

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)

15.04.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования»

(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Электродуговая точечная сварка алюминиевых сплавов сжатой дугой переменного тока с прямоугольной формой импульсов»

Обучающийся

Н.Е. Ваничкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Г.М. Короткова

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

Консультант

ст. препод. Д.Э. Советкин

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

Тольятти 2024

## Содержание

Введение.....	3
1 Анализ исходных данных.....	5
1.1 Область применения точечной электродуговой сварки алюминиевых сплавов .....	5
1.2 Свойства алюминиевых сплавов .....	6
1.3 Способы получения точечных соединений.....	8
1.3.1 Плазменная сварка на постоянном токе прямой полярности .....	8
1.3.2 Плазменная сварка на постоянном токе обратной полярности.....	9
1.3.3 Плазменная сварка на переменном синусоидальном токе .....	11
1.3.4 Сварка трехфазной сжатой дугой.....	12
1.3.5 Плазменная сварка разнополярными импульсами тока (РПИ).....	13
2 Новые возможности источников питания переменного тока с прямоугольными импульсами .....	16
2.1 Влияние формы переменного тока на геометрические размеры шва .	16
2.2 Влияние формы тока прямоугольной формы на размеры зоны отчистки от оксидной пленки .....	18
2.3 Влияние баланса полярностей на эффективную мощность дуги .....	20
3 Исследование влияния параметров плазмотрона на формирование сварной точки .....	24
3.1 Исследование формирование сварной точки на серийном оборудовании (2+2) мм .....	24
3.2 Особенности конструкции плазмотрона для сварки сжатой дугой переменного тока с прямоугольными импульсами.....	35
3.3 Методика проведения исследований .....	39
3.4 Влияния параметров плазмотрона на формирование сварной точки .	47
4 Разработка технологического процесса сварки сжатой дугой переменным током с прямоугольной формой импульсов (2+2) мм.....	51
4.1 Технологический процесс сварки сжатой дугой переменным током с прямоугольной формой импульсов (2+2) мм.....	51
4.2 Техническое задание для дальнейшего применения плазмотрона ГВС-1 .....	63
Заключение .....	66
Список используемой литературы .....	68

## Введение

На сегодняшний день сварка алюминия и алюминиевых сплавов находит широкое применение во всех сферах и отраслях промышленности. С каждым годом повышается спрос на алюминиевые сплавы, которые используются почти во всех сферах гражданской жизни, начиная с авто-, авиа-, судостроения и заканчивая бытовыми электроприборами [1].

К наиболее распространенным способам сварки алюминиевых сплавов можно отнести TIG (Tungsten Inert Gas – сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа) и PAW (Plasma Arc Welding – плазменная сварка). В настоящее время для сварки алюминиевых сплавов широко применяется TIG сварка, осуществляемая от инверторных источников питания. Плазменная сварка, используется реже. Причиной такой технологической отсталости являются особенности стабильности протекания процесса [29]. В начале 70-80х годов для плазменной сварки требовалось: 1) большое напряжение X.X. источника питания, 2) стабилизатор дуги при смене полярности сварочного тока, скорость перехода сварочного тока через нуль 50 кА/с или более.

Плазменная сварка имеет разные способы получения точечного соединения в зависимости от вида формы тока, постоянный ток прямой и обратной полярности, переменный синусоидальном токе, трехфазная сжатая дуга и разнополярные прямоугольные импульсы.

Современные сварочные инверторы имеют, как правило, прямоугольную форму переменного тока, что существенно повышает стабильность и производительность процесса сварки алюминиевых сплавов. Однако современные инверторы позволяют осуществлять процесс сварки со встроенным высокочастотным блоком, который работает при переходе тока через нуль непрерывно, что приводит к сбоям горения дуги.

Прямоугольная форма переменного тока при правильном подборе балансе полярностей, влияет на зону очистки от оксидной пленки, что влияет на хорошее формирование сварной точки.

Точечную сварку сжатой дугой алюминия и его сплавов применяют для различных узлов, деталей и конструкций. Высокая производительность, надежность и автоматизация плазменной сварки позволяет применять ее в автомобилестроении, в основной части это кузовная часть автомобиля, микроэлектронике, детали и узлы бытовой техники. Объектом исследования является сжатая дуга переменного тока с прямоугольной формой тока.

Основной проблемой применения плазменной сварки сжатой дугой является возникновение двойного дугообразования во время сварки, из-за высокочастотных импульсов в момент перехода через нуль. В следствии чего, разрушается сопло и деформируется сварная точка.

Гипотеза состоит в том, что стабильность процесса сварки зависит не только от электрических параметров сварки, но и от конструкция плазмотрона, а именно расстояние от электрода до начала сопла и внешний верхний диаметр сопла влияет на возникновение двойной дуги, которые были выявлены в работах [17, 19].

Поэтому необходимо обеспечить стабильное формирование сварной точки при сварке соединений из алюминиевых сплавов сжатой дугой на переменном токе прямоугольной формы современными инверторами типа TIG-200P AC.

Цель работы: повысить стабильность формирования сварной точки сжатой дугой переменного тока с прямоугольной формой импульсов.

## **1 Анализ исходных данных**

### **1.1 Область применения точечной электродуговой сварки алюминиевых сплавов**

Точечную сварку алюминия и его сплавов применяют для различных деталей, узлов, конструкций. Высокая производительность, надежность и простота автоматизации точечной плазменной сварки позволяет широко применять ее в различных сферах и отраслях промышленности, например, в автомобилестроении, а именно кузовной части автомобиля, микроэлектронике для соединения микросхем, различных корпусов, деталей, узлов бытовой техники.

Плазменная сварка является дальнейшим развитием и усовершенствованием аргонодуговой сварки неплавящимся электродом.

Сварка сжатой дугой на переменном токе является перспективной технологией сварки алюминиевых сплавов.

Согласно ГОСТ 2601-84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий», плазменная сварка – это сварка плавлением, при которой нагрев проводится сжатой дугой. Сжатая дуга – это дуга, столб которой сжат с помощью сопла плазменной горелки, потока газа или внешним электромагнитным полем. Преимуществами данного процесса являются: высокая концентрация энергии в пятне нагрева и способность переменной дуги разбивать окисную пленку. Точечная плазменная сварка характеризуется большим количеством параметров, что позволяет более эффективно управлять процессом сварки. Полученные сварные точки имеют высокую прочность, однако в связи с большой усадкой и высокой скоростью затвердевания сварочной ванны возникают проблемы при формировании точки, а применение нового оборудования для питания дуги их добавляет. Поэтому разработки технологии точечной плазменной сварки не прекращаются.

## 1.2 Свойства алюминиевых сплавов

«Алюминиевые сплавы относятся к группе термически неупрочняемых алюминиевых деформируемых сплавов. Из АМг-3 и АМг-6 изготавливают разные полуфабрикаты, например, штампованные детали. Полуфабрикаты из этого сплава имеют относительно небольшие прочностные характеристики, но высокую пластичность. Алюминий – самый распространенный в земной коре металл, его запасы составляют 8,8 %. Алюминий является одноморфным металлом с плотноупакованной гранцентрированной кубической решеткой. Технически чистый алюминий имеет низкие прочностные ( $\sigma_{\text{в}} = 49 - 68$  МПа, модуль упругости  $E = 70000$  МПа) и высокие пластические свойства ( $\delta = 28\%$ ), поэтому в качестве конструкционного материала применяется в значительно меньших объемах, чем его сплавы различного легирования. В зависимости от содержания легирующих элементов, характера пластической обработки металла все алюминиевые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные. Деформируемые алюминиевые сплавы содержат легирующие элементы в количествах до предела их растворимости в  $\alpha$  – растворе алюминия, например, структура алюминиево – магниевых сплавов характеризуется зернами  $\alpha$  - алюминия, по границам которых могут быть выделения бета – фазы –  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  (до 3%)» [11].

«Для сварных конструкций главным образом применяются деформируемые алюминиевые сплавы (ГОСТ 4784 –74), которые можно подразделить на термически неупрочняемые (низкой и средней прочности) и термически упрочняемые (средней и высокой прочности). К термически неупрочняемым можно отнести технический алюминий, сплавы системы Al – Mn, алюминиево – магниевые сплавы системы Al – Mg (табл.1). К термически упрочняемым сплавам, имеющим предел прочности от 350 до 570 МПа, относятся сплавы систем Al – Zn – Mg, Al – Cu – Mn, Al – Zn – Mg – Cu, Al – Mg – Li и др., повышение прочностных свойств которых, обеспечивается выделением мелкодисперсных фаз в результате старения» [11].

Химический состав и физические свойства алюминиевого сплава АМг-3 приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Химический состав АМг-3

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Cr	Mg	Zn	Примеси
До 0.5	0.5 – 0.8	0.3 - 0.6	До 0.1	93.8 - 96	До 0.1	До 0.05	3.2 – 3.8	До 0.2	Прочие, каждая 0.5; всего 0.1

Таблица 2 – Физические свойства АМг-3

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	-	-	2660	-	49.6
100	-	23.5	151	-	880	-

Химический состав и физические свойства алюминиевого сплава АМг-6 приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Химический состав АМг-6

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примеси
До 0.4	До 0.4	0.5 - 0.8	0.02 - 0.1	91.1 - 93.68	До 0.1	0.0002 - 0.005	5.8 - 6.8	До 0.2	Прочие, каждая 0.5; всего 0.1

Таблица 4 – Физические свойства АМг-6

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	-

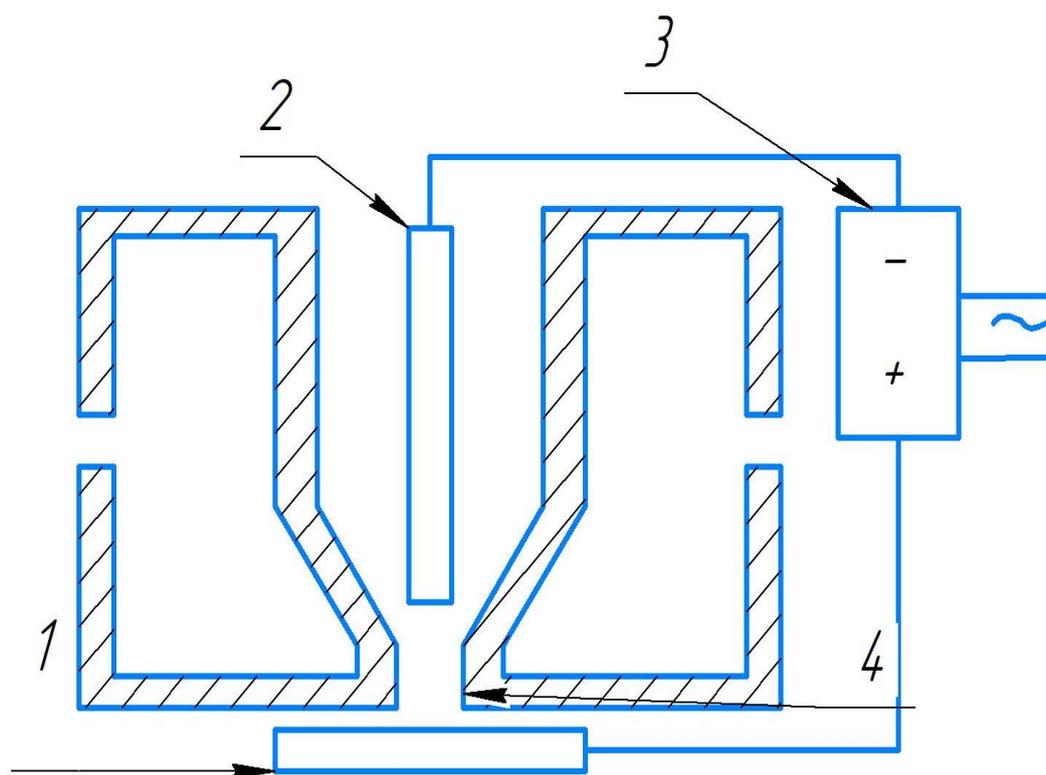
Алюминий взаимодействует с кислородом, вследствие чего образуется тугоплавкий оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Температура плавления оксида алюминия

составляет примерно  $2044^{\circ}\text{C}$ , в то время, когда температура плавления чистого алюминия является  $660^{\circ}\text{C}$ . Поэтому перед сваркой алюминиевых сплавов необходимо качественно отчищать оксидную пленку. Удаление оксидной пленки осуществляется несколькими способами. Механическим способом – зачистка основного металла металлической щеткой, химическим способом – растворители, травление и т.д. Технологический способ удаления оксидной пленки, за счет применения обратной полярности.

### **1.3 Способы получения точечных соединений**

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

При сварке сжатой дугой на прямой полярности (ПП) алюминиевых сплавов (рисунок 1), требуется обязательная качественная зачистка основного металла от оксидной пленки непосредственно перед сваркой.



1 – обрабатываемое изделие, 2 – электрод, 3 – источник питания,  
4 – сжимающее сопло

Рисунок 1 – Схема сварки на прямой полярности  $W^- - Al^+$

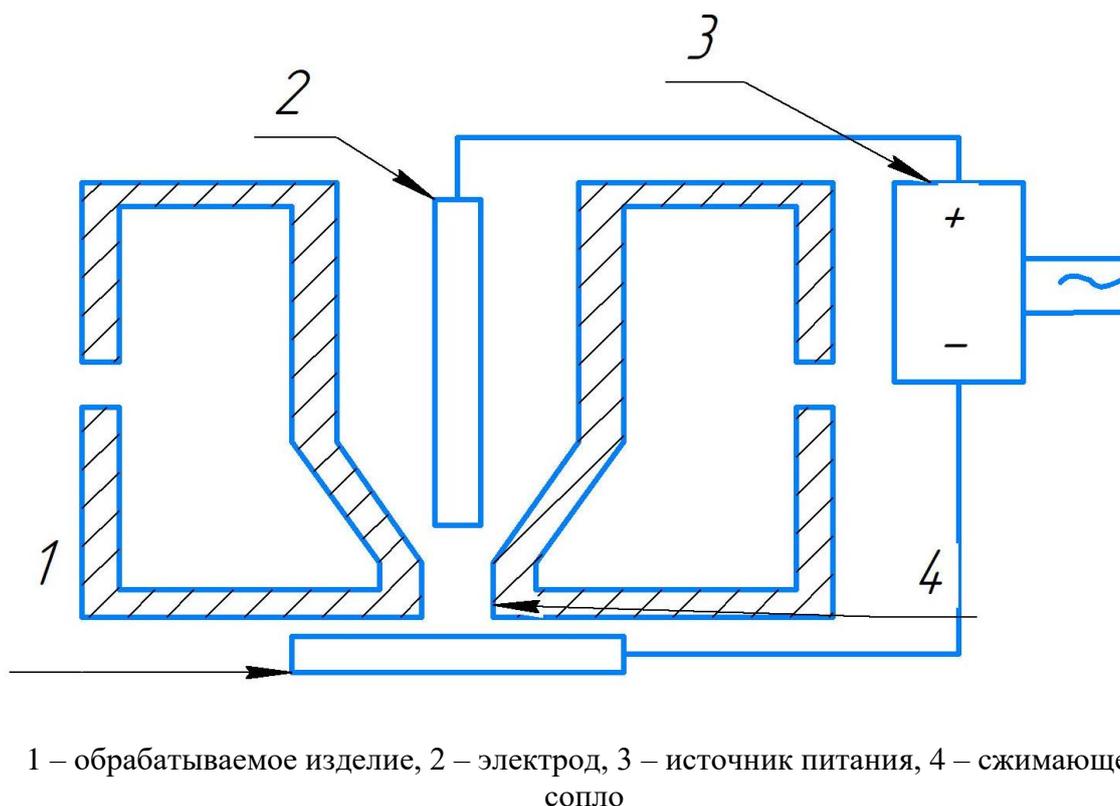
Главной особенностью сварки на прямой полярности является меньшее тепловое влияние на торец электрода, что повышает его стойкость в процессе сварки, в отличие от обратной полярности (ОП). При этом допустимые значения тока для того же диаметра электрода при ПП и ОП могут отличаться от 3 до 7 раз, в зависимости от диаметра электрода [22]. Так же существует влияние на размер сварной точки [5].

