

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, специальности)

«Современные технологические процессы изготовления деталей  
в машиностроении»  
(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Плазменная сварка алюминиевых сплавов дугой с  
разнополярными прямоугольными импульсами тока

Студент

А.А. Сандер

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

ст.преподаватель Д.Э.Советкин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультанты

к.т.н., доцент О.М. Сярдова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

к.т.н., доцент А.Н. Москалюк

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

## Аннотация

В выпускной квалификационной работе проведен опытно–экспериментальный анализ влияния регулируемых прямоугольных импульсов тока на форму и размеры точечных сварных соединений, выполненных плазменной сваркой.

Приводятся данные о потреблении алюминия начиная с 2010 по 2020 г., проводится анализ известных способов плазменной сварки алюминиевых сплавов. Приводятся данные о применяемых источниках питания с регулируемыми импульсами тока и их ценовой категории. Получены экспериментальные результаты влияния регулируемых импульсов тока на форму и размеры точечных соединений, выполненных сжатой дугой, при изменяемом балансе полупериодов с 10/90% (прямая/обратная), до 90/10% с шагом 15%. Получены данные о стойкости неплавящегося электрода при TIG сварке на балансах 10/90, 25/75, 40/60, 60/40, 75/25, 90/10.

Пояснительная записка состоит из 53 страниц и содержит графическую часть на 6 листах А1.

## **Abstract**

In the final qualification work, an experimental analysis of the influence of regulated rectangular current pulses on the shape and size of spot welded joints made by plasma welding was carried out.

The data on the consumption of aluminum from 2010 to 2020 are presented, and the analysis of known methods of plasma welding of aluminum alloys is carried out. Data on the applied power sources with adjustable current pulses and their price category for use in VPPAW welding (Plasma arc welding with variable polarity) were discussed. Experimental results of the influence of regulated current pulses on the shape and size of point connections made by a compressed arc with a variable half-life balance from 10/90% (forward/reverse) to 90/10% with a step of 15% are obtained. Then the obtained data on the resistance of the non-consumable electrode during TIG(Tungsten inert gas) welding on the balance sheets were analyzed 10/90%, 25/75%, 40/60%, 60/40%, 75/25%, 90/10% (Forward / reverse polarity).The results of the study show that the predominance of reverse polarity affects the purification of aluminum from oxides, and the predominance of direct polarity affects the penetration depth; when the critical currents are exceeded, regardless of the polarity balance, the electrode lengthens.

The explanatory note consists of 53 pages and contains a graphic part on 6 sheets A1.

## Содержание

Введение .....	5
1 Анализ исходных данных и известных технических решений .....	6
1.1. Особенности применения алюминиевых сплавов в промышленности	6
1.2 Виды, способы, преимущества и недостатки известных решений сварки алюминиевых сплавов .....	8
1.3 Источники питания для сварки алюминиевых сплавов .....	15
2 Методики исследования .....	21
2.1 Исследование влияния стойкости неплавящегося электрода в зависимости от баланса полярности .....	21
2.2. Моделирование распределения температур в вольфрамовом электроде .....	23
2.3 Параметры плазменной сварки, влияющие на качество точечных сварных соединений.....	24
2.4 Исследование влияния баланса полярности на форму и размеры наплавленных точек.....	26
3 Результаты исследований и их обсуждение .....	29
3.1. Стойкость неплавящегося электрода .....	29
3.2 Расчет максимальных температур.....	32
3.3 Результаты экспериментов по получению сварных точек.....	36
4 Экономическое обоснование работы .....	39
5 Экологичность и безопасность объекта исследования .....	45
5.1 Объект и его планировка.....	45
5.2 Описание процесса экспериментов .....	45
5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	46
5.4. Уменьшения влияния опасных факторов .....	47
Заключение .....	49
Список используемой литературы: .....	50

## Введение

Применение алюминия в качестве конструкционного материала, находит все большее распространение в современной промышленности. С каждым годом алюминиевые конструкции все больше встречаются в различных конструкциях, приборах, материалах [16].

Ранее применение известных способов сварки алюминия таких как TIG (Tungsten Inert Gas – ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа) и PAW (Plasma Arc Welding – сварка потоком плазменной дуги) ограничивалось использованием переменного синусоидального тока с дополнительной подачей импульса в момент перехода через нулевую точку. По большей степени именно этот фактор сдерживал использование плазменной сварки повсеместно т.к. такие источники питания не позволяли полностью раскрывать потенциал плазменной сварки ввиду своей дороговизны и крупных габаритов [2].

Начиная примерно с 2000 года, на рынке стали активно появляться малогабаритные, легкие, доступные инверторные источники питания, в том числе источники питания для TIG сварки с возможностью регулировки длительности полупериодов, которые позволяют регулировать время пребывания тока в положительной или отрицательной части периода, в том числе и независимую величину амплитуды тока для каждой полуволны [7]. Сегодня множество исследователей изучают влияние регулируемых импульсов тока на свойства и форму соединения. Именно поэтому изучение эффективности плазменной сварки в зависимости от баланса полярностей остается актуальным [22], [11].

Целью работы является повышение эффективности процесса плазменной сварки алюминиевых сплавов путем определения влияния доли баланса полярности на геометрические размеры сварного соединения из алюминиевых сплавов и стойкости неплавящегося электрода, применяемого при плазменной сварке.

# 1 Анализ исходных данных и известных технических решений

## 1.1. Особенности применения алюминиевых сплавов в промышленности

На сегодняшний день потребление алюминия и его сплавов в мире занимает второе место после стали. Алюминий обладает рядом уникальных физико – химических, коррозионных и технологических свойств, благодаря которым он применяется в таких отраслях промышленности как авиастроение, кораблестроение, вагоностроение, ракетостроение и получает все большее распространение [3].

По данным работы организации «WorldBank», использование алюминия и его сплавов увеличивается с каждым годом в среднем более чем на 1%, график роста показан на рисунке 1 [1].



Рисунок 1 – Динамика роста потребления алюминия

Алюминию и его сплавам присуще такие свойства как низкий удельный вес и высокая пластичность таблица 1, таблица 2.

Таблица 1 – Химический состав алюминиевого сплава АМг6

Химические свойства									
Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примесей
до 0,4	до 0,4	0,5–0,8	0,02–0,1	91,1–93,68	до 0,1	0,002–0,005	5,8–6,8	до 0,2	прочие, каждая 0,05; всего 0,1

Таблица 2 – Физические свойства алюминиевого сплава АМг6

Физические свойства						
T	E 10 <sup>-5</sup>	A 10 <sup>-5</sup>	λ	ρ	Cp	R 10 <sup>-5</sup>
Град	МПА	1/Град	Вт/(м*град)	Кг/ м <sup>3</sup>	Дж/(кг*град)	Ом*м
20	0.71	–	–	2640	–	67.3
100	–	24.7	122	–	922	–

Алюминий и его сплавы активно взаимодействуют с кислородом, в результате чего на поверхности образуется соединение оксида алюминия  $Al_2O_3$ , который присутствует на всей поверхности детали. Получить качественное сварное соединение, без предварительной очистки пленки проблематично, так как температура плавления оксидной пленки составляет около  $2060^{\circ}C$ , а температура плавления основного металла около  $660^{\circ}C$ , в совокупности с высокой теплопроводностью, расплавление оксидной пленки очень затруднительно. Для получения качественного сварного соединения удаление оксидной пленки перед сваркой обязательно.

Существует три основных способа удаления окисной пленки с поверхности изделий: 1 – механический способ, 2 – химический, 3 – физический способ. Механическим способом оксид удаляется щеткой или любым другим абразивными элементами, химическим способом – травлением химическими растворами, флюсами, физическим способом – например в процесс сварки детали на обратной полярности или переменным током [9].

Поскольку у алюминия высокий коэффициент линейного расширения и низкий модуль упругости, Al в чистом виде используется редко, как правило в конструкциях используются его сплавы такие как АМг3, Амг6 [19].

## 1.2 Виды, способы, преимущества и недостатки известных решений сварки алюминиевых сплавов

В настоящее время известно множество способов сварки алюминиевых сплавов: ручная дуговая сварка покрытыми электродами, ручная и механизированная в среде защитных газов, автоматическая по слою флюса, плазменная сварка, сварка трением, контактная сварка. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки, которые могут существенно влиять на качество соединения.

К наиболее распространенным способам сварки алюминиевых конструкций относятся:

- TIG – сварка – сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов.
- MIG – механизированная сварка плавящимся электродом в среде инертных газов.
- PAW – плазменная сварка сжатой дугой в среде инертных газов.

