9/32, G01К 17/06. Сварочный калориметр : № 2021102994 : заявл.

08.02.2021 : опубл. 22.10.2021 / В. П. Сидоров, Д. Э. Советкин, А. В. Мельзитдинова

23. Сидоров В. П. О допустимых токах на вольфрамовый электрод дуги с разнополярными импульсами тока / В.П. Сидоров, Д.Э. Советкин, Г.М. Короткова //Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22. – №. 4. – С. 5–12.

24. Старцев В.А, Глуховский В.Н, Ганюшкин А.Н, Тимофеев В.В. Плазмотрон для воздушно-плазменной резки / 2002

25. Сидоров В. П., Советкин Д. Э. Наплавка покрытыми электродами дугой, питаемой разнополярными импульсами тока //Сварка. Реновация. Триботехника: материалы IX Уральской научно– практической конференции. –Нижний Тагил, 2019. – Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ, 2019. – №. 9. – С. 58– 63.

26. Сидоров В.П., Короткова Г.М., Забияка И.С., Хурин С.А., Троицкий В.А Влияние способов подачи плазмообразующего газа на пятно нагрева при сварке сжатой дугой // Вектор науки Тгу. № 3. 2012. №3

27. Сидоров В.П. Влияние баланса полярностей на эффективную мощность дуги при точечной плазменной сварке алюминиевых сплавов / В.П. Сидоров, Д.Э. Советкин // Вестник РГУПС. – 2019. – № 4. – С. 26–33.

28. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики / О. И.Невский, В. М. Бурков, Е. П. Гришина, Е. Л. Гаврилова. – Иваново : ИГХТУ, 2006. – 282 с. –Текст : электронный // Лань : электронно– библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/4471> (дата обращения: 02.12.2020). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

29. Сидоров В. П., Советкин Д. Э. Эффективная мощность разнополярной дуги в аргоне с вольфрамовым электродом при сварке алюминия //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23. – №. 1. – С. 5-12 DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.01

30. Сидоров В. П. и др. Эффективная мощность сварочной дуги обратной полярности при наплавке алюминия плавящимся электродом //Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2020. – №. 4. – С. 34-42. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-34-42

31. Сидоров В. П., Советкин Д. Э. Эффективная мощность сжатой сварочной дуги с разнополярными импульсами тока //Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – №. 2. – С. 57-66.

32. Сидоров В.П., Энергетические характеристики сжатой сварочной дуги в аргоне: монография / В.П. Сидоров. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 236 с. : обл.

33. Grinyuk A. A. et al. Main tendencies in development of plasma– arc welding of aluminium alloys //The Paton Welding J. – 2015. – Т. 11. – С. 31– 41.

34. Jiang C., Zhang F., Wang Z. Image processing of aluminum alloy weld pool for robotic VPPAW based on visual sensing //IEEE access. – 2017. – Т. 5. – С. 21567– 21573.

35. Martikainen J. K., Moisio T. J. I. Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels //Welding journal– New York– . – 1993. – Т. 72. – С. 329– s.

36. Song S. et al. Penetration state recognition based on the double– sound– sources characteristic of VPPAW and hidden Markov Model //Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Т. 234. – С. 33– 44.

37. Zhang Q. L. et al. Soft variable polarity plasma arc horizontal welding technology and weld asymmetry //Science and Technology of Welding and Joining. – 2015. – Т. 20. – №. 4. – С. 297– 306