### 1.3.2 Плазменная сварка на постоянном токе обратной полярности

При сварке на постоянном токе обратной полярности (рисунок 2), достигается лучшая катодная очистка. Но при работе на обратной полярности возникает проблема в избыточном накоплении тепла на электроде, что приводит к его снижению срока службы. Для того чтобы увеличить ресурс

работы электрода существуют два способа: первый это использование интенсивного охлаждения электрода, а второй за счет теплоотвода посредством медной части электрода. Также для увеличения срока службы плазматрона используют более габаритные детали [7]. Для повышения стабильности горения дуги рекомендуется зачистить образец от оксидной пленки, чтобы предотвратить блуждание дуги [13].

«Кроме этого при сварке на обратной полярности резко падает допустимая плотность тока на вольфрамовый электрод. В связи с этим и возникают проблемы охлаждения неплавящегося электрода, что повлечет за собой проектирование конструкции плазматрона для сварки сжатой дугой» [2].



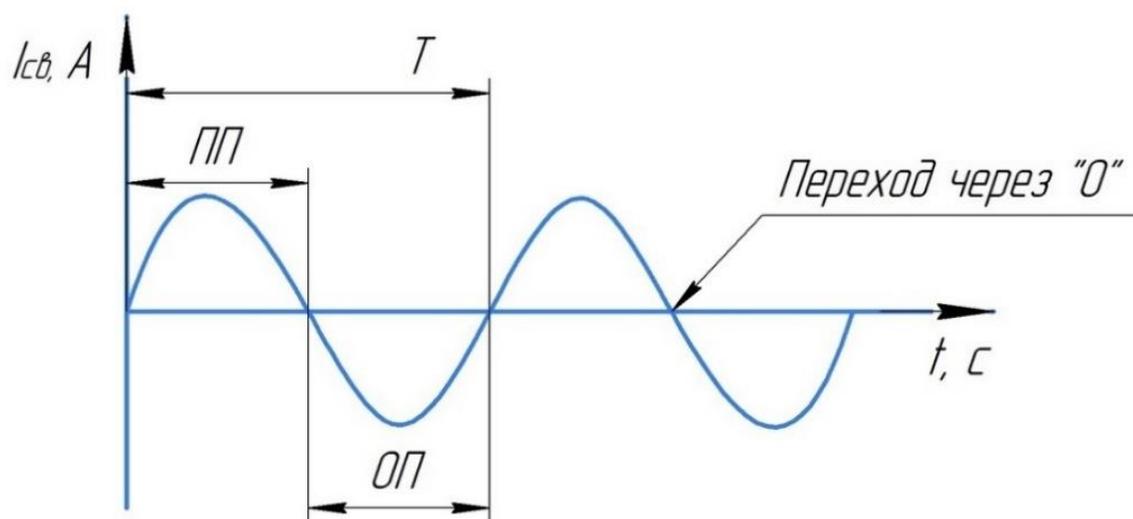
1 – обрабатываемое изделие, 2 – электрод, 3 – источник питания, 4 – сжимающее сопло

Рисунок 2 – Схема сварки на обратной полярности  $W^+ - Al^-$

Исследование свойств сжатой дуги показало, что силовое воздействие плазменной дуги на сварочную ванну выше при прямой полярности, по сравнению с обратной полярностью[9].

### 1.3.3 Плазменная сварка на переменном синусоидальном токе

«При использовании переменного синусоидального тока для сварки сжатой дугой комбинация прямой и обратной полярности позволяет эффективно сваривать алюминиевые сплавы (рисунок 3). Удаление оксидной пленки происходит в момент полупериода обратной полярности, при этом на электрод воздействует около 70% тепла [19]. Однако применение переменного синусоидального тока создает ряд проблем, связанных с тем, что дуга крайне нестабильна при переходе тока через нуль, поэтому к источнику питания подключают стабилизатор дуги. Осциллятор используют для начальной ионизации дугового промежутка за счет разряда высокого напряжения и частоты, благодаря чему возникала дуга» [2].



ПП – прямая полярность, ОП – обратная полярность, T – период тока

Рисунок 3 – Переменный синусоидальный ток при сварке W-Al

В процессе сварки может возникнуть аварийная ситуация, при которой возникает двойная дуга. Из-за этого дуга начинает гореть на сопло, тем самым

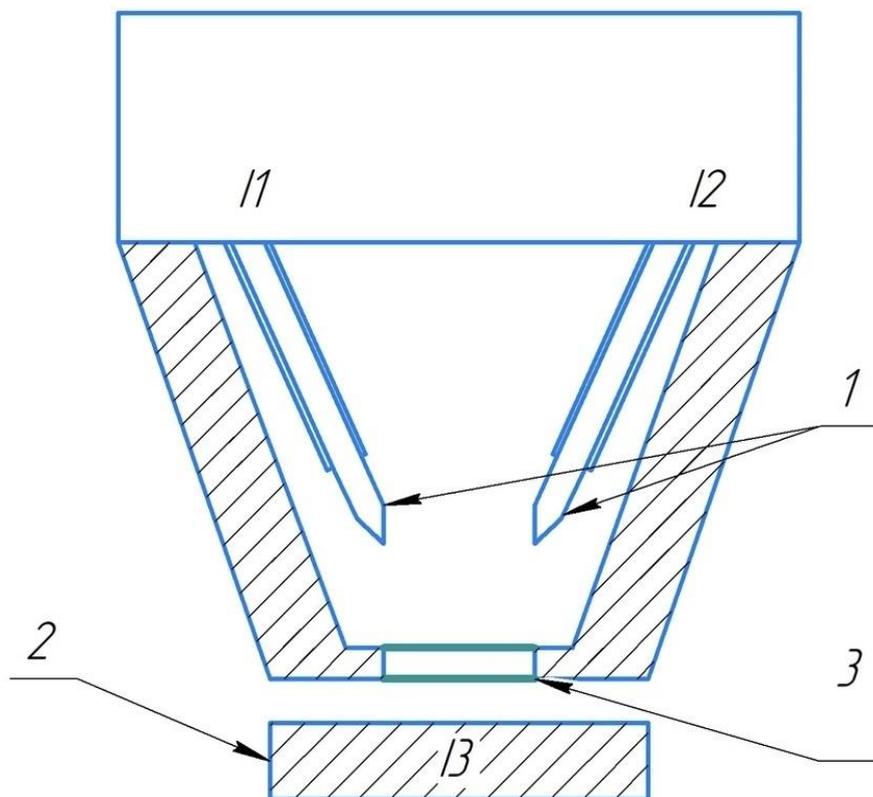
приводя его в негодность, при этом сопло может расплавиться на изделие, приведя его к полному браку.

### 1.3.4 Сварка трехфазной сжатой дугой

Разработка способа сварки трехфазной дуги проводилась с 1934 г. доктором технических наук Г. П. Михайловым в лаборатории сварки УПИ им. С. М. Кирова.

В.И. Столбов, работая в середине 1950-х на одном из авиационных заводов Куйбышева, предложил новый способ сварки алюминиевых сплавов, а именно, сварку трехфазной сжатой дугой, который применялся при изготовлении тяжёлых ракет всех типов.

Сварка трехфазной сжатой дугой производится специальным плазмотроном по схеме, приведенной на рисунке 4.



1 – электроды, 2 – обрабатываемое изделие, 3- сжимающее сопло,  
I1, I2 – фазы подключенные к электродам,

Рисунок 4 – Схема сварки трехфазной сжатой дугой

Два неплавящихся электрода крепятся в плазмотроне под углом, к электродам подводятся две фазы, каждая к своему электроду. Третья фаза подключается непосредственно к изделию. В каждый момент времени горит две дуги из трех. Дуги горят поочередно: 1) W-W, W-Al две из них горят между электродами и изделием, 2) W-Al, W-Al. Дугу, горящую между электродами, называют дежурной [19]. Возбуждение зависимых дуг происходит за счет плазмообразующего газа и дежурной дуги при приближении горелки к изделию. Дежурная дуга создает маломощную дугу, которая при соприкосновении с изделием зажигает основные дуги.

### **1.3.5 Плазменная сварка разнополярными импульсами тока (РПИ)**

«Этот способ можно сравнить со сваркой на переменном токе синусоидальной формы: оба способа сварки работают на частоте 50Гц. Однако между ними есть ряд существенных отличий» [2].

«При сварке разнополярными импульсами тока прямоугольной формы не требуется дополнительный блок, который обеспечивает стабильность перехода тока через ноль в том случае, если схема источника питания прямоугольной формы обеспечивает переход с одной полярности на другую со скоростью до 600кА/с. Снижается время перехода через ноль, что повышает стабильность горения дуги, следовательно, и эффективность процесса» [2].

Стабильное возбуждение дуги в начальный момент обеспечивает высокочастотный генератор [2].

«Однако в современных схемах инверторов переход тока через ноль обеспечивает работа высокочастотного генератора, что приводит на отдельных режимах к возникновению двойной дуги при сварке сжатой дугой» [2].

«Одной из главных особенностей современных инверторов, таких как TIG-200P, является возможность изменять длительность тока прямой  $t_{пр}$  и обратной полярности  $t_{обр}$ , сохраняя при этом одинаковую величину амплитудного значения тока  $I_{пр} = I_{обр}$ » [2].

Возможность регулирования длительности тока на прямой и обратной полярности дает широкие возможности изменения технологических свойств дуги, воздействуя на качество сварной точки.

Немаловажную роль в этом случае играет конструкция плазмотрона. В исследовании [14] доказано, что степень сжатия дуги возрастает с уменьшением диаметра сопла. На степень сжатия дуги влияет величина силы тока, т.е. чем она выше, тем больше степень сжатия дуги, что в свою очередь влияет на давление дуги на сварочную ванну.

Предварительные исследования, проведенные на кафедре СОМДиРП ТГУ, показали, что на диаметр и глубину проплавления сварной точки влияет баланс полярностей тока [2]. Изменение коэффициента наплавки и глубины проплавления при изменении полярности отмечается и в работе [20].

При сварке током обратной полярности глубина провара примерно на 40-50 % больше, чем при сварке током прямой полярности, и на 15-20% больше, чем при сварке переменным током, что объяснялось различным выделением количества теплоты на аноде и катоде.

В работе [21] рекомендуется использовать долю обратной полярности в пределах 40-50%.

Удельная тепловая эффективность дуги обратной полярности снижается с уменьшением тока дуги, а прямой полярности увеличивается. В то же время в диапазоне токов 100–250А удельная эффективность дуги обратной полярности значительно выше [23].

Успешное применение РПИ гарантирует стабильность дуги, качественное сварное соединение, а также большую эффективность процесса. Преимущества дуги переменного тока с прямоугольными импульсами благодаря высокой стабильности горения, возможности влияния на

тепловложение в прямую и обратную полярность расширяют технологические свойства процесса при сварке сплавов алюминия точками сжатой дугой.

Влиянием процесса регулирования прямой и обратной полярности, можно произвести зачистку поверхности металла от катодной пленки, при правильно подобранном балансе полярностей полностью удаляется оксидная пленка во время процесса сварки, тем самым положительно влияет на формирование сварной точки.

Таким образом, чтобы повысить стабильность и качество формирования сварной точки при точечной сварки сжатой дугой переменного тока с прямоугольной формой импульсов необходимо решить следующие задачи.

1. Изучить технологические возможности TIG - 200P, формирующего переменный ток с прямоугольной формой импульсов.
2. Исследовать влияние параметров плазмотрона на формирование сварной точки.
3. Разработать методику проведения исследования.
4. Разработать технологический процесс сварки сжатой дугой переменного тока с прямоугольными импульсами.

## **Новые возможности источников питания переменного тока с прямоугольными импульсами**

### **2.1 Влияние формы переменного тока на геометрические размеры шва**

Опыт эксплуатации источников питания показал, что сварка одного и того же материала при одинаковых условиях сборки, на одном и том же режиме, но при использовании разных источников питания приводит к различному формированию шва. Аналогичные по действующему значению тока источники различного типа не обеспечивают идентичности тепловых характеристик дуги. Это вызывает необходимость корректировки параметров режима при смене источников. Следовательно, чтобы получить одну и ту же заданную геометрию сварного шва при сварке различных источников питания, недостаточно при прочих равных условиях характеризовать сварочный ток одним действующим значением, как это делается в настоящее время [6].

Проведенные опыты на источниках питания, которые отличаются по форме тока, показали, что влияние на геометрические параметры шва оказывает коэффициент амплитуды  $k_a = I_a/I$ , т.е. форма тока (рисунок 5).

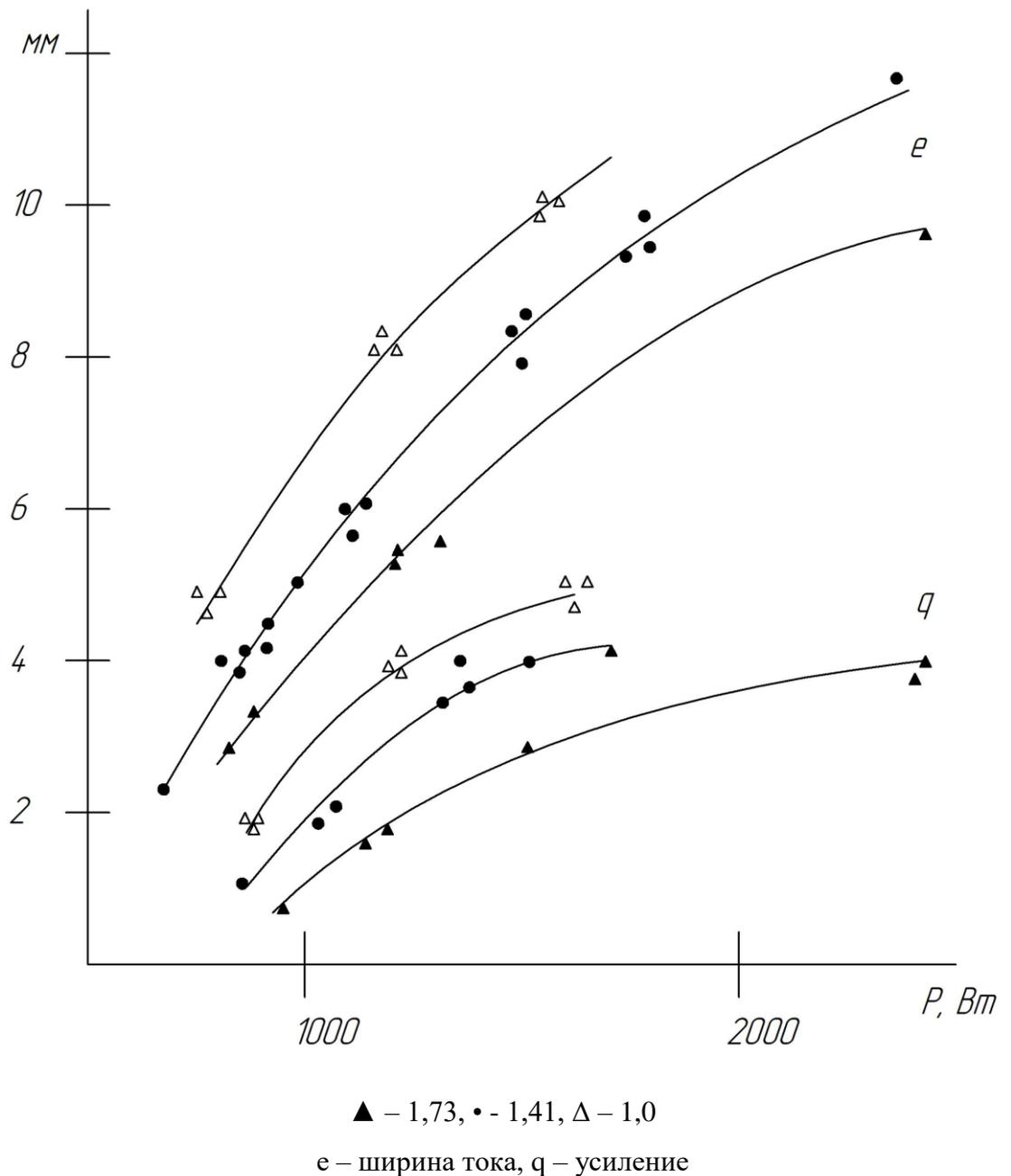


Рисунок 5- Влияние формы тока  $k_a$  и мощности дуги на геометрические размеры шва

Таким образом, при использовании для сварки источников питания с различным значением  $k_a$  постоянство амплитудного или действующего значения тока сварки, также мощности дуги не позволяет получить одинаковые размеры шва [6]. Но если корректировать значение тока на источниках питания с использованием величины коэффициента амплитуды, то можно получить одинаковые сварные швы, на разных источниках питания.