Таблица 3 – Сравнение способов сварки

Вид сварки	MIG	TIG	MMA	PAW
Свариваемые металлы	Все типы сталей, алюминий	Все свариваемые материалы	Все типы сталей, алюминий	Все свариваемые материалы
Толщины	От 0,6 мм	От 0,25 мм	От 2 мм	От 0,25 мм
Скорость сварки	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая



Продолжение таблицы 3

Требуемая квалификация	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая
Необходимость зачистки от брызг и шлака	Требуется	Не требуется	Требуется	Не требуется
Загазованность процесса	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая
Форма и род тока	Обратная полярность, переменный синусоидальной формы	Обратная полярность, прямая полярность переменный синусоидальной формы	Обратная полярность, прямая полярность переменный синусоидальной формы	Обратная полярность, прямая полярность переменный с РПИ

В настоящее время к способам сварки алюминиевых сплавов предъявляются следующие требования:

- Эффективное удаление оксидной пленки алюминия, которая формируется на поверхности металла
- Высокая производительность
- Воспроизводимость процесса, стабильность.
- Получение качественного сварного соединения.

Наиболее распространенным способом сварки алюминиевых сплавов является TIG – сварка. Как правило она производится на переменном токе с применением присадочной проволоки, или без нее. Однако, основной проблемой при применении такого способа является неустойчивая блуждающая дуга и низкая производительность.

Повысить производительность и стабильность TIG сварки возможно использованием сжатой дуги, такой способ сварки называют плазменной сваркой.

Первые сведения о использовании плазменной струи в качестве инструмента для обработки металла, появляются после 1950 – х годов. Однако применимость данного способа была ограничена. По – видимому, это связано со сложностями конструкций источников питания, требующих напряжения холостого хода (ХХ) не менее 80 В, и устойчивостью горения дуги на переменном синусоидальном токе [7], [8].

Появление новых инверторных источников питания с регулируемыми прямоугольными импульсами тока (РПИ), существенно меняют позиции плазменной сварки, резки. Использование инверторов с РПИ позволяют отказаться от громоздких трансформаторных источников питания с синусоидальной формой тока. И решить одну из основных проблем плазменной сварки это стабильность повторных зажиганий при смене полярности.

Следует отметить, что при сварке сжатой дугой практически отсутствует разбрызгивание, изделие меньше разогревается и снижаются деформации. Предварительная подготовка изделий, а именно, разделка кромок, применяется для больших толщин, поскольку плазменная сварка обладает высокой проплавливающей способностью [8].

Чтобы понять, как влияет баланс длительности обратной и прямой полярности переменного прямоугольного тока, необходимо проанализировать информацию о уже известных способах плазменной сварки их преимуществах и недостатках.

### **1.2.1 Плазменная сварка на постоянном токе прямой полярности**

При сварке на прямой полярности, показана на рисунке 2, происходит более глубокое проплавление металла, чем при сварке на обратной полярности, при этом нагрузка на неплавящийся электрод значительно меньше, чем на обратной полярности [8].

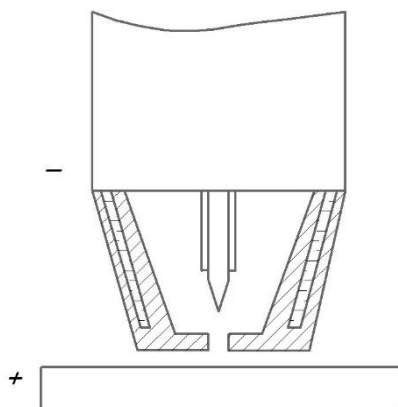


Рисунок 2 – Схема плазменной сварки на прямой полярности

Срок службы плазматрона и сжимающего сопла продлевается. Плазматроны для сварки на прямой полярности имеют меньшие размеры и не требуют столь интенсивного охлаждения. Однако такой способ не подходит для сварки алюминия, поскольку прямая полярность не способна эффективно удалять оксидную пленку с поверхности.

### **1.2.2 Плазменная сварка на постоянном токе обратной полярности**

Ток обратной полярности обеспечивает лучшую очистку от оксидной пленки за счет катодного распыления показано на рисунке 3, где анод – электрод плазматрона, а катод – свариваемое изделие. По сравнению с переменным синусоидальным током, сварка на постоянном токе обратной полярности менее сложна в реализации. В качестве источника питания возможно использовать обычные сварочные выпрямители или инверторы. Но у данного метода существует отличительный недостаток, при сварке на обратной полярности выделяется большое количество тепла, воздействующие на неплавящийся электрод, сокращая срок службы электрода и сжимающего сопла. Для увеличения срока службы плазматрона, применяют интенсивное охлаждения и изготавливают некоторые части из

материалов с высокой теплопроводностью. Такой способ сварки применяется при изготовлении криогенных конструкций из алюминия [15].

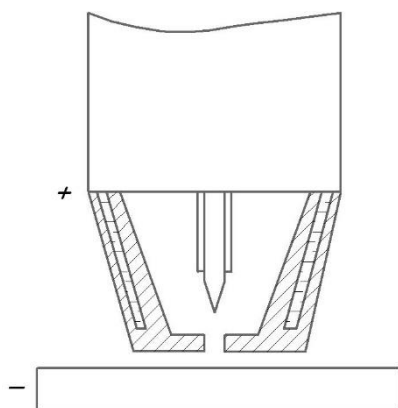


Рисунок 3 – Схема плазменной сварки на обратной полярности

### 1.2.3 Плазменная сварка переменным синусоидальным током

Первые исследования по плазменной сварке, синусоидальным током, проводились еще в 1960 – х годах в ИЭС им. Е.О. Патона. 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 4 [6], [12].

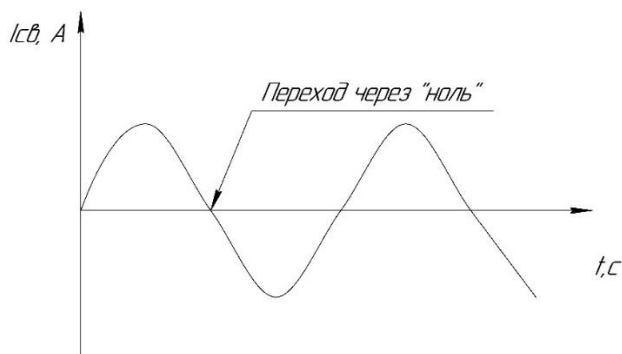


Рисунок 4 – Ток синусоидальной формы

При сварке на переменном токе, происходит очищение поверхности алюминиевого сплава, в момент нахождения тока в отрицательном полупериоде, большинство тепла при этом сосредоточено на электроде. Такой способ сварки использовался в судостроении в 1970 годах, однако широкого распространения не получил, по – видимому, из – за сложности и дороговизны оборудования [5].

#### 1.2.4 Сварка трехфазной сжатой дугой

Сварка трехфазной дугой представляет собой способ, в котором используется два электрода внутри плазматрона, схема показана на рисунке 5. 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 [13], [14], [17].

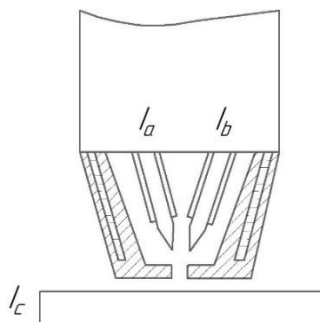


Рисунок 5 – Схема плазменной сварки на обратной полярности

### 1.2.5 Плазменная сварка разнополярным прямоугольными импульсами тока

Процесс плазменно – дуговой сварки разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока, схема показана на рисунке 6, под названием Variable Polarity Plasma Arc Welding (VPPAW) был зарегистрирован фирмой «Hobart Brothers Inc» в 1978 г. 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 [18]. 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.

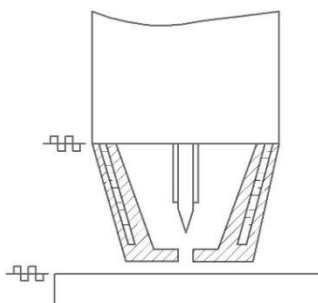


Рисунок 6 – Схема плазменной сварки разнополярными прямоугольными импульсами тока

### 1.3 Источники питания для сварки алюминиевых сплавов

В современных источниках питания для аргодуговой сварки применяются новые полупроводниковые приборы, электронные элементы управления, повышающие точность регулирования и стабилизации параметров режима сварки, при этом габариты источников значительно уменьшаются, вместе с уменьшением комплектующих [20]. Полупроводниковые преобразователи формируют в сварочной цепи переменный прямоугольный ток, благодаря которому повышается стабильность горения дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом.

Современные источники питания – сварочные инверторы преобразовывают постоянный ток в переменный с возможностью задавать форму импульса тока, частоту, амплитуду и выходное напряжение. Свое распространение инверторные источники питания получили за счет ряда преимуществ по сравнению с традиционными источниками питания трансформаторного типа. Как правило инверторы TIG сварки имеют блок поджига (встроенный осциллятор) и стабилизирующий высокочастотный блок, который способствует стабильному переходу через ноль.

Некоторые современные модели инверторных источников питания для TIG сварки, которые позволяют регулировать баланс полярностей приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Сварочные инверторы TIG сварки, и их ценовая категория

Источник питания	Стоимость
 <p>AURORA PRO INTER TIG 200 AC/DC PULSE Mosfet</p>	55.000 тыс. руб.
 <p>BRIMA TIG 200P AC/DC</p>	52.000 тыс. руб.
 <p>Redbo PulseTIG – 200</p>	43.000 тыс. руб.
 <p>Viking tig 200p pro</p>	29.000 тыс. руб



Продолжение таблицы 4

 <p>CEA MATRIX 2200 AC/DC</p>	<p>300.000 тыс. руб</p>
 <p>ALLOY MC – 630T AC/DC</p>	<p>450.000 тыс. руб.</p>

На кафедре СОМДиПП Тольяттинского государственного университета имеется инверторный источник питания BRIMA TIG 200P AC/DC, с возможностью регулирования длительности обратной полярности. Характеристики источника приведены в таблице 5. Принципиальная схема приведена на рисунке 7, блок – схема на рисунке 8, вольтамперные характеристики источника на рисунке 9.

Таблица 5– Характеристика BRIMA TIG 200P

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	200

Продолжение таблицы 5

Диапазон регулировки тока	10– 200
Баланс переменного тока	20– 80
Потребляемая мощность, кВт	5.9
КПД, %	85



Рисунок 7 – Принципиальная схема Vrima TIG 200P AC/DC

Блок схема (Block diagram)

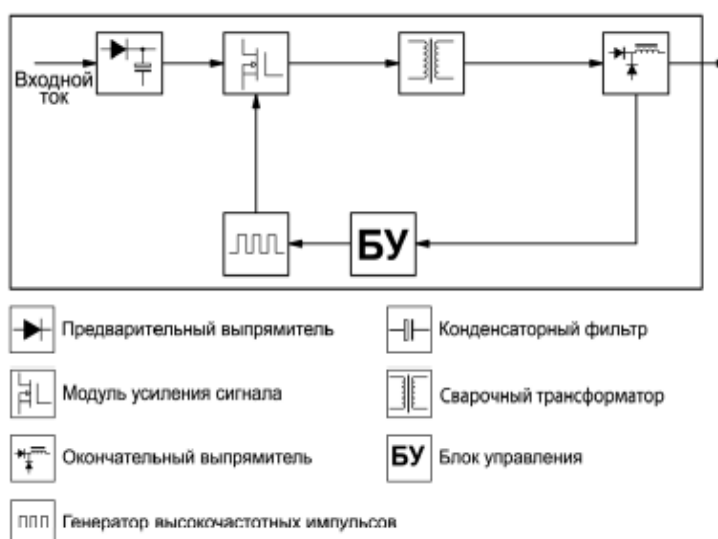


Рисунок 8 – Блок схема Vrima TIG 200P AC/DC

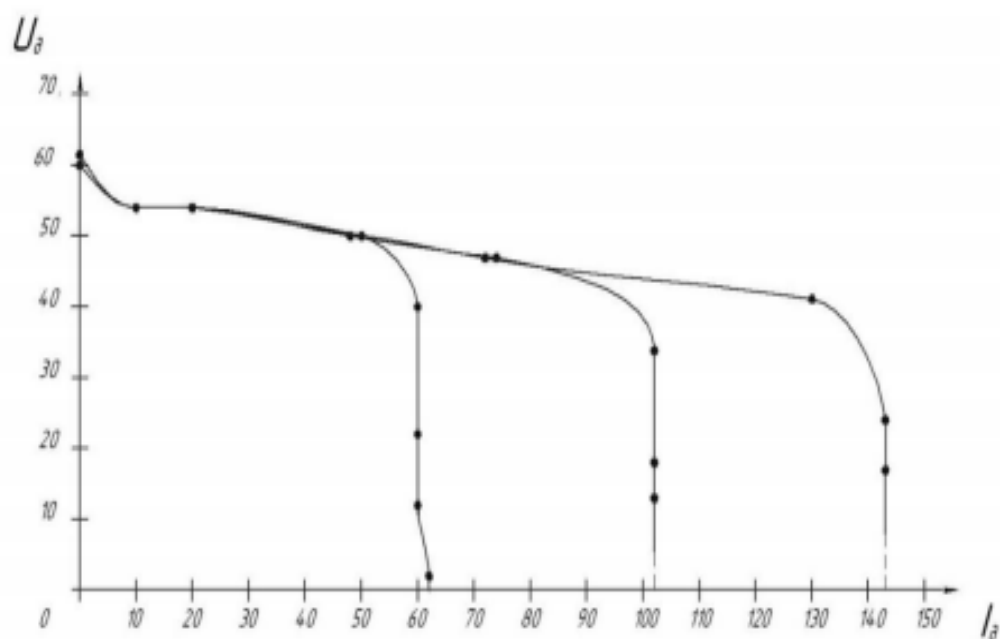


Рисунок 9 – Вольтамперные характеристики Brima TIG 200P AC/DC

Исходя из уже известных способов плазменной сварки, целесообразным будет использование источников питания с РПИ, которое позволит:

- Повысить стабильность процесса плазменной сварки;
- Повысить стабильность поджига дуги; (встроенный осциллятор)
- Производить гибкую регулировку баланса полярностей, увеличивая стойкость вольфрамовых электродов (ВЭ) и эффективное удаление оксидной пленки;
- Повысить применяемость плазменной сварки на малых и крупных предприятиях, за счет низкой стоимости оборудования.

При использовании источника питания переменного тока, появятся дополнительные параметры затрудняющие использование автоматической сварки, поскольку до конца не изучено влияние доли преобладание той или иной полярности на сварочную ванну. При сварке в ручном режиме эти параметры можно оценивать визуально и менять расстояние от плазматрона до детали в ходе сварки, тем самым влияя на глубину сварочной ванны [21], [23].

#### **1.4. Заключение по разделу**

Исходя из анализа источников приведённых выше целью работы будет являться повышение эффективности процесса плазменной сварки алюминиевых сплавов путем определения влияния доли баланса полярности на геометрические размеры сварного соединения и стойкость неплавящегося электрода.

Задачи исследования:

- Разработка методики видеосъемки дуги и электрода при различных балансах полярностей.
- Проведение исследований стойкости ВЭ в зависимости от баланса полярностей.
- Разработка методики получения сварных соединений плазменной сварки для различных балансов полярностей.
- Проведение исследования влияния баланса полярности на форму и размеры наплавленных точек.

## **2 Методики исследования**

В процессе сварки с регулируемыми прямоугольными импульсами тока соотношение доли прямой и обратной полярности, могут значительно влиять на форму и размеры сварных соединений, в том числе и стойкость неплавящихся электродов. Поэтому представляется интересным получить зависимости изменений данных параметров от процентного соотношения полярностей. Ожидаемым результатом является возможность повышения эффективности процесса плазменной сварки с регулируемыми импульсами тока.

### **2.1 Исследование влияния стойкости неплавящегося электрода в зависимости от баланса полярности**

На первом этапе исследования проводились эксперименты по изучению стойкости неплавящегося электрода TIG – сварка. Неизменным оставалась длина дуги, которая составляла 2мм, время сварки 10с, подача защитного газа 8 л/мин. При этом изменялся баланс полярности от 10/90 (прямая/обратная) до 90/10 с шагом 15%, и сварочный ток. Сначала зажигалась дуга на рекомендуемом токе, а затем на токе, значительно превышающий рекомендуемый [15]. При превышении рекомендуемого тока, электрод естественно изменял свою длину, которая в дальнейшем фиксировалась, и усреднялась. «Технология сварки хорошо подходит для сварки в горизонтальном положении, поскольку она может обеспечить подходящее распределение энергии дуги и давления дуги» [24, с. 8]

Оценку стойкости вольфрамового электрода проводили по схеме, показанной на рисунке 10, рисунке 11. Использовали вольфрамовые электроды диаметром 3 мм, длиной 170 мм, без заточки с плоским торцом. Весь процесс нагревания электрода фиксировался на видеосъемку камерой CASIO с частотой 1000 кадр/с. Камера жестко устанавливалась на штативе

фокус настраивался на кончик электрода, после чего на объектив камеру устанавливался световой фильтр типа С – 5. Расстояние от камеры до кончика электрода около 30 см.

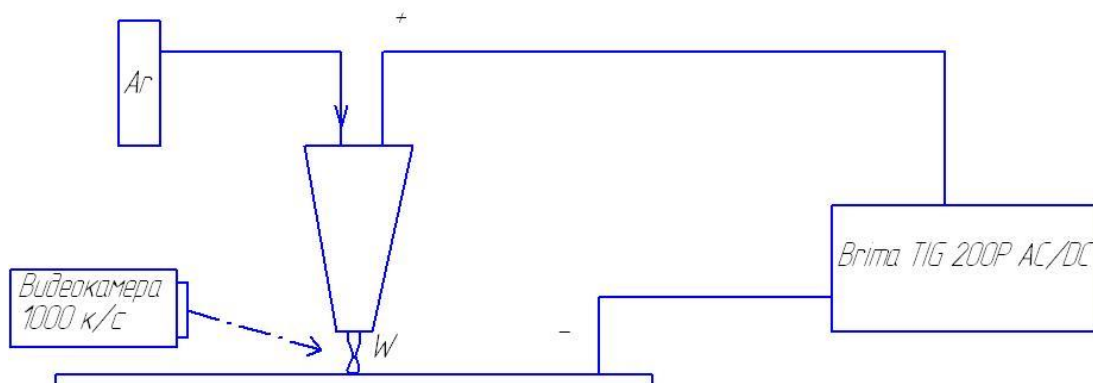


Рисунок 10 – Принципиальная схема установки



Рисунок 11 – Внешний вид сварочной горелки

Перед каждым экспериментом и после него, с помощью штангенциркуля измерялась длина электрода и делались его снимки, чтобы в дальнейшем провести сравнительный анализ изменений формы электрода. Кадры высокосортной съёмки позволяют отслеживать изменения и нагрев электрод и момент, в который начинает образовываться капля, на его кончике. При образовании капли видно, что дуга начинает гореть не с центра электрода, а с точки ближайшей к изделию.