Установлено, что переменный ток прямоугольной формы обеспечивает увеличение проплавляющей способности дуги при стабильности процесса

## 2.2 Влияние формы тока прямоугольной формы на размеры зоны отчистки от оксидной пленки

Влияние формы тока прямоугольной формы оказывает значительное влияние на отчистку алюминия от оксидной пленки. В работе автора [19] утверждается, что наиболее эффективный баланс полярностей для отчистки оксидной пленки является 60/40% (ОП/ПП) (рисунок 6).

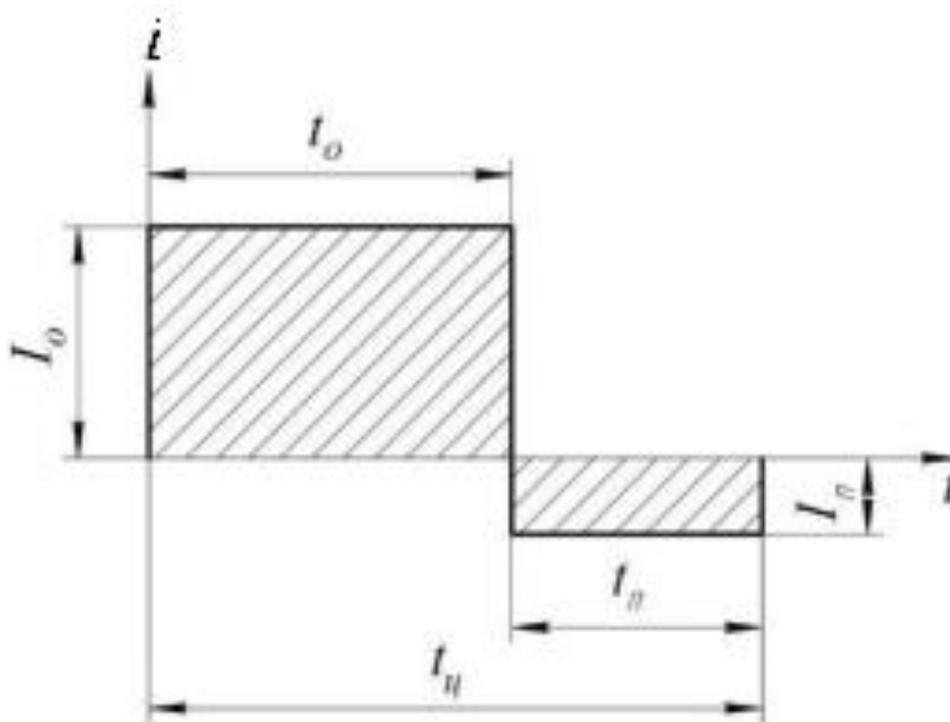


Рисунок 6 – Осциллограмма  $i(t)$  при балансе полярностей 60/40% (ПП/ОП)

Анализ результатов эксперимента в статье [7] показал, что в период горения дуги обратной полярности при величине тока 5 А катодные пятна интенсивно перемещаются по окисленной поверхности металла, непосредственно прилегающей к расплаву сварочной ванны. При этом ширина

зоны катодного распыления поверхностной оксидной пленки впереди и по бокам ванны не превышает 0,3 мм (рисунок 7).

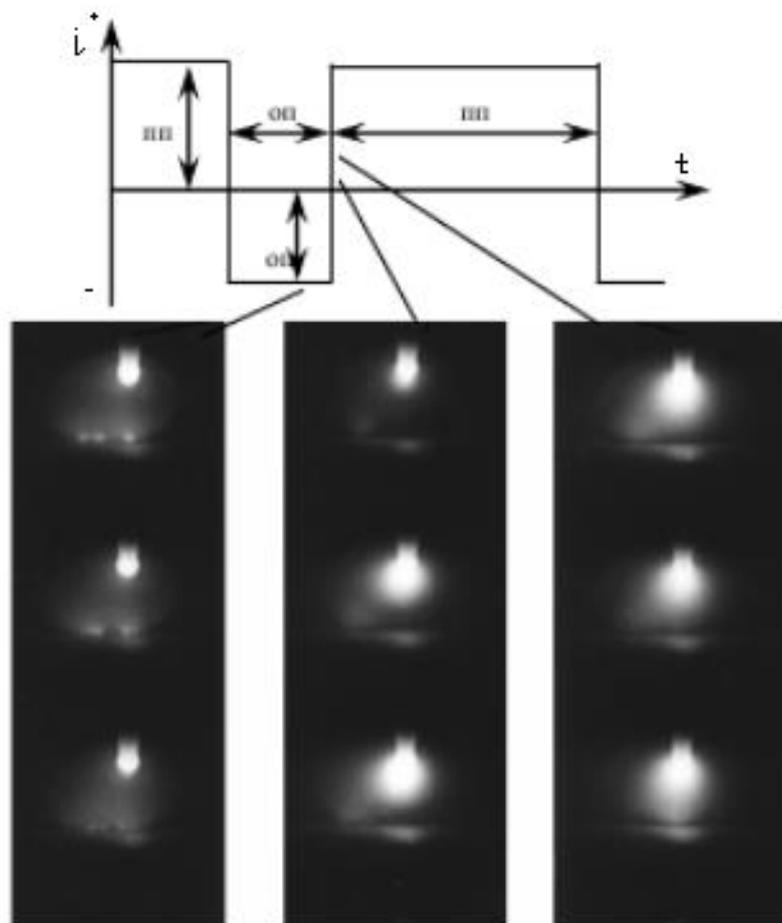


Рисунок 7 – Киносъемка дуги (б) при смене полярности тока (а)

Увеличение тока дуги обратной полярности до уровня 32 А как в начале периода её горения, так и по истечении некоторого времени способствует расширению зоны интенсивного перемещения катодных пятен по окисленной поверхности. В этом случае ширина зоны катодного распыления и, следовательно, максимальное удаление катодных пятен от расплава сварочной ванны составляет 1,6...1,8 мм. Аналогичный характер изменения ширины зоны перемещения катодных пятен при увеличении тока дуги обратной полярности наблюдается при плавлении торцевой поверхности пластины из алюминиевого сплава. При этом с увеличением тока дуга обратной полярности

в большей степени отклоняется от оси вольфрамового электрода, т. к. ее направленность определяется взаимным расположением активных пятен.

Установлен факт влияния величины  $I_{обр}$  на зону очистки при сварке алюминиевых сплавов.

### **2.3 Влияние баланса полярностей на эффективную мощность дуги**

Для определения влияния баланса полярностей на эффективную мощность дуги в работе [19] предложена методика расчета эффективной мощности сжатой дуги в аргоне, передаваемой от катодной и анодной областей в изделие. Рассматривается дуга переменного тока прямоугольной формы для  $f = 50\text{Гц}$  с регулированием длительности прямой и обратной полярности при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом (рисунок 8).

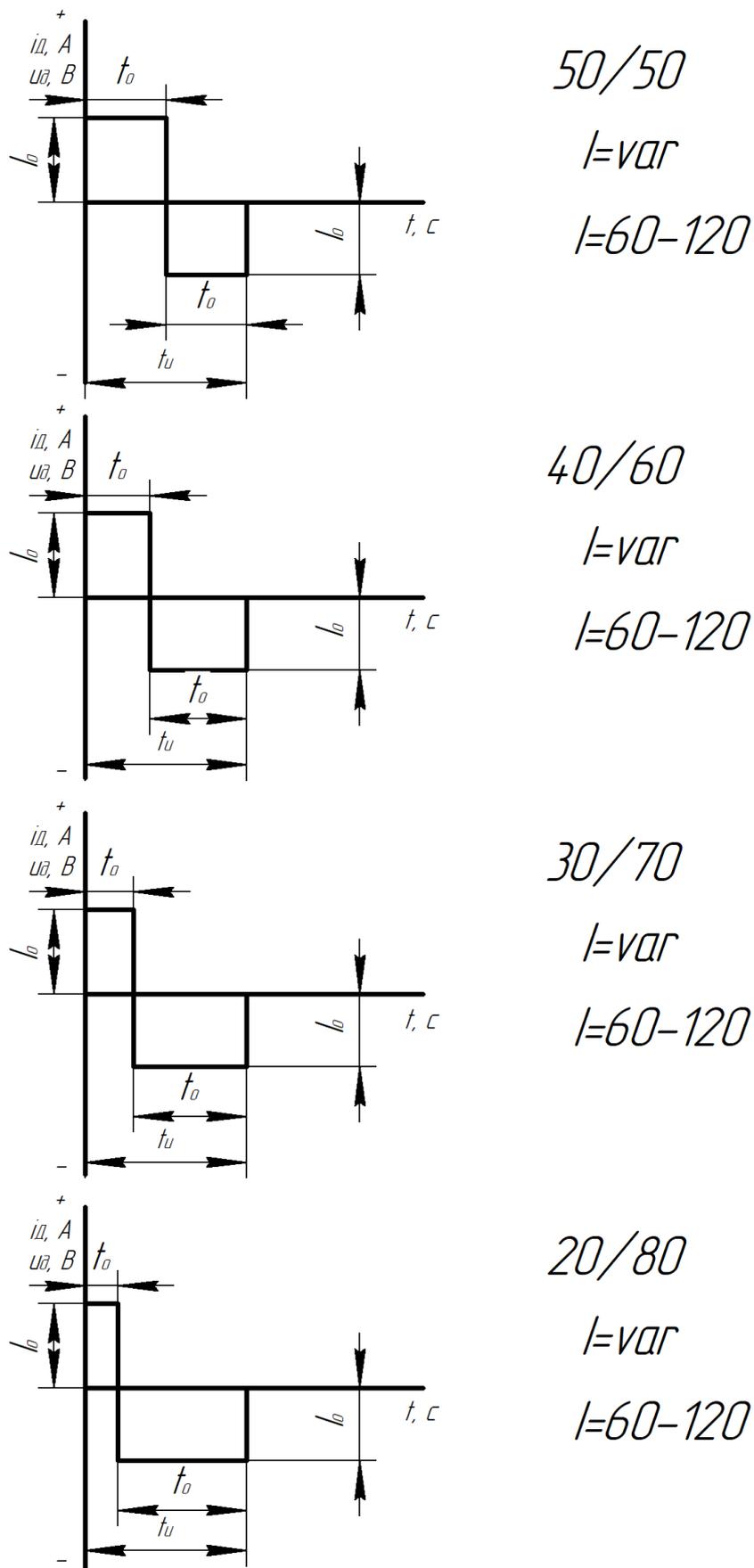


Рисунок 8 – Общий вид осциллограммы I(t)

Расчет эффективной мощности представлен в виде суммы мощностей анодной и катодной области и мощности передаваемой изделию плазмообразующим аргоном:

$$q_{и} = q_{п} + q_{о} + q_{г}; \quad (1)$$

где  $q_{п}$  и  $q_{о}$  – мощности, передаваемые в изделие анодной и катодной областями сжатой дуги;

$q_{г}$  – мощность, передаваемая изделию плазмообразующим аргоном;

$$q_{п} = q_{уп} * I_{п};$$

$$q_{о} = q_{оп} * I_{о};$$

$I_{о}$  и  $I_{п}$  – соответственно токи импульсов прямой и обратной полярности;

$q_{уп}$  и  $q_{оп}$  – удельные эффективные мощности (на 1 А тока) от приэлектродных областей у изделия на прямой и обратной полярностях.

Расчет приэлектродной мощности показал, что мощность на обратной полярности в 1,73 раза выше, чем на прямой.

Установлено, что с увеличением доли обратной полярности происходит увеличение эффективной мощности.

Некоторый рост расчетной эффективной мощности тока с увеличением времени горения дуги объясняется линейным нарастанием и спадом тока вследствие электромагнитных процессов в источнике питания. Такая осциллограмма постоянного тока имела место при наплавке точек свободной дугой на высоколегированную сталь [24]. Поэтому при одинаковой установке токов в опытах происходило небольшое увеличение их среднего значения с увеличением времени действия дуги. Трапецеидальная форма тока эквивалентна уменьшению времени действия дуги на время, равное полусумме времени спада и нарастания тока. Это подтвердилось тем, что уменьшение времени сварки в каждом из опытов первой серии на 0,3 секунды привело к снижению среднего относительного отклонения расчетной эффективной мощности по абсолютной величине с 9,1 до 5,8 %.

Так же был произведен расчет приэлектродной мощности, по результатам которой, мощность на обратной полярности в 1,73 раза выше, чем на прямой.

Далее произведен расчет сосредоточенности теплового потока для разных балансов полупериодов (60/40, 72/25, 90/10). В результате было установлено, что с увеличением доли обратной полярности происходит увеличение эффективной мощности.

#### Заключение по разделу

Таким образом, анализ технологических свойств сварочной дуги переменного тока прямоугольной формы показал, что форма тока может влиять на такие параметры как

- 1) проплавляющая способность дуги (геометрические размеры шва);
- 2) размеры зоны катодной очистки от оксидной пленки в зависимости от эффективной мощности прямой и обратной полярности дуги при и сварке сплавов Al;
- 3) величину эффективной мощности прямой и обратной полярности дуги при регулирование их длительности;
- 4) установлено, что замена синусоидальной формы тока, обладающей скоростью перехода тока через нуль  $di/dt = 9,6 \text{ кА/с}$  на переменный ток прямоугольной формы повышает скорость перехода тока через нуль до  $di/dt > 100 \text{ кА/с}$ , что обеспечивает стабильность горения дуги переменного тока;
- 5) доказана возможность регулирования величины зоны катодной очистки при сварке сплавов Al на переменном токе прямоугольной формы;
- 6) экспериментально проверена возможность регулировать величину эффективной мощности дуги переменного тока прямоугольной формы при сварке с  $f = 50 \text{ Гц}$ , регулируя длительность прямой и обратной полярности. Оптимальным соотношением (при равных токах прямой и обратной полярности) принять длительность тока обратной полярности равной (60-70) % от периода  $T = 0,02 \text{ с}$ .

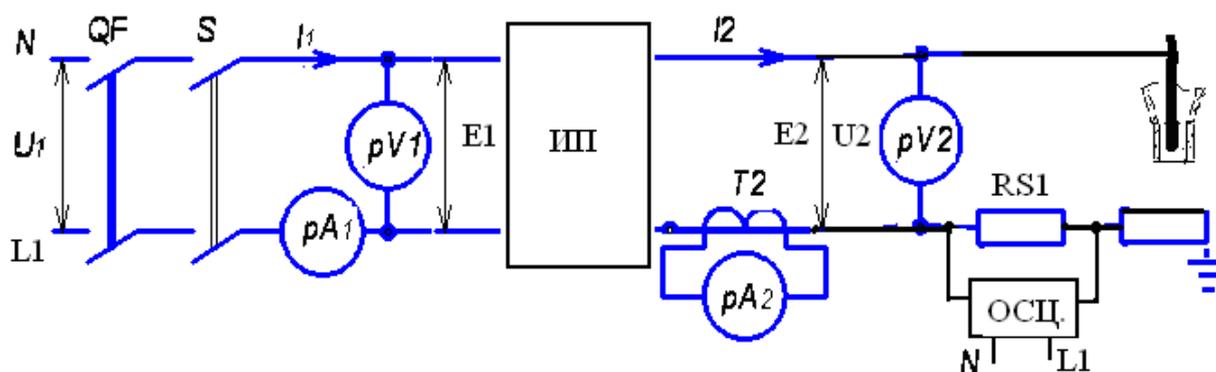
# Исследование влияния параметров плазмотрона на формирование сварной точки

## 3.1 Исследование формирования сварной точки на серийном оборудовании (2+2) мм

Анализ технологических свойств сварочной дуги переменного тока прямоугольной формы показал, что современное оборудование эффективно при сварке точек сжатой дугой переменного тока алюминиевых сплавов типа АМг-6 и АМг-3. Поэтому экспериментальным путем определяются параметры режима сварки, обеспечивающие стабильное формирование точки на серийно выпускаемом оборудовании. Для этого проводим серию экспериментов, для чего создается сварочный пост, в состав которого входят следующие оборудование и приборы.