## **2.2. Моделирование распределения температур в вольфрамовом электроде**

На втором этапе проводилось прогнозирование температур в электроде от допустимых токов осуществляли с помощью программного пакета NxThermal/Flow. Для моделирования использовали данные о физических характеристиках чистого вольфрама при разных температурах [10]. Влияние различных легирующих добавок в вольфрамовые электроды на температуру плавления невелики и поэтому марка электрода, по – видимому, мало будет сказываться на его стойкости при обратной полярности. Температура плавления вольфрама принималась  $3422^{\circ}\text{C}$ , расчетная длина электрода  $L=50$  мм. Торец электрода проектировался в форме полусферы. Токовая нагрузка выбиралась в области близкой к максимальной из допустимого диапазона [4], а тепловой поток на поверхности торца принимался постоянным. Учитывалось также выделение энергии протекающим током с учетом изменения удельного сопротивления вольфрама от температуры. Модель электрода разбивалась на 3D тетраэдральную сетку с шагом 0,5 мм.

Скорость аргона принималась 1,26 м/с, что соответствовало его расходу 8 л/мин, а его температура  $20^{\circ}\text{C}$ , использовались теплофизические свойства аргона из работы [14], [17]. Путем моделирования подбирали ток дуги, при котором в равновесном состоянии максимальная температура электрода будет равна температуре плавления вольфрама. Время расчета одного распределения температур на персональном компьютере составляло 6 мин. В результате расчета смоделированы распределение температур по длине электрода и кривые роста максимальной температуры для координаты 0,1 мм от конца электрода.

### 2.3 Параметры плазменной сварки, влияющие на качество точечных сварных соединений

В процессе точечной плазменной сварки существенное влияние на точечные сварные соединения могут оказывать формы и размеры плазматрона. Поэтому очень важно фиксировать в процессе эксперимента каждый из этих параметров.

На эскизе плазматрона, рисунок 12, отображены возможные параметры, в зависимости от которых могут изменяться параметры получаемых соединений:

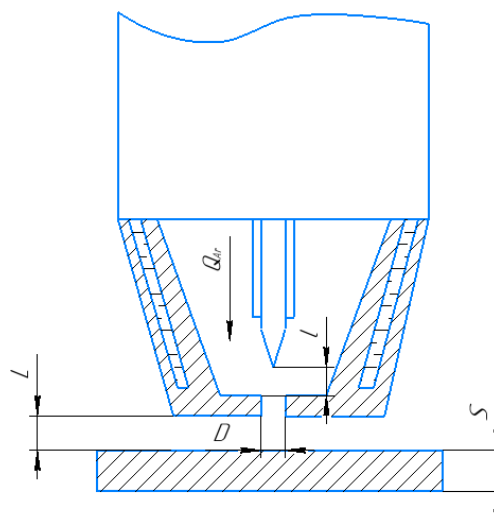


Рисунок 12– Эскиз плазматрона

- $L$  – величина зазора плазматрон – деталь, мм;
- $l$  – величина зазора неплавящийся электрод – сопло, мм;
- $d$  – диаметр неплавящегося электрода, мм;
- $D$  – диаметр отверстия сопла, мм;
- $S$  – толщина пластин, мм;
- $Q$  – расход плазмообразующего и защитного газа, л/мин.



В процессе пламенной сварки, можно получить стыковые соединения с полным проплавлением, а также частичным. Стыковые соединения, выполненные плазменной сваркой, не регламентируются ГОСТ, однако можно выделить ряд параметров, характеризующих их.

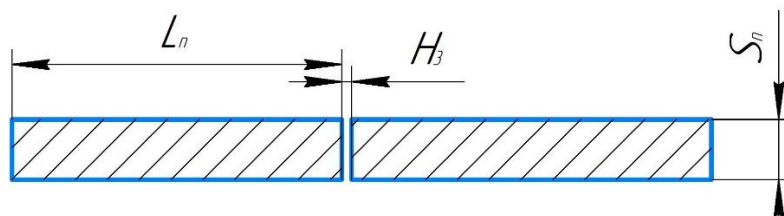


Рисунок 13 – Пластины до сварки.

На схеме сборки пластин показаны начальные параметры, рисунок 13:

- $L_n$  – длина свариваемой пластины, мм;
- $S_n$  – толщина пластины, мм;
- $H_3$  – ширина зазора, мм.

От перечисленных выше параметров, будут зависеть дальнейшие характеристики сварного соединения, например глубина проплавления.

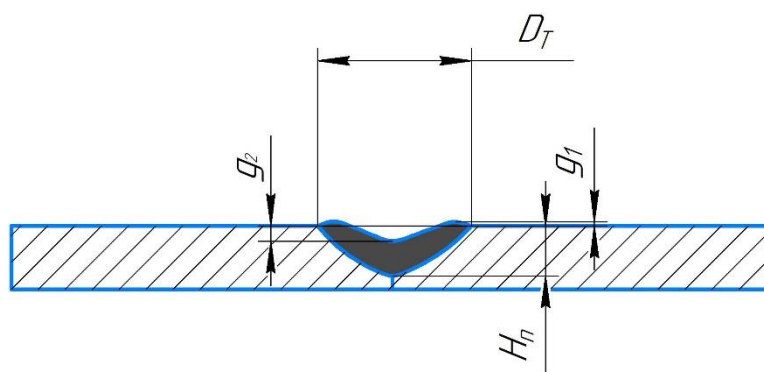


Рисунок 14 – Стыковое соединение с частичным проплавлением

На рисунке 14 показано стыковое соединение с частичным проплавлением, а также некоторые геометрические характеристики:

- $D_T$ – диаметр сварной точки, мм;
- $H_{\text{п}}$ – глубина проплавления, мм;
- $g_1$ – высота валика, мм;
- $g_2$ – глубина кратера, мм;

Глубина кратера, будет зависеть от давления дуги, а также от силы тока и времени сварки.

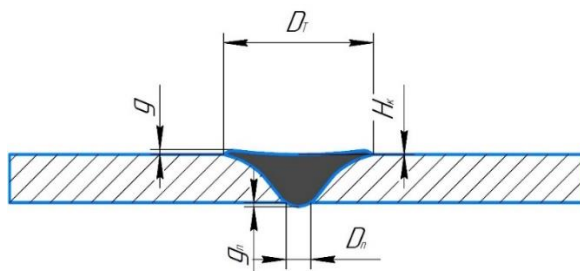


Рисунок 15 – Стыковое соединение с полным проплавлением

У стыкового соединения с полным проплавлением будут схожие геометрические характеристики, что и у соединения с частичным проплавлением, рисунок 15, однако добавится такой параметр как:

- $D_{\text{п}}$  – диаметр проплавления нижнего края пластины, мм;

Контролируя все известные параметры сварки, а также учитывая особенности и свойства алюминиевых сплавов, можно спрогнозировать получаемые характеристики соединения.

#### **2.4 Исследование влияния баланса полярности на форму и размеры наплавленных точек**

На третьем этапе проводилось исследование влияния баланса полярностей на сварные точки. Исследование производили по собранной схеме, рисунок 16.

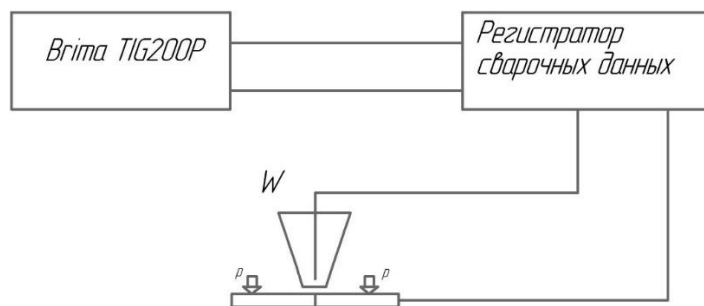


Рисунок 16 – Упрощенная схема стенда

Для сварки пластины зажимались на стенде с помощью прижимов. Образцы фиксировались для предотвращения деформации при нагреве. Выставлялся минимально возможный зазор между соплом и изделием.

Далее производился контроль всех выставленных параметров на источнике питания и производилась сварка образцов с высокочастотной записью данных силы тока 5кГц.