1. Плазмотрон типа ГСД-1 (серийно выпускаемый плазмотрон).
2. Источник питания переменного тока прямоугольной формы TIG- 200 P AC/DC фирмы BRIMA .
3. Экспериментальный сварочный стенд типа СПО-1
4. Контрольно-измерительная аппаратура: амперметры, вольтметры, расходомеры Ar, H<sub>2</sub> O, осциллограф с1-55, компьютер, а также щупы.

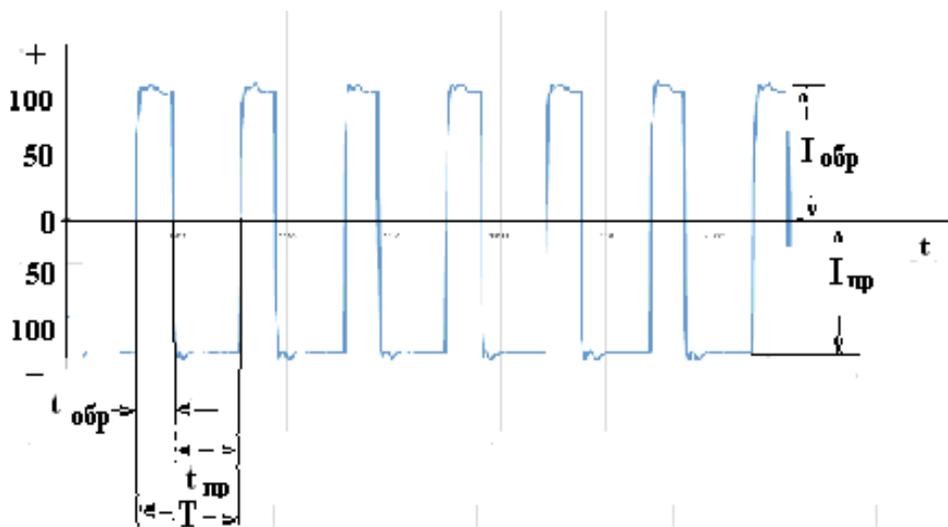
Схема сварочного поста с включенными приборами приведена на рисунке 9.



$I_1, I_2, U_1, U_2, i=f(t), u=f(t)$  – электрические параметры

Рисунок 9- Схема сварочного поста с приборами

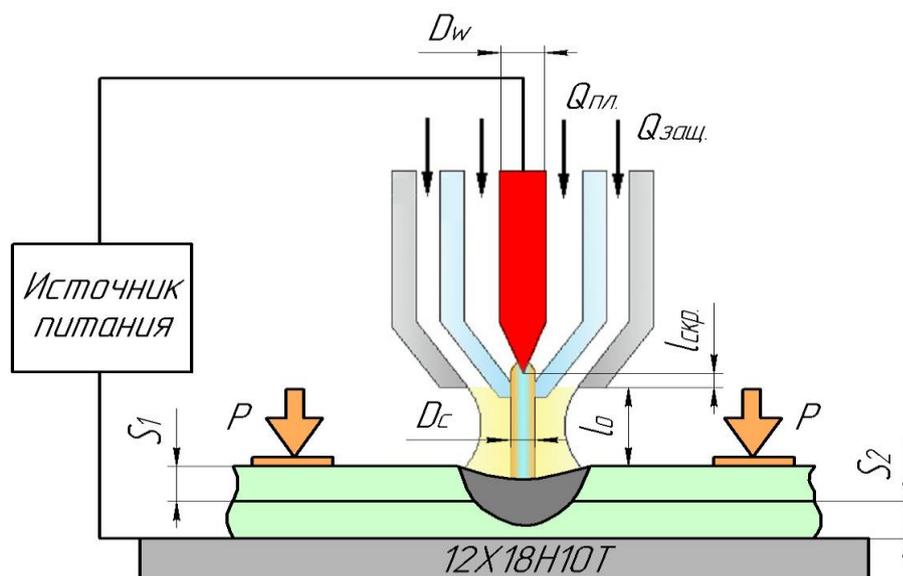
Сварка ведется от источника питания TIG-200 P на переменном токе прямоугольной формы с частотой 50Гц, динамические характеристики которого приведены на рисунке 10. Параметры тока определяются по динамическим характеристикам с осциллографа типа С1-55 [29].



$I_{пр}, I_{обр}, t_{пр}, t_{обр}, t_{пр}/t_{обр}, f, I_{пр} = I_{обр}$  - параметры сварочного тока

Рисунок 10 – Осциллограмма сварочного тока  $i=f(t)$

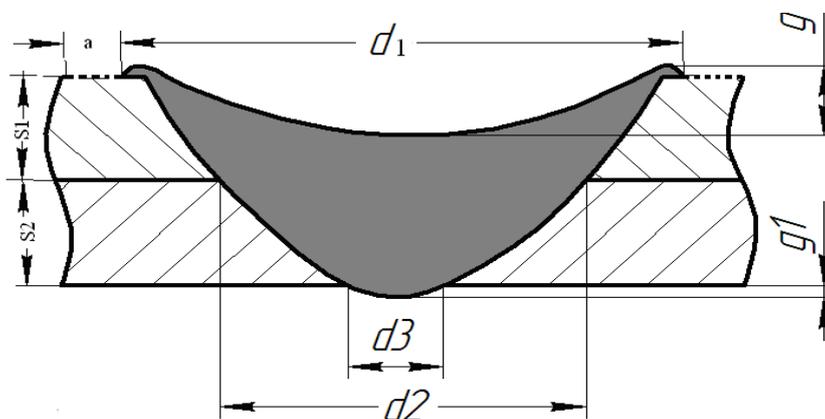
Отдельно приведен рисунок 11 с обозначением неэлектрических параметров сжатой дуги, контроль которых необходимо вести.



$D_w, D_c, Q_{пл}, Q_{защ}, I_{скр}, I_d, S1=S2, P$ - неэлектрические параметры

Рисунок 11- Схема плазмотрона типа ГСД-1

Параметры сварной точки определяем в соответствии с рисунком 12.

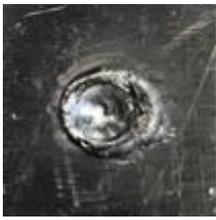


$d_1, d_2, d_3, g, g_1, a$  – параметры сварной точки и зоны очистки

Рисунок 12 – Геометрические размеры сварного соединения

Экспериментальные данные по сварке сжатой дугой, выполненной на серийно выпускаемом оборудовании сведем в единую таблицу 5.

Таблица 5 - Результаты эксперимента по сварке (2+2) мм \*

№	Сварочная точка	$t_{св}$ , с	$I_{св}$ , А	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$Q_{Ar}$ , л/мин	Примечание
1		7	100	11.5	-	4	Дуга зажглась, длина электрода не изменялась. При расплавлении Al выдувало не равномерно. Проплавилась только верхняя пластина.
2		8	100	11.5	4.5	4	Дуга зажглась, длина электрода не поменялась. Обе пластины проплавились и получилось отверстие.
3	-	-	100	-	-	4	Дуга не зажглась, была искра. Увеличиваем длину $I_d$ до 1,5 мм
4	-	-	100	-	-	4	

Продолжение таблицы 5

5	-	-	100	-	-	4	
6		7	100	12	6	4	Первая пластина проплавилась и начала плавиться вторая, но возникла критическая ситуация при которой образовалась двойная дуга
7		7	100	12	7	4	Первая пластина проплавилась. На выдувшемся Al видны черные точки. Это признак того, что опять образовалась двойная дуга.
8	-	-	75	-	-	2.5	Дуга не горит.
9	-	-	80	-	-	3	Дуга не зажглась
10		10	85	15	8	3	Первая пластина расплавилась. Выдуваемый алюминий распределился неравномерно, а значит подача была неравномерна
11	-	-	100	-	-	3	Дуга не зажглась.
12		5	100	12	7	4	При расплавлении второй пластины осталась оксидная пленка на ней.
13	-	-	100	-	-	4	Дуга не зажглась
14		5	100	12	6	4	Видно проплавление первой пластины, но пластина под ней, не начала плавиться. Возможно из-за плохого соединения между пластинами.
* $f = 50\text{Гц}$ , $I_{\text{пр}} = I_{\text{обр}}$ , $i = f(t)$ приведен на рисунке 10							

В этой серии экспериментов получили все образцы с плохо сформированной точкой. Однако снижение расхода защитного газа оставляет надежду сформировать качественную точку.

В процессе проведения экспериментов выявлено возникновение двойной дуги. В связи с этим проведена разработка вставки с  $d_c = 3$  мм и 2 мм для плазмотрона ГСД-1. Конструкция вставки представлена на рисунке 13 [2]. Доработав конструкцию плазмотрона ГСД-1, провели еще вторую серию экспериментов, уменьшив расход защитного газа.

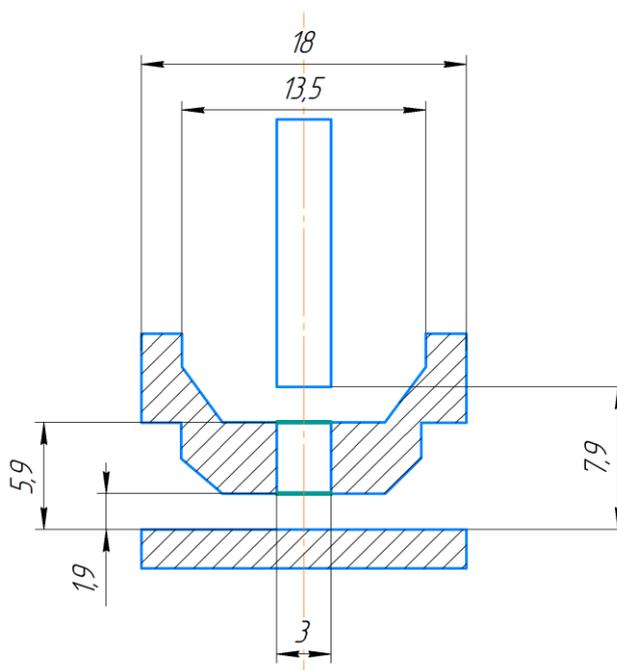


Рисунок 13 - Конструкция вставки

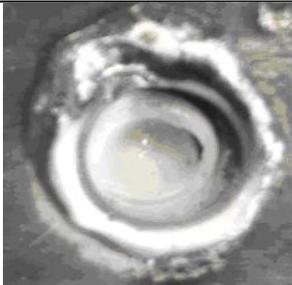
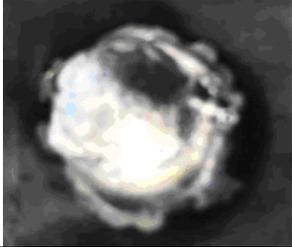
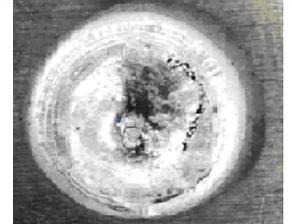
На этом этапе сварка точек сжатой дугой переменного тока алюминиевых сплавов прямоугольной формы производится с регулированием таких параметров, как соотношения  $t_{пр}/t_{обр}$ ,  $Q_{Ar}$ ,  $t_{св}$ ,  $I_{д}$ , что позволит определить роль параметра режима на формирование точки.

Учитывая результаты экспериментов первого этапа, на котором обнаружено влияние расхода защитного и плазмообразующего газа проведем эксперименты, изменяя расход аргона от 0,6 до 3 л/мин. Сохраняя величину

тока равной 100А при длительности сварки 7с. Вставка для ГСД-1 взята с d=3мм.

Результаты эксперимента сведены в таблицу 6.

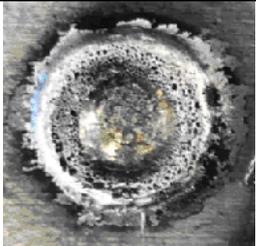
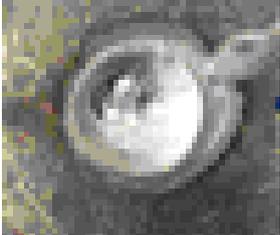
Таблица 6 - Результаты эксперимента при  $Q_{заш} = var$

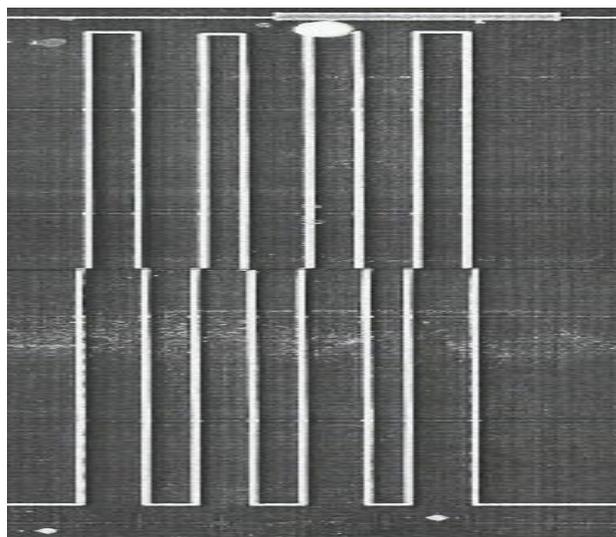
№ точки	Св. точка	Iамп, А	d1,мм	d3,мм	Q <sub>заш</sub> Ар. л/МИН	t <sub>св</sub> , с
12		100	11,5-13	7	3	7
15		100	10	10	1,0	7
16		100	9	9	0,8	7 брак
17		100	7	7	0,6-0,7	7
18		100	11.5	11	0,6	
<p>*d<sub>w</sub> = 3мм, l<sub>д</sub> = 1,5мм, D<sub>с</sub> = 3мм, l<sub>скр</sub> = 2мм, t<sub>св</sub> = 7с, f = 50 Гц, P = 45Кг, S1=S2=2мм t<sub>обр</sub>/t<sub>пр</sub> = 60 / 40</p>						

В результате эксперимента наилучшие результаты получены при расходе аргона  $Q_{\text{заш}} = (0,6-1)$  л/мин.

Результаты опыта при изменении времени сварки приведены в таблице 7. Осциллограмма тока показана на рисунке 14.

Таблица 7 - Результаты эксперимента при  $t_{\text{св}} = \text{var}$

№ точки	Св. точка	$I_{\text{амп}}$ , А	$d_1$ , мм	$d_3$ , мм	$Q_{\text{заш Ар}}$ , л/мин	$t_{\text{св}}$ , с
19		100	16	12-12,5	1,0	10
15		100	10	10	1,0	7
20		100	9,5	9,0	1,0	5
* $d_w = 3\text{мм}$ , $l_d = 1,5\text{мм}$ , $D_c = 3\text{мм}$ , $l_{\text{скр}} = 2\text{мм}$ , $Q_{\text{зашАр}} = 1,0$ , $f = 50$ Гц, $P = 45\text{кВт}$ , $S_1 = S_2 = 2\text{мм}$ , $t_{\text{пр}}/t_{\text{обр}} \sim 60 / 40$						



$$i=f(t): I_{пр} = I_{обр} = 100A, \quad t_{обр} / t_{пр} = 60/40 \quad (0сц. с ПК)$$

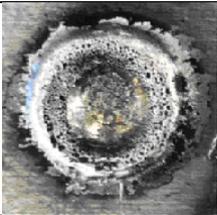
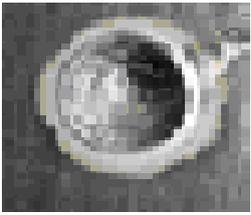
Рисунок 14 - Осциллограмма тока

Наилучшие результаты получены при длительности сварки 7с.

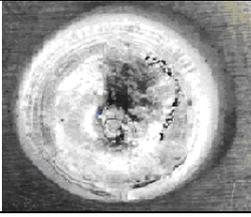
Определив расход защитного газа и длительность сварки, определим влияние величины тока, учитывая, что  $I_{пр} = I_{обр}$ .

Результаты эксперимента при изменении тока прямой и обратной полярности показан в таблице 8.