Режимы и параметры сварки:

Фиксированные:

- Сила сварочного тока
- Время сварки
- Длина сжатой дуги

Не фиксированные:

- Продолжительность прямой и обратной полярности
- Расход плазмообразующего газа

После сварки производился разлом образцов для визуальной оценки глубины проплавления, наличия дефектов и глубины кратера. Внешний вид установки показан на рисунке 17.

В качестве плазмотрона использовался плазмотрон прямого действия ГСД – 1 с коаксиальной подачей газа. В плазматроне конструктивно предусмотрена отдельная подача плазмообразующего и защитного газа, а также водоохлаждение.



Рисунок 17 – Внешний вид плазматрона ГСД – 1 и станда

Для вольфрамового электрода диаметром 3мм допустимую силу сварочного тока выбирали по формулам приведенным в статье «Сидоров В. П. О допустимых токах на вольфрамовый электрод дуги с разнополярными импульсами тока / В.П. Сидоров, Д.Э. Советкин, Г.М. Коротков».

Рекомендуемые токи для сварки неплавящимся электродом приведены в таблице 6[9].

Таблица 6 – Рекомендуемые токи

Род тока	Диаметр электрода, мм			
	3	4	5	6
Переменный	100– 160	140– 220	200– 280	250– 300
EN	140– 180	250– 340	300– 400	350– 450
EP	20– 40	30– 50	40– 80	60– 100

Ток прямой полярности обозначается EN, обратной полярности EP.

#### 2.4. Заключение по разделу:

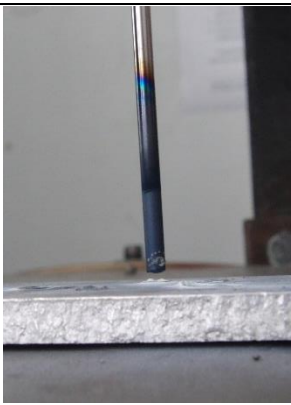


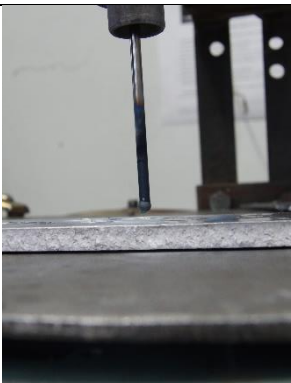

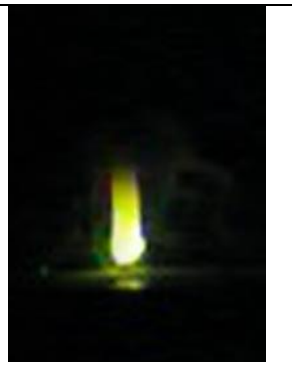
В разделе определены методики для проведения дальнейших экспериментов, описание методики проводилось с возможностью дальнейшей воспроизводимости. Проведение таких экспериментов не будет затруднительных при наличии советующего оборудования и квалификации.

### 3 Результаты исследований и их обсуждение

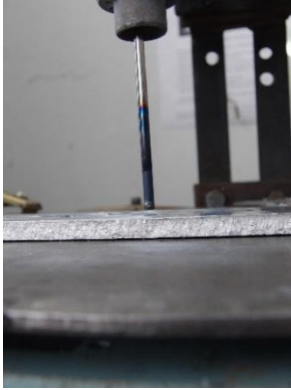


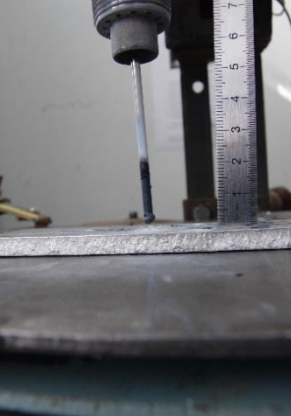


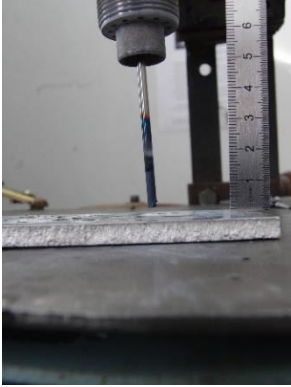
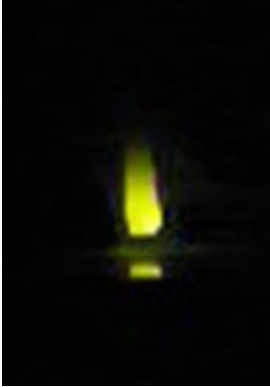
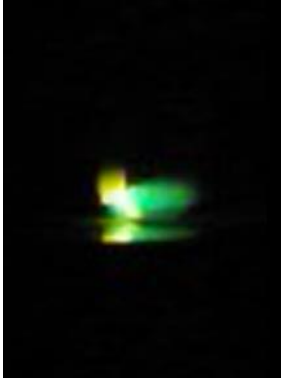
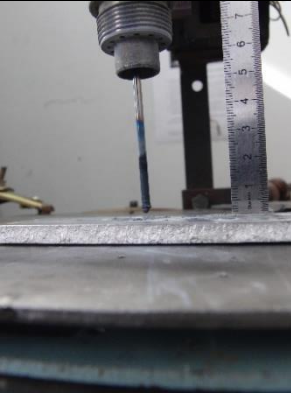


#### 3.1. Стойкость неплавящегося электрода

По проведенным опытам составлена сводная таблица 7, в которую включены фотографии электрода в начальные моменты сварки, в момент, когда дуга погасла и внешний вид электрода после сварки.

Таблица 7 – Экспериментальные результаты по стойкости НЭ в зависимости от баланса полярности

Электрод после сварки	Электрод в начале сварки	Электрод в конце сварки	Параметры сварки
			Баланс полярности: 10/90 ПП/ОП Сила сварочного тока: 35А Время сварки: 10с Изменение длины электрода: 0,1 мм
			Баланс полярности: 10/90 ПП/ОП Сила сварочного тока: 60А Время сварки: 10с Изменение длины электрода: 2мм

Продолжение таблицы 7

			<p>Баланс полярности: 25/75 ПП/ОП</p> <p>Сила сварочного тока: 40А</p> <p>Время сварки: 10с</p> <p>Изменение длины электрода: 0,2мм</p>
			<p>Баланс полярности: 25/75 ПП/ОП</p> <p>Сила сварочного тока: 60А</p> <p>Время сварки: 10с</p> <p>Изменение длины электрода: 2,2мм</p>
			<p>Баланс полярности: 40/60 ПП/ОП</p> <p>Сила сварочного тока: 55А</p> <p>Время сварки: 10с</p> <p>Изменение длины электрода: 0,4 мм</p>
			<p>Баланс полярности: 40/60 ПП/ОП</p> <p>Сила сварочного тока: 90А</p> <p>Время сварки: 10с</p> <p>Изменение длины электрода: 2,5мм</p>

По результатам экспериментов можно отследить, что при токах ниже критических, дуга горит неравномерно по торцу электрода, а на один из углов. Также на видеосъемке видно, что горение дуги происходило с наиболее нагретой части электрода и могло переходить от одного края, к другому. В некоторых моментах, когда электрод прогревался равномерно, дуга горела с торца. Замечено, что при остывании одного из краев, дуга переходила на другой край. Исходя из полученных результатов, можно сказать, электрод значительно меняет свою форму при токах близких или равных критическим. При просмотре видеосъемки отмечены интересные особенности дуги и изменения формы электрода. В один из моментов, расплавленная капля практически коснулась металла, однако сложно сказать точно, что именно препятствовало касанию капли. Предположительно, это может быть сила поверхностного натяжения или смена полярностей. Ещё одна замеченная особенность, это поведение дуги. В определенные моменты времени, а именно перехода на полупериод обратной полярности, дуга, возможно, создавала отрицательное давление. Дуга при горении на прямой полярности была цилиндрической симметричной формы рисунок 18.



Рисунок 18 – Горение дуги прямой полярности

При горении на обратной полярности, создается впечатление, что электрод находился в столбе дуги, при этом форму дуги описать сложно,

поскольку она не была постоянной, как на прямой полярности и часто менял свою форму.