Таблица 8 - Результаты эксперимента при  $I_{пр} = I_{обр} = var$

№ точки	Св. точка	Iамп, А	d1,мм	d3,мм	Q <sub>защ.г.</sub> л/мин	t <sub>св.</sub> с
21		85	7	6,5	1,0	7
22		90	6,5	6	1,0	7

Продолжение таблицы 8

15		100	10	10	1,0	7
18		120	11.5	11	1,0	7
* $d_w = 3\text{мм}$ , $l_d = 1,5\text{мм}$ , $D_c = 3\text{мм}$ , $l_{скр} = 2\text{мм}$ , $Q_{зашАг} = 1,0$ , $f = 50\text{ Гц}$ , $P = 45\text{кВт}$ , $S_1 = S_2 = 2\text{мм}$ , $t_{пр}/t_{обр} \sim 60 / 40$						

Изменяя ток в диапазоне от 100 до 120 А, удается сформировать точку с необходимыми параметрами  $d_1$  и  $d_3$  при сварке (2+2) мм на сплаве АМГ-6.

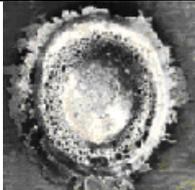
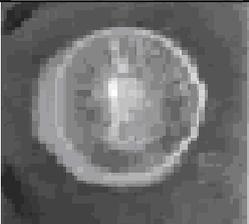
Инвертор TIG-200P AC/DC имеет 4 режима баланса длительностей прямой и обратной полярности, т.е. обладает широкой возможностью регулировать тепловложение в ванну, поэтому проводим серию экспериментов, регулируя баланс длительностей.

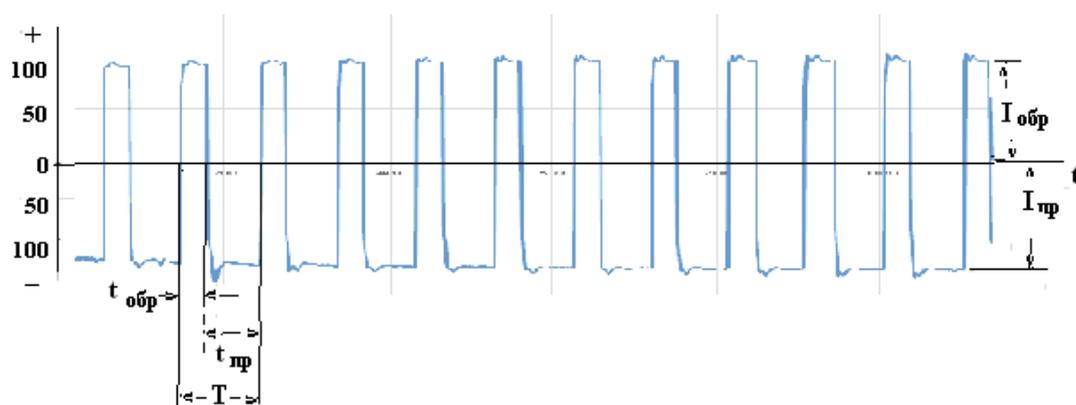
Результаты эксперимента при изменении полярностей предоставлен в таблице 9, его осциллограмма показана на рисунке 15.

Таблица 9 - Результаты эксперимента при  $t_{пр}/t_{обр} = \text{var}$

№ точки	Св. точка	$I_{амп}$ , А	$d_1, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$	$Q_{зашАг}$ , л/мин	$t_{св}$ , с	$t_{пр}/t_{обр}$
23		100	8	7,5	1	7	33,3/66,6
24		100	7,5	6	1	7	36,4/63,6

Продолжение таблицы 9

25(В)		90-100	7	6,5	1	7	40/60
26		100	6	5,5	1	7	52/47,8
27 (15В) )		100-120	11,5	11	1	7	60/40
28 (15М) )		100-120	7	6	1	7	60/40
29 (16М) )		100-120	7,5	6,5	1	7	50/50

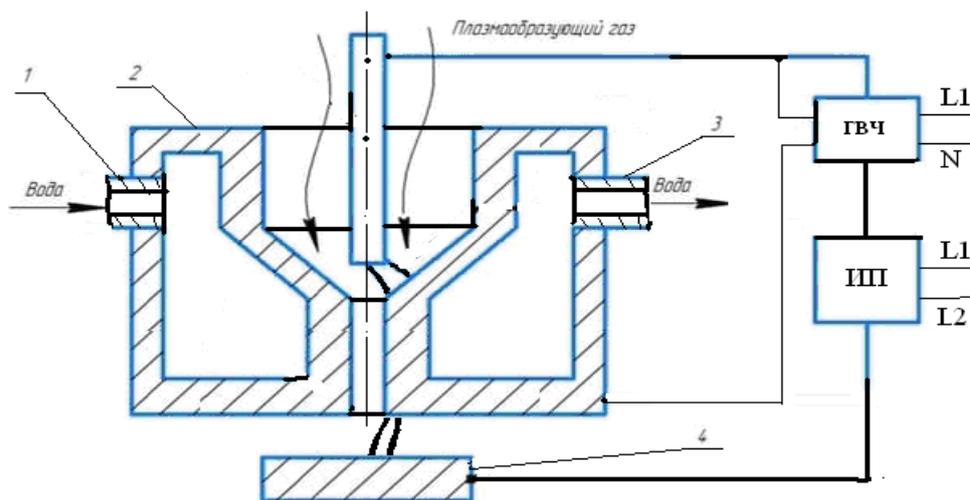


$$i=f(t): I_{пр}= I_{обр}=100A, \quad t_{обр} / t_{пр} = 36,4 / 63,6 \quad (0сц.3)$$

Рисунок 15 - Осциллограмма тока

В процессе проведения экспериментов выявлены режимы, сопровождающиеся возникновением двойной дуги. Нарушается стабильность процесса.

Схема образования двойной дуги приведена на рисунке 16, а результаты ее воздействия на сопло плазмотрона – на рисунке 17.



1,3 – штуцера, 2 – сопло, 4- изделие, гвч- осциллятор ОСПЗ-300, ИП-NIG-200P AC/DC

Рисунок 16- Схема образования двойной дуги

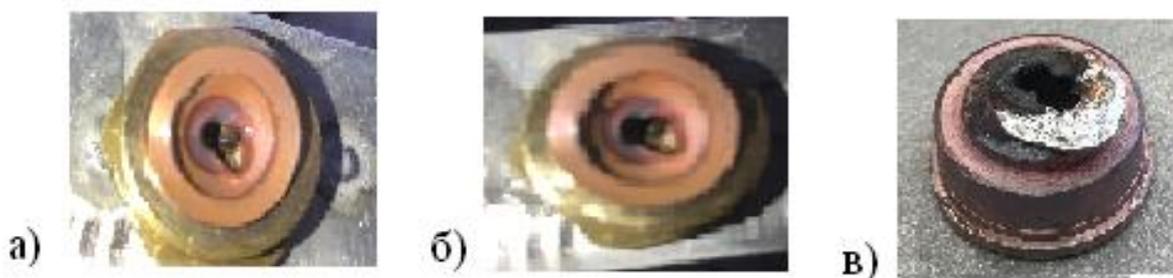


Рисунок 17 – Результат воздействия двойной дуги на сопло

Возникновение двойной дуги хорошо изучено при сварке сжатой дугой на постоянном токе сталей. На переменном токе синусоидальной формы двойная дуга известна, но изучена мало. Применение для сварки сжатой дугой инверторов переменного тока с прямоугольной формой -явление мало изученное. В инверторе TIG-200P схема предусматривает блок импульсов

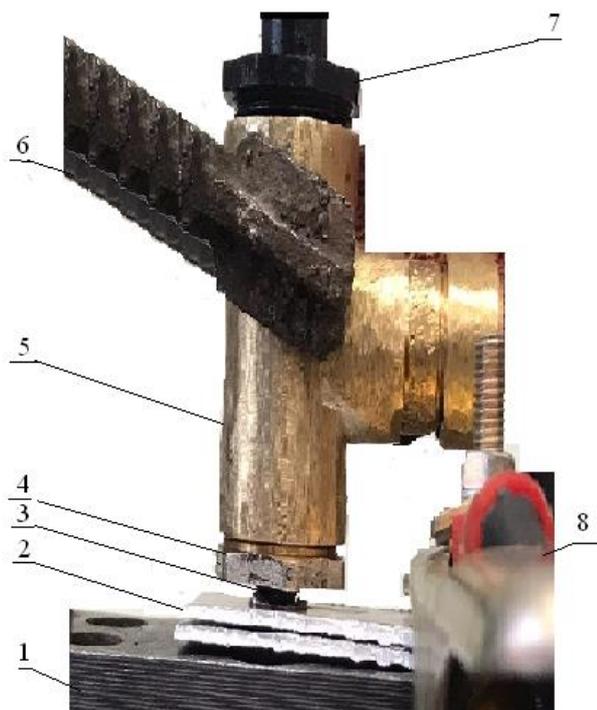
высокой частоты, который работает с частотой 50Гц при переходе тока через нуль. Есть предположение, что эти импульсы провоцируют возникновение двойной дуги.

Результаты эксперимента при  $t_{\text{пр}}/t_{\text{обр}} = \text{var}$  показали, что существуют режимы, когда точка формируется хорошо. Особо надо выделить баланс 60/40%.

Таким образом, наибольшее влияние на геометрические характеристики точки оказывает сила сварочного тока и время сварки, на зону отчистки от катодной пленки влияние оказывает баланс полярностей. Основной проблемой в данном случае является проблема возникновения двойной дуги.

### **3.2 Особенности конструкции плазмотрона для сварки сжатой дугой переменного тока с прямоугольными импульсами**

Для проведения дальнейших экспериментальных работ по электродуговой точечной сварке сплава АМГ-6 и АМГ-3 на переменном токе прямоугольной формы спроектирован и изготовлен специальный плазмотрон ГВС-1 (рисунок 18).

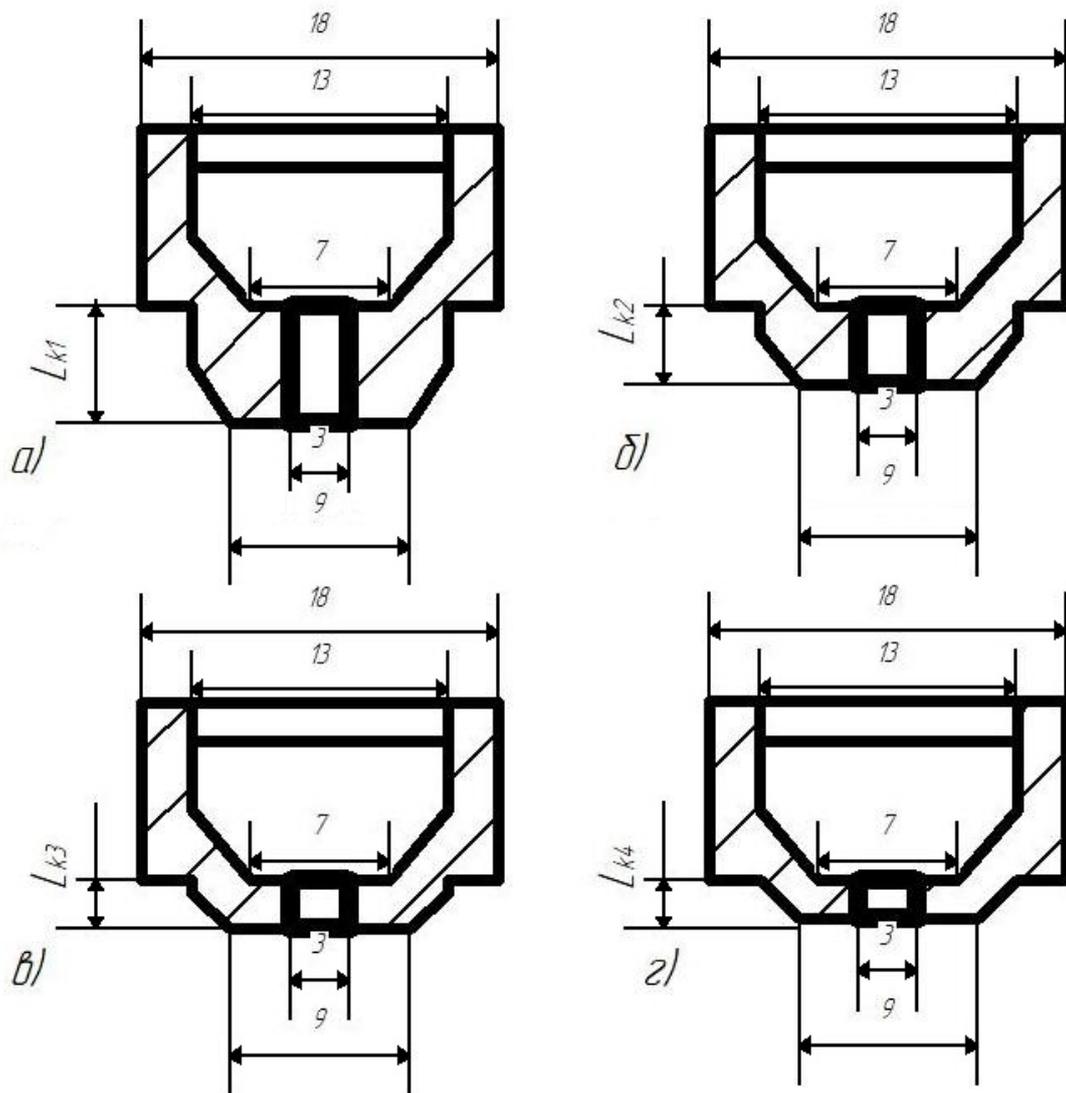


1-сварочный стол; 2-алюминиевые пластины; 3-сопло; 4-держатель сопла; 5-корпус ГВС-1;  
6-держатель корпуса; 7-фиксатор электрода и место подачи газа; 8-прижим.

Рисунок 18 – Схема конструкции ГВС-1

Плазмотрон ГВС-1 состоит корпуса, который выполнен из тройника. Сам корпус фиксируется держателем. Держатель для сопла вкручивается в корпус и фиксирует сопло в горизонтальном положении, сверху вкручивается фиксатор для неплавящегося электрода и подачи защитного газа. Конструкция сопла была доработана в соответствии с работой [19], поэтому данная конструкция обеспечивает максимальную защиту от образования двойной дуги.

Конструкция сопла плазмотрона выполнена с разной длиной канала представлена на рисунке 19.



а)  $L_{k1} = 5,9$  мм б)  $L_{k2} = 4,0$  мм в)  $L_{k3} = 2,5$  мм г)  $L_{k4} = 2,0$  мм

Рисунок 19 – Конструкция сопла экспериментального плазмотрона:

Длину канала  $L_k$  изменяем от 2,0 мм до 5,9 мм до учитывая опыт работы авторов [6, 21, 22, 24, 29].

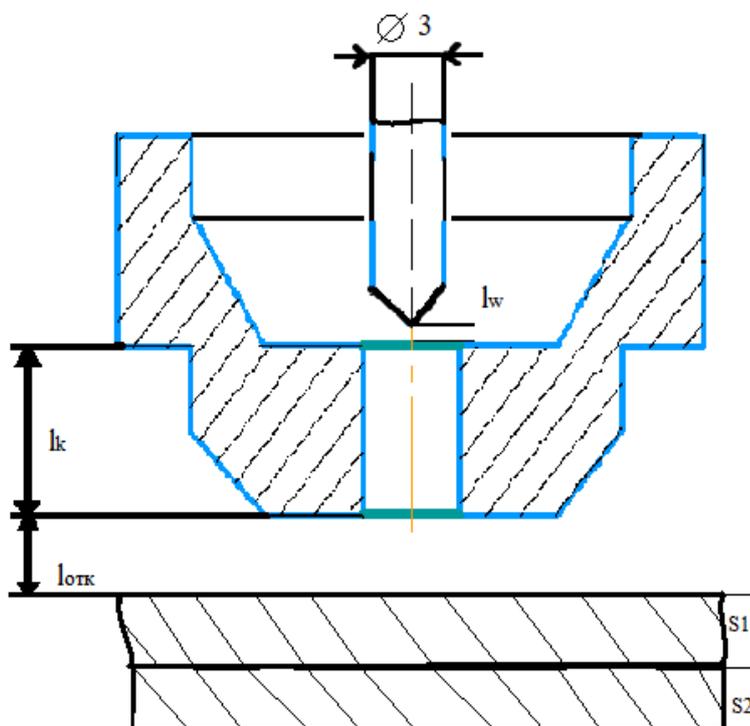
Из работ [21, 22, 24, 29] известно, что  $U_{сж}$  зависит от  $I_{сж}$ , которая определяется, как составляющая от  $I_{сж} = I_{отк} + I_k + I_w$ ,

где  $I_{отк}$  – длина открытой дуги;

$I_k$  – длина дуги в корпусе сопла;

$I_w$  – длина дуги от W электрода до сопла.