Рисунок 19 – Горение дуги обратной полярности

### **3.2 Расчет максимальных температур**

Расчетные максимальные температуры на концах электрода представлены в равновесном состоянии и показана на рисунках 20 – 21. Достижение равновесного состояния в процессе сварки может занимать длительное время, а достижение температуры плавления электрода  $T_{пл}$  возможно в течении менее продолжительного времени, в процессе которого можно осуществлять, например, процесс точечной сварки. Следовательно, необходимо знать время достижения  $T_{пл}$  и  $T_{max}$ . Для расчета времени достижения  $T_{max}$  время выбиралось исходя из приращения температуры за 1 секунду не более чем на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



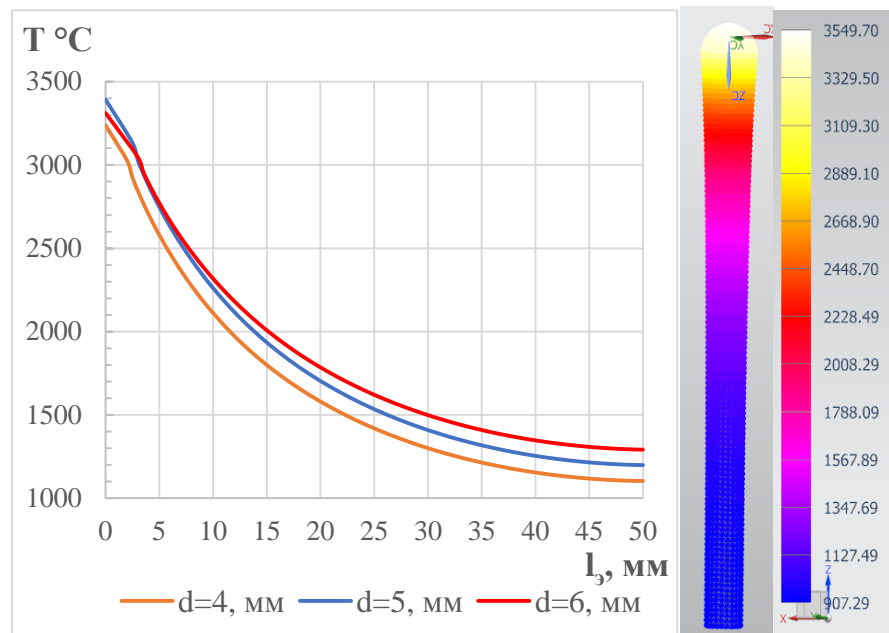


Рисунок 20 – Температуры через 15,0 с. Диаграмма для  $d=3$  мм

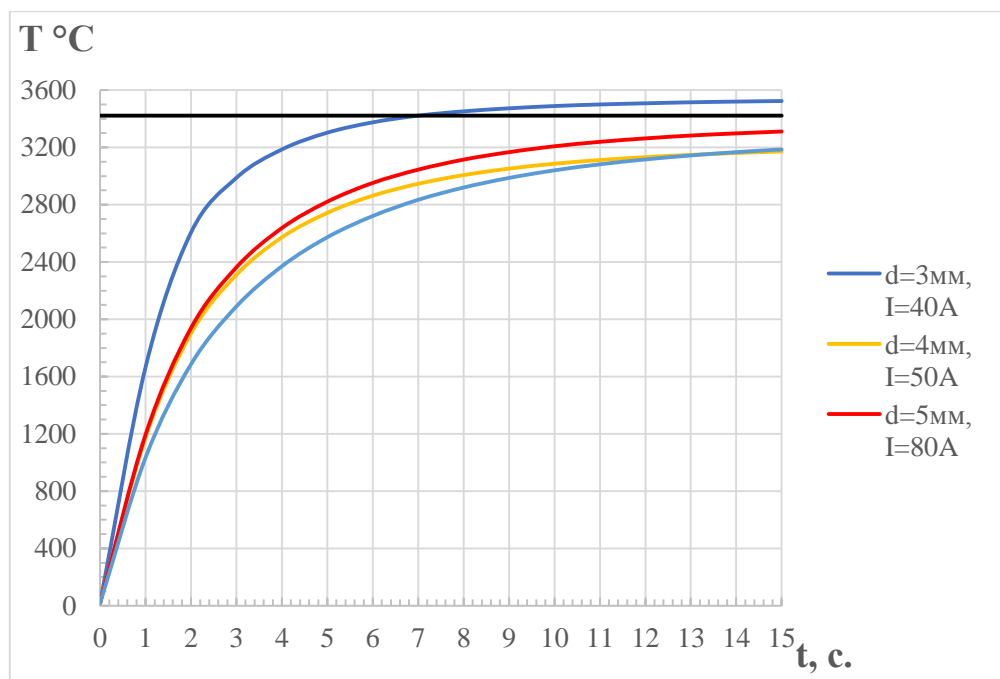


Рисунок 21 – Рост температур на максимальных рекомендуемых токах;  
 $z=0,1$  мм

Таблица 8 – Расчетные температуры вольфрамового электрода

d, мм	J, А/мм <sup>2</sup>	I, А	T <sub>max</sub> , °С	T <sub>min</sub> , °С	t достижения T <sub>max</sub> , с.	t достижения, T <sub>пл</sub> , с.
3	5,67	35	3351	885	23	–
		40 – P	3525	907	–	7
		45	3733	927	–	4
4	4,78	50 – P	3236	1102	26	–
		55	3367	1118	26	–
		60	3492	1131	13	–
5	4,08	75	3302	1187	30	–
		80 – P	3392	1198	31	–
		85	3478	1208	–	17
6	3,54	100 – P	3312	1291	33	–
		105	3378	1299	33	–
		110	3442	1307	–	29

Примечание: Буквой P отмечены максимальные токи, рекомендуемые в [15].

В таблице выделены серым цветом режимы наиболее близкие по температуре к температуре плавления, а также приведены значения плотностей тока рекомендованных режимов. Снижение допустимых плотностей тока объясняется относительным увеличением теплоотдачи от поверхности электрода с увеличением его диаметра. Расчетные температуры на «горячем» конце электрода при рекомендуемых максимальных токах достаточно близки к температуре плавления вольфрама. Для диаметра 3 мм увеличение тока на 5 А приводит к росту максимальной температуры на 200 °С. С увеличением диаметра такое приращение тока дает уже меньшее приращение температуры. Наибольшее приращение температуры на «холодном» конце электрода на порядок меньше и также уменьшается с

увеличением диаметра. Полученные данные о распределении температур по длине электрода можно использовать для проектирования составных, например, паяных вольфрамо – медных электродов. Температура плавления меди составляет 1100 °С. В месте соединения частей электрода должна быть гарантирована температура меньше температуры плавления припоя.

Чем больше диаметр электрода, тем менее интенсивно в нем спадает температура по длине. Поэтому составной электрод наиболее перспективен для меньших диаметров электрода.

Скоростная видеосъемка электрода (1000 кадров/с) в процессе горения дуги показала, что с достаточно высокой точностью можно установить скорость перемещения одной из изотерм, рисунок 22. Это можно использовать для дополнительной проверки сходимости расчетных и опытных температур. Задача заключается в идентификации температуры такой изотермы. Наблюдаемые на видеокдрах формы «горячего» конца электрода хорошо совпадает с расчетными формами.

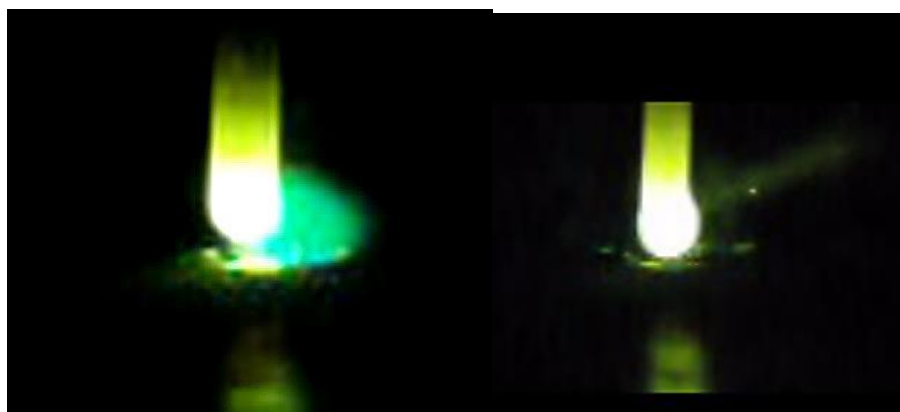


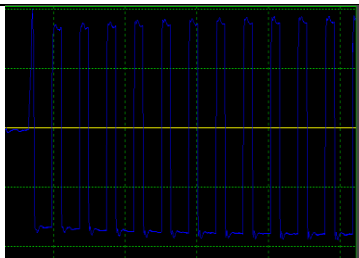


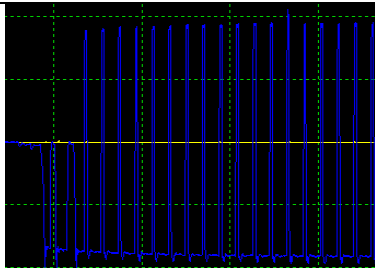


Рисунок 22 – Кадры скоростной видеосъемки свободной дуги длиной 2 мм  $d=3$  мм,  $I=40$  А

Дальнейшие исследования на компьютерной модели должны быть направлены на определение связи между повышением токовой нагрузки и временем достижения при этом температуры плавления на торце.

### 3.3 Результаты экспериментов по получению сварных точек

Полученные в результате исследования геометрические формы и размеры сварочной точки приведены в таблице 9, таблице 10.

Таблица 9 – Исследование формирования сварных точек и глубины проплавления соединений АМг– 6.