На рисунке 20 приведена схема определения составляющих сжатой дуги.



$l_{отк}$  - длина открытой дуги;  $l_k$  - длина дуги в корпусе сопла;  $l_w$  - длина дуги от W электрода до сопла;  $S_1=S_2=2\text{мм}$

Рисунок 20 – Схема определения составляющих сжатой дуги

Предварительные испытания плазмотрона ГВС-1 в комплекте с инвертором TIG-200PAC/DC при сварке образцов из сплава АМГ-6 позволили определить оптимальные геометрические параметры:  $l_{отк}$ ,  $l_k$ ,  $l_w$ ,  $d_c$ . Перечисленные параметры относятся к неэлектрическим параметрам режима сварки.

Спроектированный и изготовленный плазмотрон ГВС-1 для проведения экспериментальных работ по электродуговой точечной сварке сплава АМГ-6 переменным током прямоугольной формы, оснащенный комплектом сопел с различной величиной  $l_k$ , и  $d_c$ , позволяет провести исследования, оценив влияния неэлектрических параметров на формирование сварной точки.

### 3.3 Методика проведения исследований

В соответствии с темой выпускной квалификационной работы исследуется влияние неэлектрических параметров плазмотрона на формирование сварной точки алюминиевых сплавов переменным током прямоугольной формы с использованием инвертора фирмы BRIMA. Для чего разработана методика исследований.

Исследования проводятся на образцах из сплава АМг-6 размером 40x150x2 мм .

В качестве источника питания применяется инвертор TIG-200P AC/DC (рисунок 21), техническая характеристика которого приведена в таблице 10, вольтамперные характеристики инвертора крутопадающие и показаны на рисунке 22.



Рисунок 21 - Внешний вид инвертора TIG-200P AC/DC(a) и его ВАХ

Таблица 10 - Технические данные инвертора TIG-200P AC/DC

Параметры источника питания	Brima TIG-200p AC/DC
Напряжение сети, В	220
Напряжение холостого хода	56
Частота сети, Гц	50/60

Продолжение таблицы 10

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

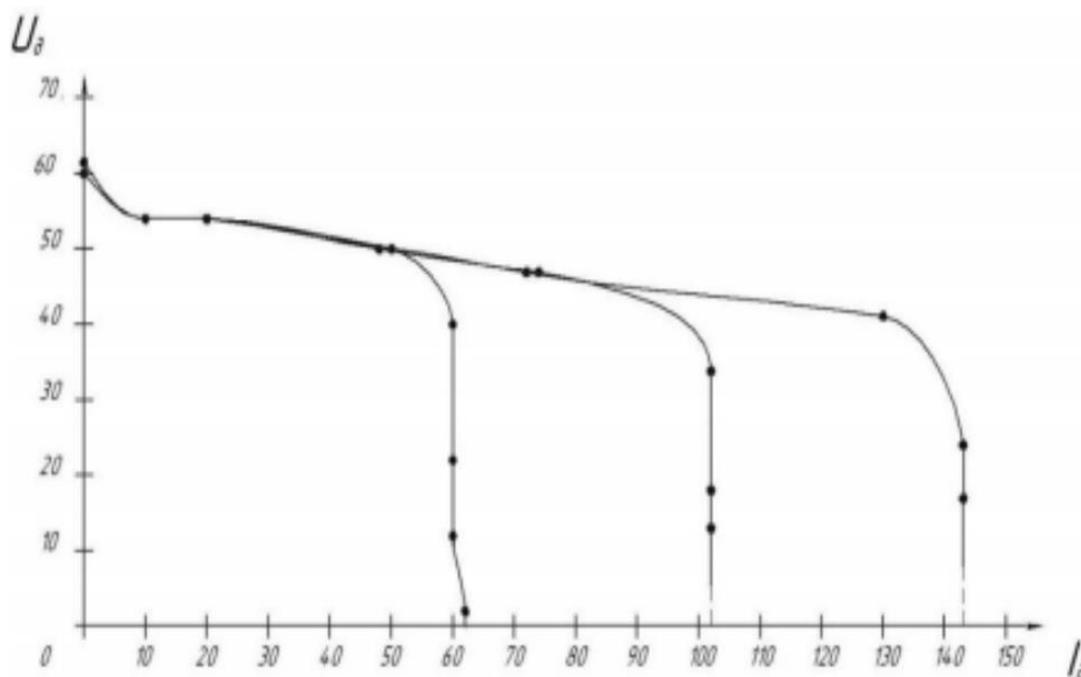


Рисунок 22 – Вольтамперные характеристики «Vrima TIG-200p AC/DC»

Род тока инвертора – переменный прямоугольной формы:  $I_{пр} = I_{обр}$ ,  $t_{обр} / t_{пр} = 52/47,8$  (рисунок 23, а). Схема инвертора предусматривает изменение баланса между прямой и обратной полярностью (рисунок 23, б).

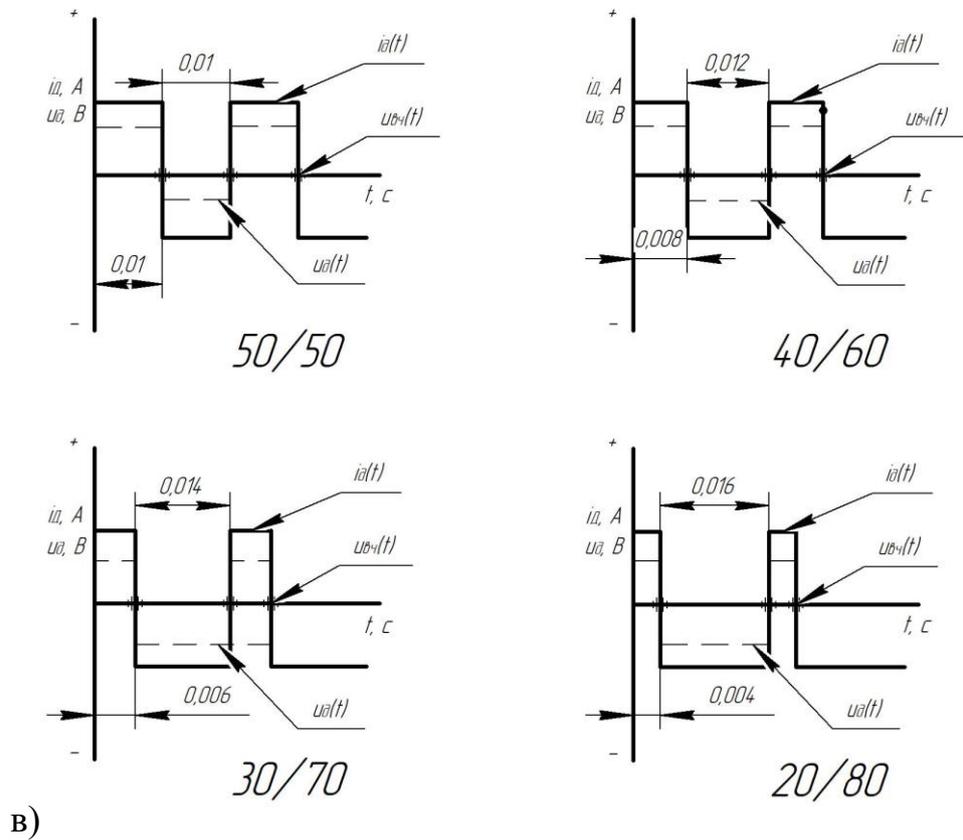
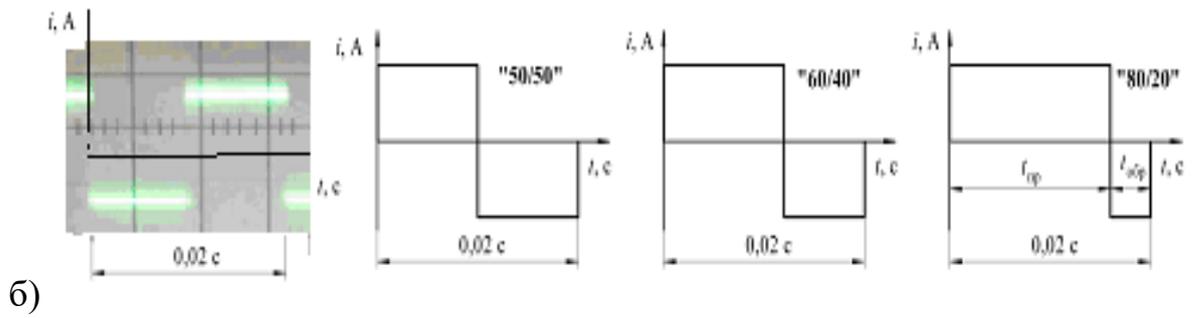
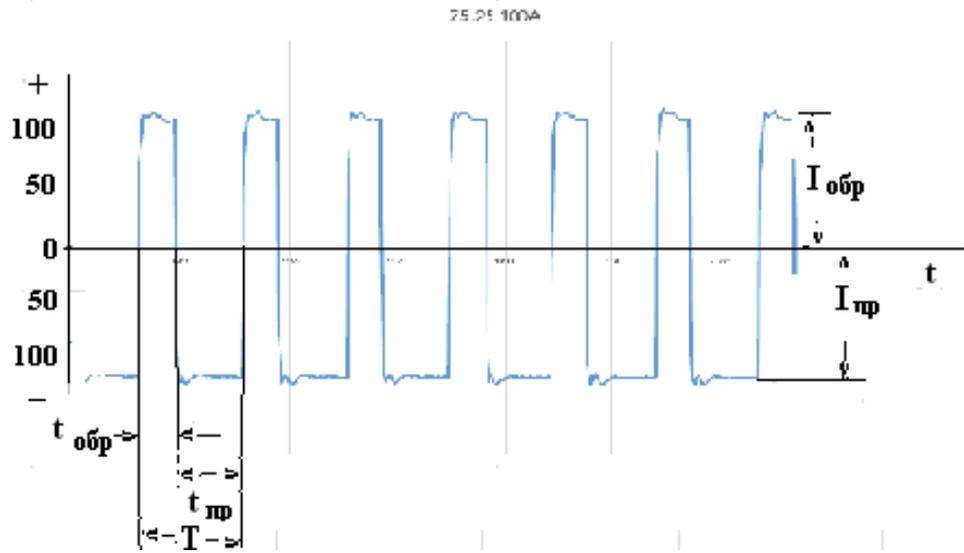


Рисунок 23 - Динамические характеристики  $i_d = f(t)$  и  $u_{вч} = f(t)$

Переход тока через нуль осуществляется высокочастотными импульсами (рисунок 23, в).

Режим работы инвертора - сварка точками на переменном токе (рисунок 24).

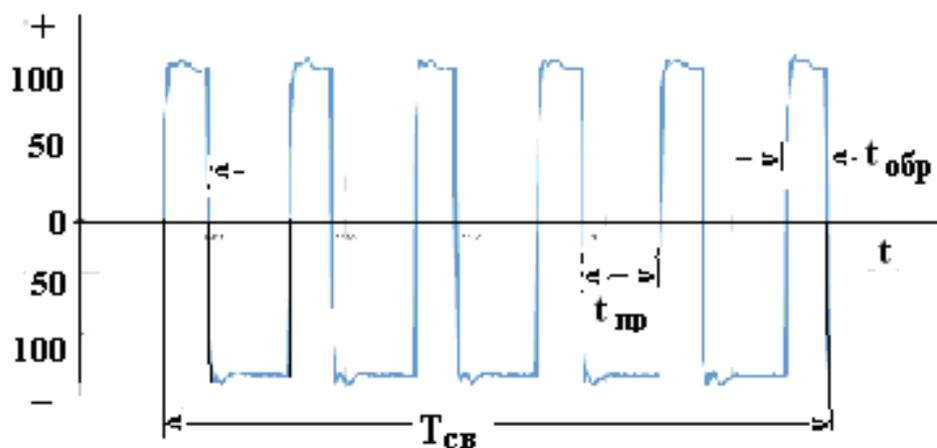
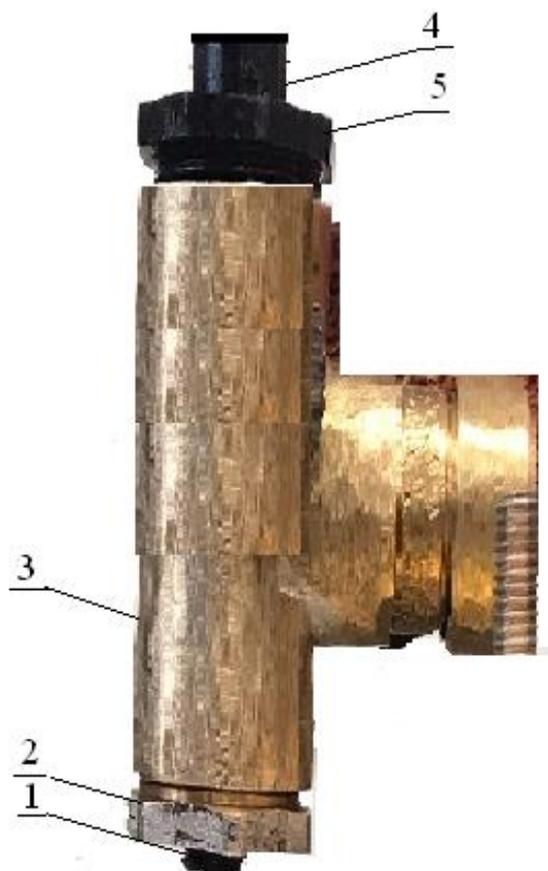


Рисунок 24 – Диаграмма режима 4 TIG-200 P

Исследования проводятся сжатой дугой с использованием плазмотрона ГВС-1, внешний вид которого приведен на рисунке 25, а технические характеристики в таблице 11.



1 – сопло, 2 – держатель сопла 3 – корпус ГВС-1, 4 – подача газа, 5 – держатель электрода

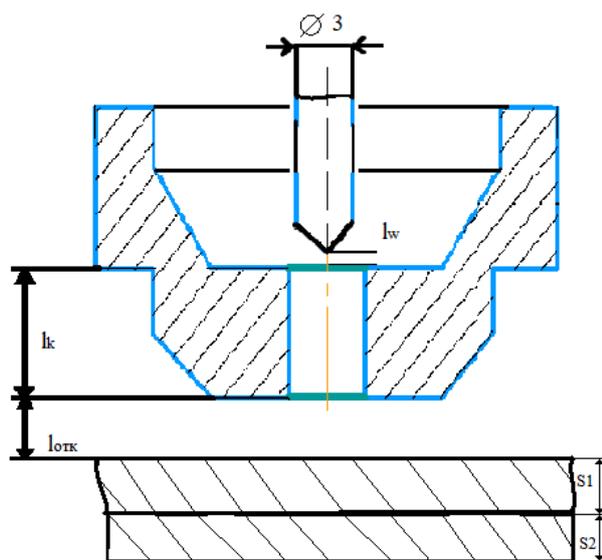
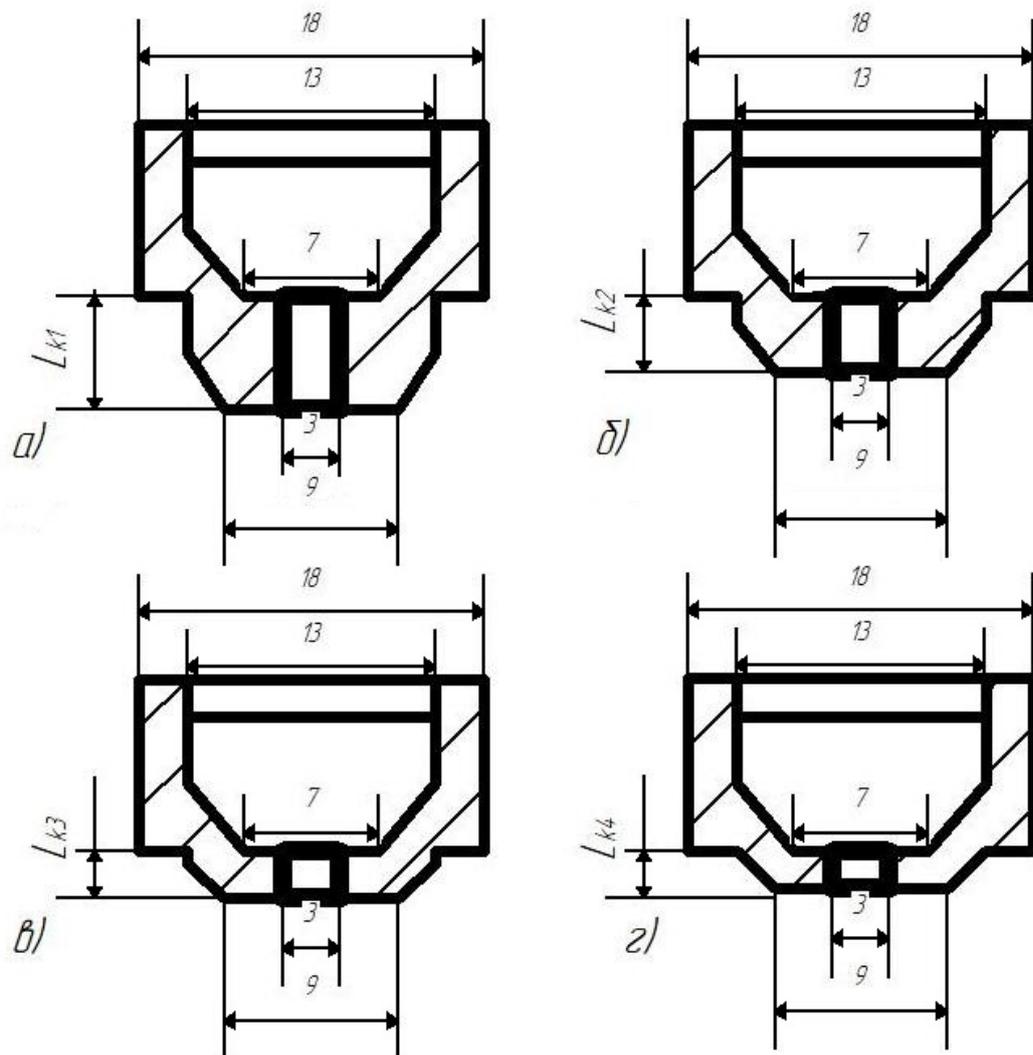
Рисунок 25 - Внешний вид плазмоторна ГВС-1

Таблица 11 - Технические данные плазмоторна ГВС-1

Название элемента	L, мм	d, мм	S <sub>стенки</sub> , мм
Держатель сопла	25	20	10
Корпус	150	20	10
Шайба	45	20	13
Отверстие подачи газа	35	10	5

В плазмоторне ГВС-1 применяется вольфрамовый электрод диаметром 3,0 мм и длиной не менее 150 мм.

Для проведения экспериментов изготовлено 4 типа вставок плазмоторна, геометрические размеры которых приведены на рисунке 26.



а)  $L_{k1} = 5,9$  мм б)  $L_{k2} = 4,0$  мм в)  $L_{k3} = 2,5$  мм г)  $L_{k4} = 2,0$  мм

Рисунок 26 – Геометрические размеры вставок

Длина  $l_k$ ,  $l_w$  регулируются вставками, а длина открытого участка дуги  $l_{отк}$  - лабораторным стендом (рисунок 27).

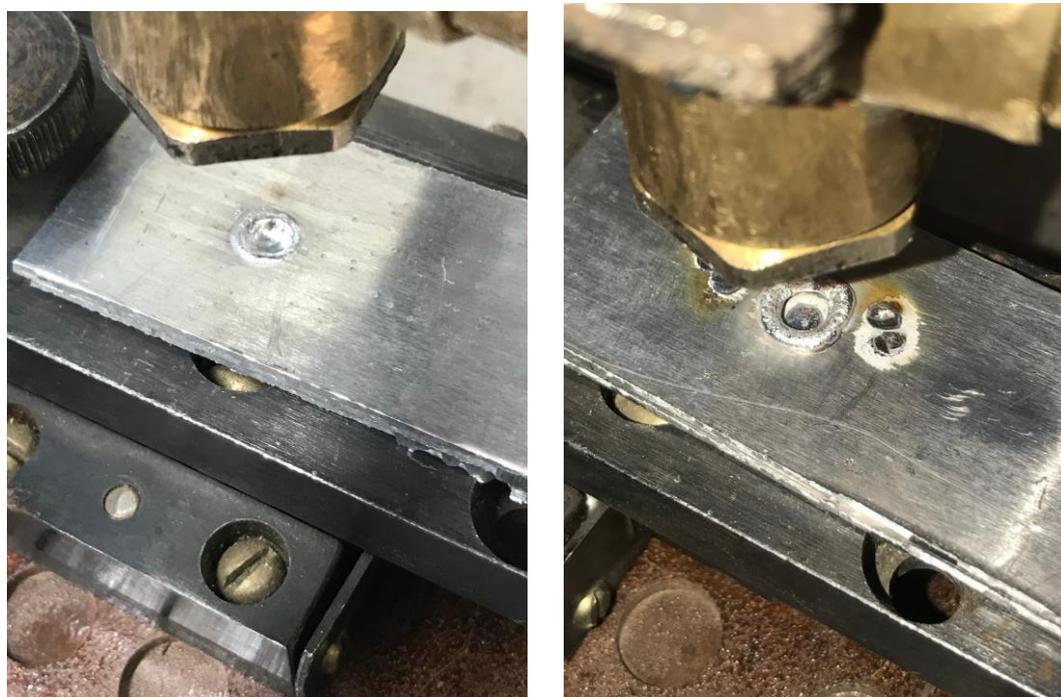


Рисунок 27 – Лабораторный стенд

Образцы на стенде прижимаются вручную струбцинами с усилием 45кг (рисунок 28).

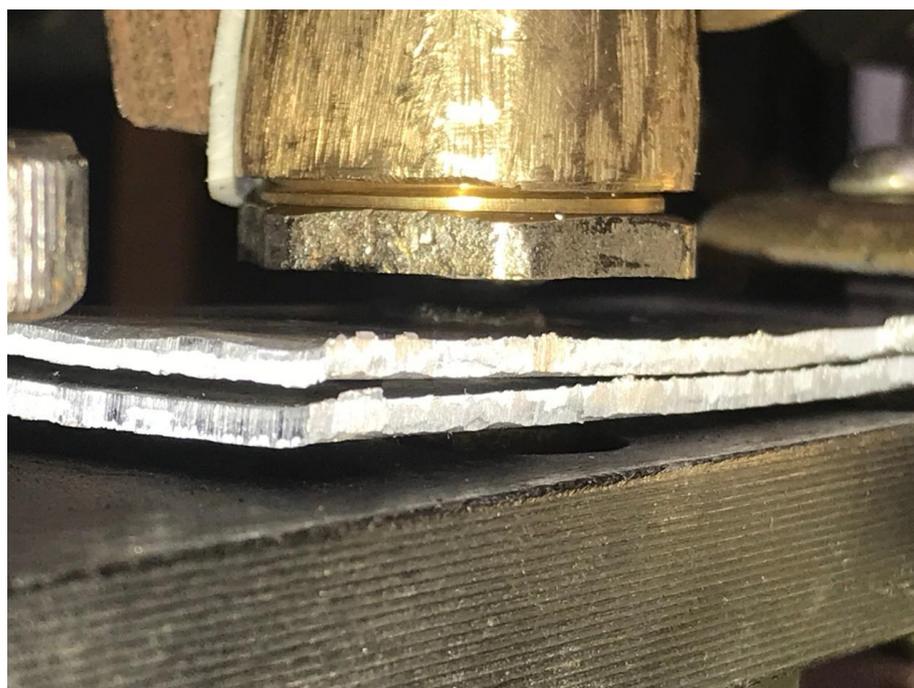


Рисунок 28 – Схема прижатия образцов

Контроль электрических параметров тока прямой и обратной полярности:  $I_{пр} = I_{обр}$ , напряжения, баланса полярностей  $t_{обр}$  и  $t_{пр}$ , длительности сварки точки  $T_{св}$  производится осциллографом типа С1-55 и компьютером.

Контроль геометрических размеров точки, а именно ее внешний диаметр  $d1$  и диаметр проплавления  $d2$  (рисунок 29) производится с помощью линейки.



Рисунок 29 – Геометрические размеры точки

Снимаем зависимости  $U_{сж} = f(l_k)$ ,  $U_{сж} = f(l_{отк})$ ,  $U_{сж} = f(l_w)$ .

Определяем влияние отдельных участков длины сжатой дуги на формирование точки, для этого снимаем зависимости  $U_{сж} = f(l_k)$ ,  $U_{сж} = f(l_{отк})$ ,  $U_{сж} = f(l_w)$  и формируем требования к оптимальным параметрам конструкции плазмотрона с устойчивым начальным возбуждением сжатой дуги.

Проводим серию экспериментов, изменяя длину  $l_k$

Первую серию экспериментов проводим, изменяя длину канала сопла  $l_k = 5,9; 4,0; 2,5; 2,0$  мм. В этом случае длина сжатой дуги  $l_{сж}$  в процессе эксперимента изменяется от 5 до 8,9мм :

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 2 + 5,9 + 1 = 8,9 \text{ мм};$$

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 2 + 4,0 + 1 = 7,0 \text{ мм};$$

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 2 + 2,5 + 1 = 5,5 \text{ мм};$$

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 2 + 2,0 + 1 = 5,0 \text{ мм}.$$

Эксперименты проводятся на лабораторном стенде (рисунок 27).

Используется сплав АМГ-6 с толщиной каждой пластины 2 мм, с силой прижатия 45 кг.

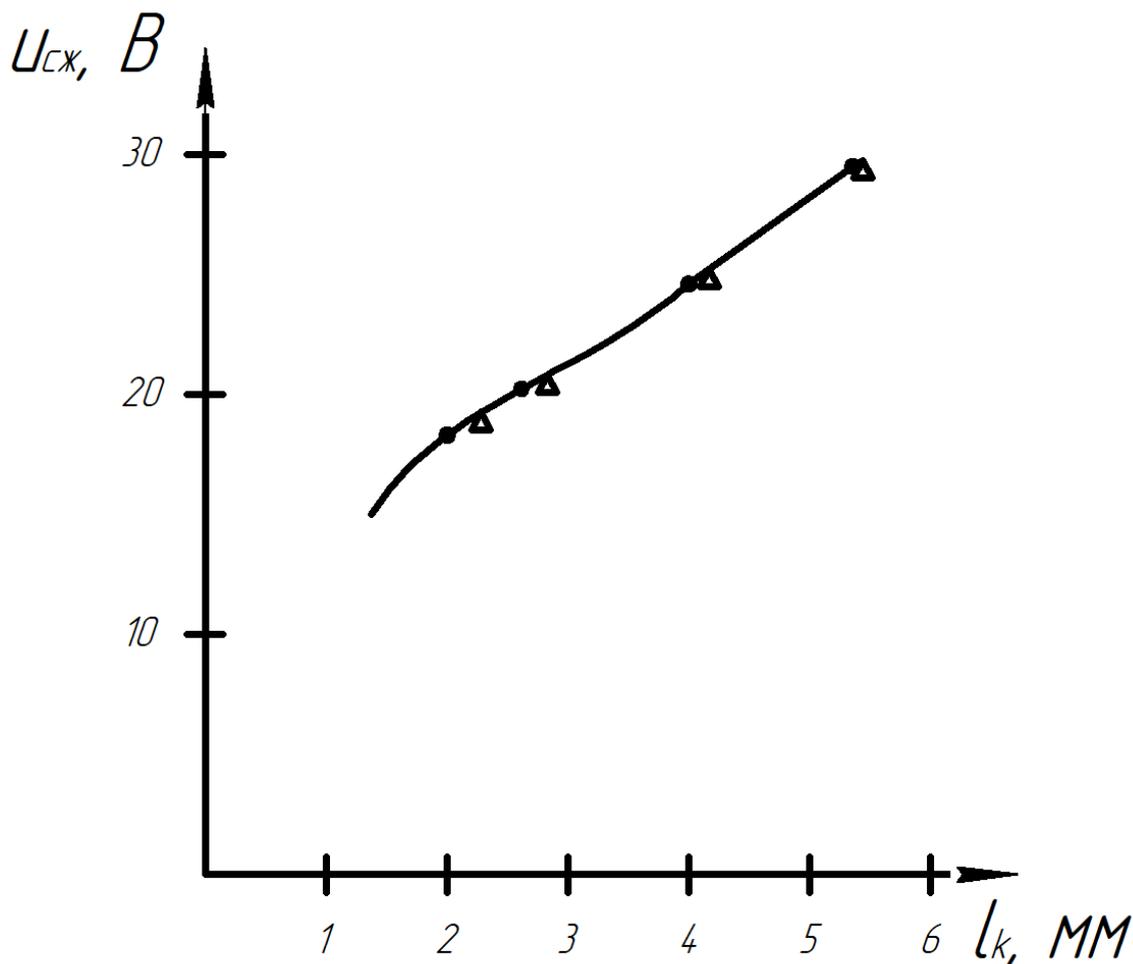
### 3.4 Влияния параметров плазмотрона на формирование сварной точки

Изменяя длину канала сопла, определим зависимость  $U_{сж} = f(l_k)$  (рисунок 30). При этом максимальная длина сжатой дуги определяется по формуле (2)

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w \quad (2)$$

Режим сварки: расход аргона 1 л/мин, ток 100 А (4-й режим TIG-200P AC/DC). Определяем зависимость  $U_{сж} = f(l_k)$  при установке  $l_{отк} = 1,9$  мм,  $l_w = 1,0$  мм (рисунок 31) Длину дуги от W электрода до сопла  $l_w$  авторы работ [3, 14] связывают с двойным дугообразованием, которое приводит к разрушению сопла. Авторы работ [3, 17] рекомендуют  $l_w \leq 1$  мм [2][19].

Эксперимент проводим изменяя длину канала:  $L_{k1} = 5,9$  мм;  $L_{k2} = 4,0$  мм;  $L_{k3} = 2,5$  мм;  $L_{k4} = 2,0$  мм. По результатам эксперимента построим зависимость  $U_{сж} = f(l_k)$  (рисунок 30). Конструкция плазмотрона обеспечивает  $U_{сж} = 30$  В при длине канала 5,9мм. Это хороший результат для плазмотрона ГВС-1. Рекомендовать будем  $L_{k2} = 4,0$  мм.