Режимы и параметры	Форма тока	Внешний вид сварной точки	Разрез сварной точки
25/75 ПП/ОП I=100 А tсв=10с D=10мм; гл. проплавления : 2мм			
90/10 ПП/ОП I=100 А tсв=10с D=10мм; гл. проплавления : 3мм			

Продолжение таблицы 9

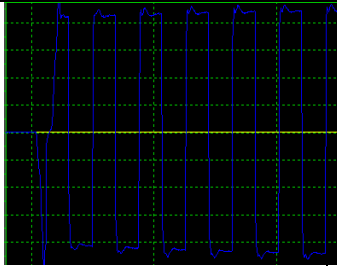


<p>60/40 ПП/ОП  <math>I_{св}=100</math> А  <math>t_{св}=10</math> с  <math>D=10</math> мм;                  ГЛ.                  проплавления: 3                  мм</p>			
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Таблица 10 – Параметры сварных соединений

№ образца	$I_{св}, А$	$t_{св}, с$	$Q_{ар}, л /мин$	Баланс полярности ПП/ОП	D сварной точки, мм	D нижней точки, мм	Глубина проплавления, мм
1	100	10	8	90/10	8	4	3
2	100	10	3	90/10	8	3,5	3
3	100	10	3	75/25	9	5	2,5
4	100	10	3	25/75	11	5	2
5	100	10	7	60/40	10	3	3
6	100	10	7	40/60	10	3	2,5
7	100	10	7	25/75	13	4	1,5
8	100	10	7	40/60	10	4	2

Проведено сравнение образцов и параметров сварки, в результате выяснено, что с увеличением длительности обратной полярности уменьшается степень проплавления изделия, однако при этом увеличивается ширина точки. Точки, сваренные с преобладанием обратной полярности, имеют характерный металлический блеск, что подтверждает ранее известные утверждения, о хорошей очистке сварочной ванны за счет катодного распыления на обратной полярности. Точки, сваренные с большим

преобладанием прямой полярности (90/10), имеют потемнения и различные включения. Это подтверждает то, что получение качественного сварного соединения на прямой полярности невозможно.

Форма и размер точки первого, второго образца различны, как и расход плазмообразующего газа. При увеличении расхода плазмообразующего газа, глубина кратера увеличивается. Один из недостатков при плазменной сварке это образование сварочного кратера, который образуется в результате усадки расплавленного металла сварочной ванны, в момент окончания сварки. Судя по результатам экспериментов, на размер кратера можно влиять, путем изменения баланса полярностей, однако с уменьшением величины кратера, уменьшается и глубина проплавления.

При изучении осциллограммы сварочного тока видно, что источник подает импульс высокой частоты в момент смены полярности, это позволяет поддерживать стабильность процесса.

### **3.4 Заключение по разделу**

Однако в ходе экспериментов, не удалось получить качественного сварного соединения. Одна из причин, объем свариваемого металла, поскольку точки сопоставимы с прихватками и легко разламываются руками. В дальнейшем стоит задача получить качественное соединение используя ранее известные параметры сварки, свариванием пластины по всей длине.

## 4 Экономическое обоснование работы

Поскольку данная работа является научно – исследовательской, то получение экономической выгоды не является основной целью, но для нее требуется экономическое обоснование.

### 4.1 Анализ затрат на проведение экспериментов

Для расчета экономической выгоды, необходимо задать данные для расчета. Исходные данные приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Проект
Цена основного материала	$C_m$	р/кг	300
Дневная ставка участника НИР	$C_m$	р	500
Коэффициент премиальных доплат	$K_{пр}$	–	1,4
Норма отчислений на социальные нужды	$H_{соц}$	%	30
Суммарная стоимость предоставленного оборудования	$C_{об}$	р	125000
Норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию	$H_a$	%	24
Мощность оборудования	$M_{об}$	кВт	6
Коэффициент полезного действия	КПД	–	0,85

Продолжение таблицы 11

Стоимость электроэнергии	$C_{э-э}$	p	3,5
Норма отчислений на текущий ремонт оборудования	$H_{т.р}$	%	35

Производиться расчет экономической эффективности с учетом производственных затрат. Поскольку работа является научно – исследовательской, производственные затраты будут текущими. Формула для расчета взяты из методических указаний[11].

Расчет текущих затрат производится по следующей формуле [11]

$$Z_{тек} = ZМ + ФЗП + O_{с.н} + Z_{э-э} + Z_{об} + Z_{пр} + НР$$

где ЗМ – затраты на основные и вспомогательные материалы [11];

ФЗП – фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная плата научно– технического персонала) [11];

$O_{с.н}$ – отчисления на социальные нужды [11];

$Z_{э-э}$  – затраты на электроэнергию для выполнения исследований [11];

$Z_{об}$ – затраты, связанные с эксплуатацией оборудования [11];

$Z_{пр}$  – прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов или макетов (связанны со спецификой исследования) [9];

НР – накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и охрану труда) [11]

Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле:

$$ZМ = ZМ_{осн} + ZМ_{всп}$$

$ZМ_{осн}$  – затраты на основной материал [11];

$ZМ_{всп}$ – затраты на вспомогательный материал [11].

Затраты на основной материал рассчитываются по формуле:

$$ZМ_{осн} = H_p \cdot C_m \cdot U$$



где  $N_p$  – норма расхода основного материала на один образец для испытаний [11];

$C_m$  – оптовая цена 1 кг основного материала [11];

$U$  – количество образцов, шт

Затраты на вспомогательный материал укрупнено принимаем равными 20% от затрат на основной материал [11]:

$$ЗМ_{осн} = 0,2 \cdot ЗМ_{осн}$$

Изучив информацию, взятую из интернета, берем оптовую цену за 1 кг алюминиевого сплава АМг– 6 равную 300 рублей

$$ЗМ_{осн} = 0,1 \cdot 300 \cdot 10 = 300 \text{ руб.}$$

$$ЗМ_{всп} = 0,2 \cdot 300 = 60 \text{ руб.}$$

$$ЗМ = 300 + 60 = 360 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату научно– технического персонала:

$$\Phi ЗП = ЗПЛ_{осн} + ЗПЛ_{доп}$$

$ЗПЛ_{осн}$  – основная заработная плата научно– технического персонала [11];

$ЗПЛ_{доп}$  – дополнительная заработная плата научно– технического персонала [11].

Основная заработная плата вычисляется по формуле [11]:

$$ЗПЛ_{осн} = \Sigma T_{раб} \cdot C_d \cdot K_{пр} \cdot И$$

$\Sigma T_{раб}$  – суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях) [11];

$C_d$  – дневная ставка каждого участника НИР, руб. [11];

$K_{пр}$  – коэффициент премиальных доплат (можно принять =1,4) [11];

$И$  – количество исполнителей на каждом этапе, чел [11].

$$ЗПЛ_{осн} = 5 \cdot 500 \cdot 1,4 \cdot 1 = 3500 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата определяется по формуле [11]:

$$ЗПЛ_{доп} = 0,1 \cdot ЗПЛ_{осн}$$

$$ЗПЛ_{доп} = 0,1 \cdot 3500 = 350 \text{ руб.}$$

$$\PhiЗП = 3500 + 350 = 3850 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле [11]:

$$O_{\text{с.н}} = \frac{N_{\text{соц}} \cdot \PhiЗП}{100}$$

где  $N_{\text{соц}}$  – норма отчислений на социальные нужды = 30%

$$O_{\text{с.н}} = \frac{30 \cdot 3850}{100} = 1155 \text{ руб.}$$

Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний:

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

где  $M_{\text{об}}$  – мощность оборудования (5,9 кВт);

$t_{\text{исп}}$  – время проведения испытаний, час [11];

$\eta$  – коэффициент полезного действия оборудования (0,85) [11];

$Ц_{\text{э-э}}$  – цена 1 кВт·часа электроэнергии = 3,5 руб [11].

$$З_{\text{э-э}} = \frac{5,9 \cdot 0,4}{0,85} \cdot 3,5 = 7 \text{ руб.}$$

Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:

$$З_{\text{об}} = A_{\text{об}} + P_{\text{т.р}}$$

где  $A_{\text{об}}$  – амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования [11];

$P_{\text{т.р}}$  – расходы на текущий ремонт оборудования [11];

Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле:

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

где  $N_{\text{а}}$  – норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 % [11];

$\Sigma Ц_{\text{об}}$  – суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб. [11];

$\Phi_{\text{эф}}$  – эффективный фонд времени работы оборудования (можно принять равным 1903 часа) [11];

$t_{\text{исп}}$  – время проведения испытаний, час

Стоимость используемого оборудования приведена в таблице 12.

Таблица 12 – Наименование и цены предоставленного оборудования

Наименование оборудования	Цена (руб.)
Регистратор сварочных данных	10000
Сварочный пост	75000

$$A_{об} = 75000 \cdot \frac{24 \cdot 0,4}{1903 \cdot 100} = 3,7 \text{ руб.}$$

Расходы на текущий ремонт оборудования:

$$P_{т.р} = \sum C_{об} \cdot \frac{N_{т.р} \cdot K_3}{\Phi_{эф} \cdot 100}$$

где  $N_{т.р}$  – норма отчислений на текущий ремонт оборудования (принимается равной 35%) [11];

$K_3$  – коэффициент загрузки оборудования [11].

$$K_3 = \frac{n_{об.расчет.}}{n_{об.прин.}}$$

$$K_3 = \frac{1}{1} = 1$$

$$P_{т.р} = \frac{85000 \cdot 35 \cdot 1}{100 \cdot 1903} = 15,6 \text{ руб.}$$

$$Z_{об} = 3,7 + 15,6 = 19,3 \text{ руб.}$$

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

$$Z_{пр} = 0,05 \cdot \Phi ЗП$$

$$Z_{пр} = 0,05 \cdot 3850 = 192,5 \text{ руб.}$$

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

$$НР = 0,55 \cdot \Phi ЗП$$

$$НР = 0,55 \cdot 3850 = 2117,5 \text{ руб.}$$

Так как все требуемое оборудование уже имеется, то капитальные вложения на приобретение или создание нового оборудования не требуются.

#### **4.2. Заключение по разделу**

Таким образом рассчитано экономическое обоснование работы по влиянию баланса полярностей на формирование сварных точек алюминия сплавов плазменной сваркой. Результаты затрат приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Список затрат на проведение исследования

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Затраты на материал	300
Фонд заработной платы	3850
Отчисления на социальные нужды	1155
Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний	7
Затраты на оборудование	19,3
Прочие затраты	192,5
Накладные расходы	2117,5
Общие затраты на проведение работы	7641,3

## 5 Экологичность и безопасность объекта исследования

Объектом исследования является плазменная сварка алюминия и его сплавов неплавящимся электродом в среде защитного газа аргона.

### 5.1 Объект и его планировка

В лаборатории на кафедре «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы» Тольяттинского государственного университета, проводились эксперименты по исследованию плазменной сварки и влияния баланса полярностей на формирование сварочных точек, рисунок 23.

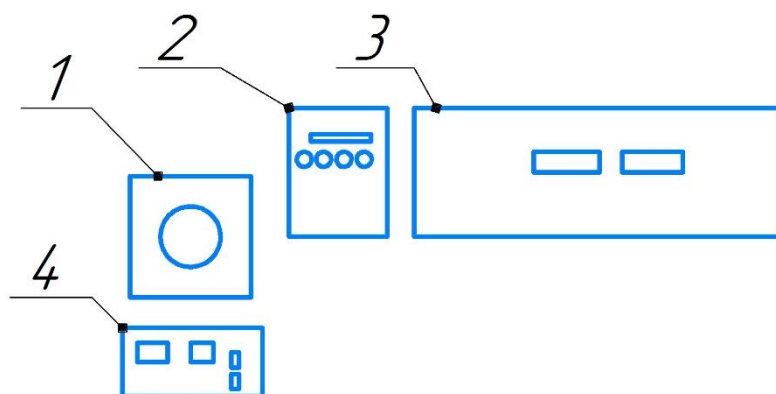


Рисунок 23 – Схема организации рабочего места

- 1 – Балон с плазмообразующим газом(аргон); 2 – источник питания; 3 – сварочный стол с прижимами; 4 – устройство регистрации сварочных данных

### 5.2 Описание процесса экспериментов

В выпускной квалификационной работе, описан технологический процесс проведения исследования, который представляет из себя следующие. Производятся подготовка образцов из алюминиевого сплава АМг– 6 толщиной 3 мм –при помощи чертилки и линейки размечаются пластины 126мм на

32мм. Затем на гильотине нарезаются образцы. После резки абразивным инструментом удаляются неровности и заусенцы по краям заготовки, также возможна зачистка места сварки, для удаления оксидной пленки, но данная процедура проводится не всегда. Перед сваркой детали обезжиривают с помощью ваты и ацетона. На этом действия по подготовке к сварке считаются законченными. Далее следует процедура сварки, при которой есть возможность находиться на безопасном расстоянии и включать дистанционно источник питания, тем самым не подвергать себя тепловому и УФ воздействию сварочной дуги. Затем после остывания образцов, производится их контроль – визуально – измерительный, для изучения параметров и глубины провара сварочных образцов.

### **5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

При выполнении данной исследовательской работы присутствуют опасные и вредные производственные факторы, которые могут привести к травмам и негативно отразиться на здоровье участников (рабочих) производящих сварку и сопутствующие операции. В процессе подготовки и проведения сварки, присутствуют такие факторы как – высокое напряжение, высокая температура, УФ излучение, движущиеся или быстродвижущиеся детали, наличие вредных газов, острые кромки, опасный рабочий инструмент.

Описать более подробно опасные и вредные факторы, возможно анализируя следующие операции, которые входят в состав процесса исследования:

- Подготовка образцов(резка);
- Обработка образцов(шлифовка, подготовка кромок);
- Сварка образцов.

Опасные источники, операции и факторы входящие в состав процесса приведены в таблице 14

Таблица 14 – Анализ опасных и вредных факторов

Операции	Источник опасности	Факторы
Подготовка образцов(резка)	Гильотина	Подвижные рабочие части, опасный инструмент
Обработка образцов(шлифовка, подготовка кромок)	УШМ, наждачная бумага, напильник, ацетон	Движущиеся и вращающиеся механизмы УШМ, искры от абразивного круга, горячие вещества
Сварка образцов	Ацетон, баллон с защитным и плазмообразующим газом (Аргон)	УФ– излучение,ИК– излучение, повышенная концентрация газов, высокая температура металла

#### 5.4. Уменьшения влияния опасных факторов

Проанализировав всевозможные опасные факторы, в таблице 13 приведены мероприятия по снижению воздействия их при выполнении исследовательской работы.

Таблица 15 – Уменьшения опасных факторов

Операции	Факторы	Мероприятия
Подготовка образцов(резка)	Подвижные рабочие части, опасный инструмент	Проведения инструктажей, выдачи СИЗ, спецодежды.

## Продолжение таблицы 15

Обработка образцов(шлифовка, подготовка кромок)	Движущиеся и вращающиеся механизмы УШМ, искры от абразивного круга, горячие вещества	Проведения инструктажей, выдача СИЗ, спецодежды, вентиляция помещения, предостерегающие таблички
Сварка образцов	УФ – излучение,ИК – излучение, повышенная концентрация газов, высокая температура металла.	Выдача СИЗ, спецодежды, маска и перчатки сварщика, приток свежего воздуха

### 5.5 Заключение по разделу

При выполнении раздела ВКР выявлены и проанализированы вредные и опасные факторы, присутствующие при выполнении определенных операций, по подготовке и сварке образцов, которые могут привести к травмам и нанести вред здоровью рабочих.

В результате анализа приведены методы и мероприятия, позволяющие обезопасить процесс проведения экспериментальной сварки. Внедрение этих мероприятий и выполнение их требований рабочими, проводящими сварку, позволит повысить их безопасность и исключить риски получения травм и вреда здоровью. Поскольку приведенных методов будет достаточно для данной работы и они не требуют больших финансовых вложений и все средства имеются в наличии в лаборатории, проект не потребует больших финансовых затрат и разработки специальных методов и приспособлений по защите персонала.



## Заключение

В выпускной квалификационной работе изучена стойкость ВЭ в зависимости от баланса полярности, которые можно использовать для увеличения критических токов плазменной сварки.

Проведен анализ и установлено относительно изменение размеров и формирование капли на вольфрамовом электроде посредством скоростной видеосъемки с частотой 1000 кадр/с. Получены данные о влиянии доли полярностей на форму и размеры сварной точки, изучив которые, можно сказать, что с увеличением доли обратной полярности, увеличивается проплавляющая способность дуги. Для проведения стабильного процесса сварки, необходимо учитывать стойкость неплавящегося электрода, соотношение баланса полярностей, чтобы обеспечить хорошую очистку от оксидной пленки и достичь максимальной глубины проплавления. Также в результате экспериментов подтверждены данные о том, что качественная очистка от оксидной пленки происходит при наличии 25% обратной полярности.

Данный метод сварки может получить свое практическое распространение в производстве, которое специализируется на выпуске продукции из алюминиевых сплавов. Данные о стойкости вольфрамового электрода будут полезными при налаживании технологического процесса, поскольку срок службы сварочных материалов напрямую влияет на стоимость технологического процесса. Внедрение регулирования балансов полярностей позволит повышать качество выпускаемых изделий.

Дальнейшей целью для развития работы будет являться получение качественного сварного соединения из алюминиевого сплава плазменной сваркой с разнополярными импульсами тока с учетом всех полученных данных. Также будут проведены попытки внедрения способа на производстве изготавливающим изделия из алюминиевых сплавов.

## Список используемой литературы:

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. Вартгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Вартгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

5. 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.

6. 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.

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

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

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

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

11. 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

12. Лемешко Е. В. Исследование технологии сварки импульсным питанием при сварке неповоротных стыков на сварочной установке А21 PRB 33– 90 / Е. В. Лемешко, А. М. Токенова // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2020. – № 9. – С. 81– 83.

13. 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

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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

18. 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.

19. 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.

20. 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.

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

22. 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. – T. 72. – C. 329– s.

23. 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. – T. 234. – C. 33– 44.

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