• - [15]; Δ - [19]

Рисунок 30 – Зависимость  $U_{сж} = f(l_k)$

Длину сжатой дуги можно изменять и за счет длины открытой составляющей сжатой дуги  $l_{отк}$  в диапазоне от 1,0 до 5,0 мм, тогда  $l_{сж}$  будет изменяться от 6 до 10мм, как показано в (3):

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 1 + 4 + 1 = 6 \text{ мм}; \quad (3)$$

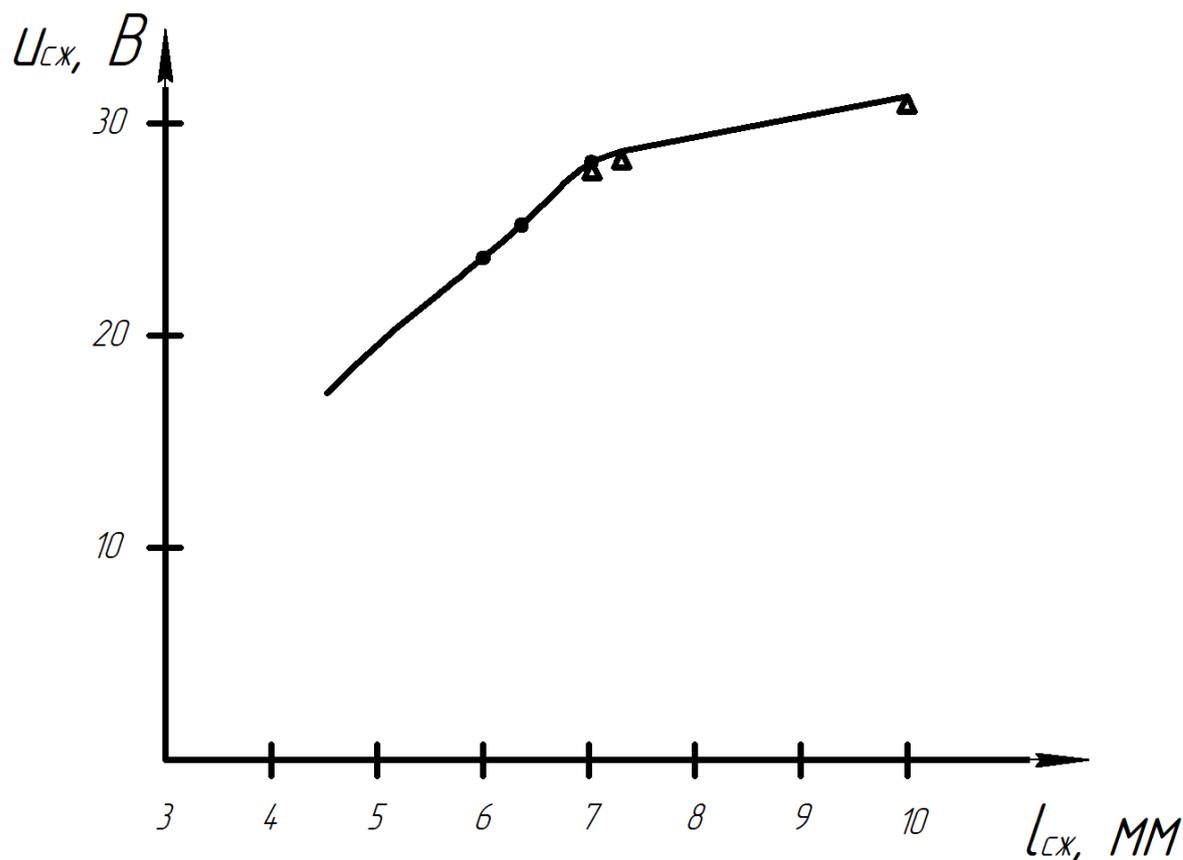
$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 2 + 4 + 1 = 7 \text{ мм};$$

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 3 + 4 + 1 = 8 \text{ мм};$$

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 4 + 4 + 1 = 9 \text{ мм};$$

$$l_{сж} = l_{отк} + l_k + l_w = 5 + 4 + 1 = 10 \text{ мм}.$$

По результатам эксперимента строим зависимость  $U_{сж} = f(l_{сж})$  (рисунок 31).



• - [15];  $\Delta$  - [19]

Рисунок 31 - Зависимость  $U_{cж} = f(l_{cж})$

По результатам экспериментов, проведенных на разной длине открытой составляющей дуги  $l_{отк}$  качественное формирование точек получено при  $l_{отк} = (1-3)$  мм. Для данного плазмотрона рекомендуем указанный диапазон.

Полученные зависимости  $U_{cж} = f(l_k)$ ,  $U_{cж} = f(l_{отк})$ ,  $U_{cж} = f(l_w)$  позволяют установить оптимальные неэлектрические параметры:  $l_k = 4$  мм,  $l_{отк} = 1-3$  мм,  $l_w = 1$  мм при диаметре сопла  $d_c = 3$  мм.

В результате из всей серии экспериментов хорошее формирование точки получили при оптимальных неэлектрических параметрах:  $l_k = 4$  мм,  $l_{отк} = 1-3$  мм,  $l_w = 1$  мм при диаметре сопла  $d_c = 3$  мм,  $I_d = 100$  А,  $Q_{Ar} = 1,0$  л/мин, балансе длительностей 60/40%,  $t_{св} = 7$  с (рисунок 32).

Сварная точка получилась (рисунок 32), но включения в сварной точке убрать не удалось из-за плохой подготовки образца.

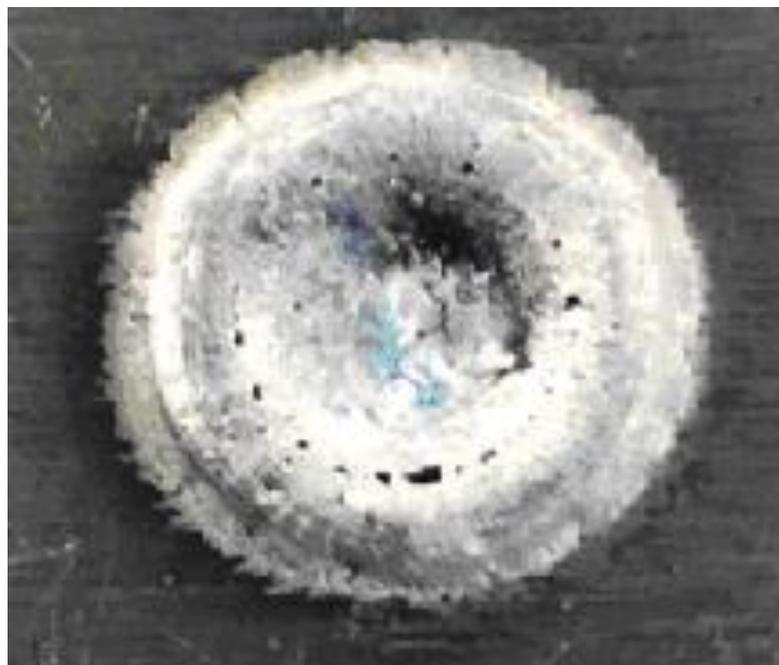


Рисунок 32- Внешний вид сварного соединения

Спроектированный плазмотрон ГВС-1 при работе с современным оборудованием обеспечивает стабильное горение сжатой дуги в 4 режиме инвертора TIG-200 P AC/DC (сварка точками).

## **4 Разработка технологического процесса сварки сжатой дугой переменным током с прямоугольной формой импульсов (2+2) мм**

### **4.1 Технологический процесс сварки сжатой дугой переменным током с прямоугольной формой импульсов (2+2) мм**

Известно, что точечную сварку алюминиевых сплавов применяют для сварки разных узлов, конструкций и деталей. Данный технологический процесс подходит для вагоностроения, поэтому, технологический процесс точечной сварки на переменном токе с высокочастотными импульсами будет разработан в соответствии с ГОСТ Р 59849-2021.

Технологический процесс точечной сварки алюминиевых сплавов АМг-6 и АМг-3 толщиной 2+2 мм сжатой дугой.

Подготовка образцов:

– Используется лист сплава алюминия АМг-6 или АМг-3 (рисунок 33), толщиной 2 мм, на листе производят разметку 150 мм на 40 мм, для двух образцов, допускается погрешность  $\pm 3$  мм;



Рисунок 33 – Листы алюминиевого сплава

- Данные размеченные образцы вырезаются гильотиной (рисунок 34).

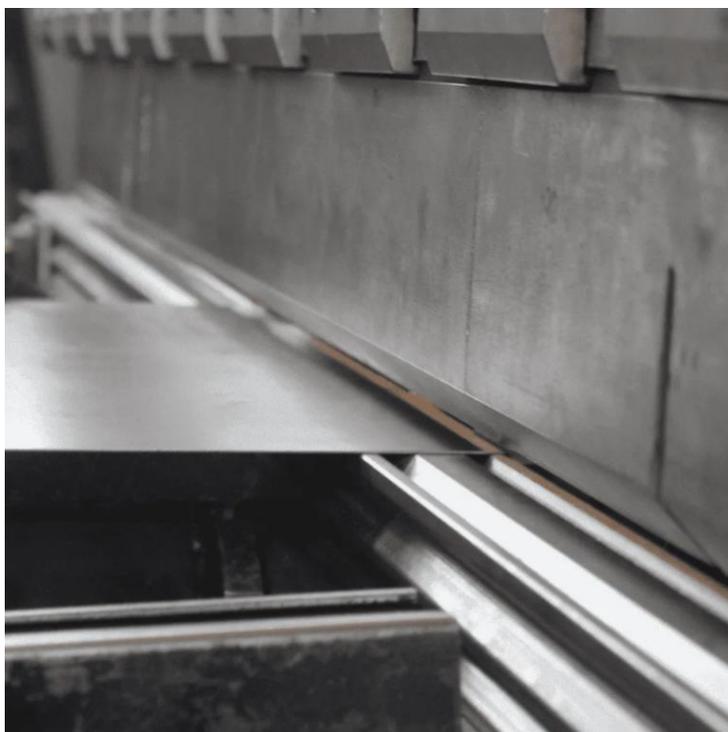


Рисунок 34 – Резка гильотиной

Способ подготовки зоны точечной сварки:

- Подготовка зоны под сварку должна выполняться механической обработкой;
- Последовательность операций при механическом способе очистки:
  - Обезжиривание растворителем (ацетоном, бензином авиационным и др.) свариваемой зоны и прилегающих к ним участков поверхности не менее 40 мм от верхней кромки (рис. 35);



Рисунок 35 – Обезжиривание сварной зоны

- Зачистка свариваемых зоны и участков поверхности шириной 15-25 мм шабером или щеткой из стальной нагартованной проволоки типа 12Х18Н9Т диаметром не более 0,15 мм и длиной незакрепленной части 30-40 мм (рисунок 36). Щетки должны быть чистыми и обезжиренными.



Рисунок 36 – Механическая зачистка зоны сварки

- Механический способ очистки следует производить не ранее, чем за 8 ч до сварки;
- Так же отчистку от оксидной пленки проводится во время сварки на переменном токе с балансом полярностей 60/40 и выше.

Способ сборки:

- Сборку произвести путем нахлесточного наложения пластин друг на друга в горизонтальном положении под ровным углом в  $180^\circ$ , так как отклонение может повлиять на зажигание дуги и образованию сварочной ванны, что в дальнейшем приведет к дефектам;
- Зафиксировать пластины струбциной с приложением силы в 45 кг (рисунок 37);

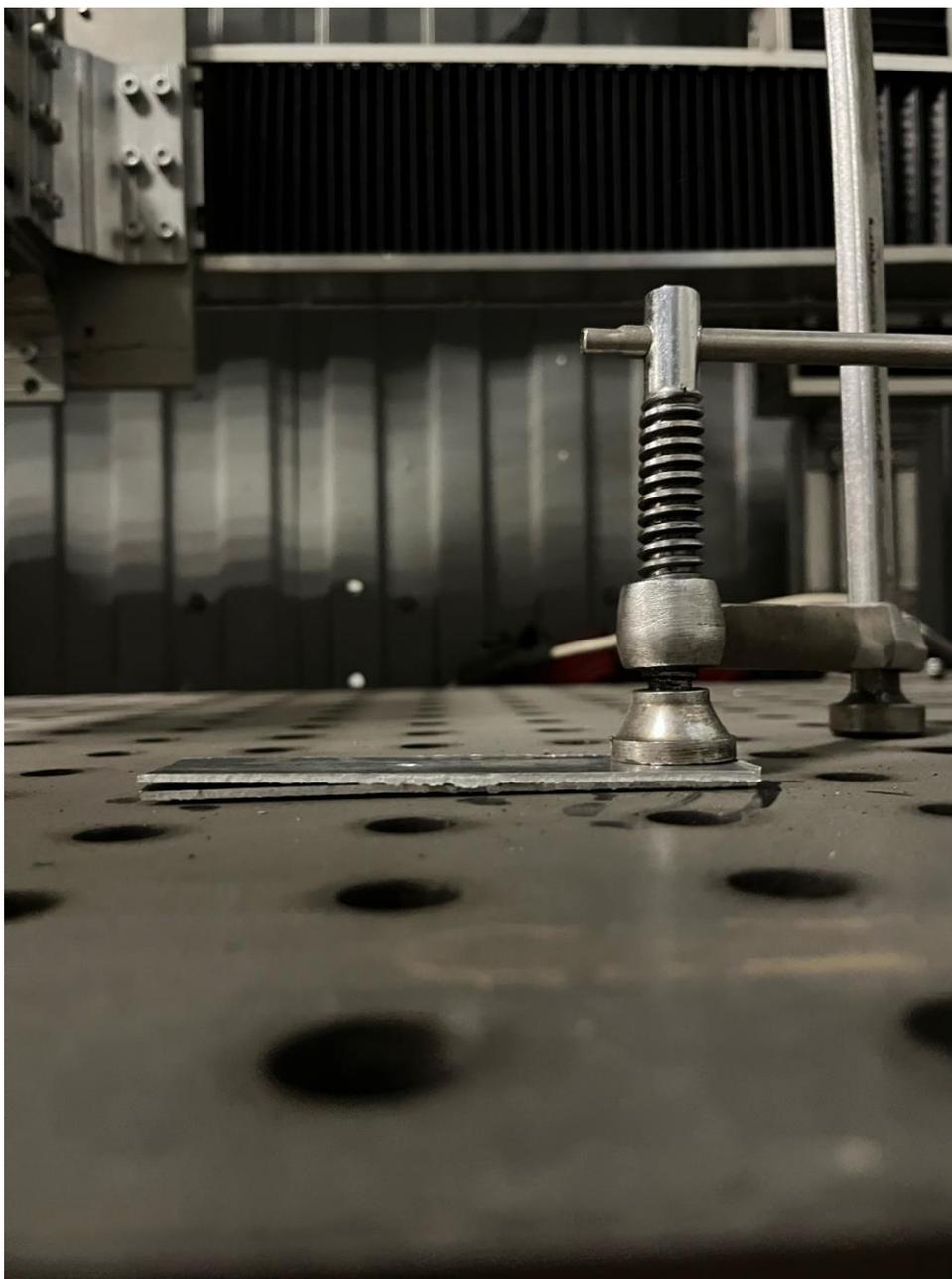


Рисунок 37 – Фиксирование образцов под сварку

Сварочные материалы:

- Вольфрамовый электрод диаметром 3 мм. Схема заточки электрода указана на рисунке 38;

## ЗАТОЧКА ДЛЯ СВАРКИ ТОКОМ ПОСТОЯННЫМ                      переменным



Рисунок 38 – Схема заточки неплавящегося электрода

- В качестве защитного газа применяют аргон высшего и первого сортов по ГОСТ 10157.

Сварочное оборудование:

- Инвертор Вrima TIG 200P AC/AD, с прямоугольной формой тока;
- Плазматрон ГВС-1;
- Сопло с диаметром 3 мм и длиной канала 4 мм.

Подогрев:

- Подогрев не требуется.

Режим сварки:

– Режим точечной сварки сжатой дугой образцов из марки сплава АМг-6 и АМг-3 приведен в таблице 12.

Таблица 12 - Режим точечной сварки сжатой дугой

Марка сплава	Толщина свариваемого металла, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Сварочный ток, А	Расход аргона, л/мин	Баланс полярностей $t_{обр}/t_{пр}$	Время сварки $t$ , сек
АМг-6	2+2	3	100	1	60 / 40	7
АМг-3	2+2	3	120	1	60 / 40	12

Технологические требования к сварке:

- Место сварки должно быть защищено от ветра, сквозняков и атмосферных осадков;
- Перед началом сварки за 5-10 секунд включить подачу защитного газа;
- Сварку следует вести без перерывов;
- После окончания сварки подачу защитного газа выполнить через 5-10 секунд.

Термическая обработка:

- Термическая обработка отсутствует.

Контроль:

- Контроль качества проводится по ГОСТ Р 59849-2021;
- При осмотре сварных соединений могут быть использованы оптические приборы с увеличением необходимой кратности;
- При ограниченности доступности для внешнего осмотра используют зеркала, эндоскопы и другие устройства;

- В ГОСТ Р 59849-2021 п. 8.3.2 таблице 19 приведены требования и объем контроля по неразрушающему контролю.

Изображение сварочных образцов:

- По результатам проведения сварки по режимам из таблицы 10, были получены две точки из сплавов АМг-3 (рисунок 39) и АМг-6 (рисунок 40);



Рисунок 39 – Сварная точка из АМг-3

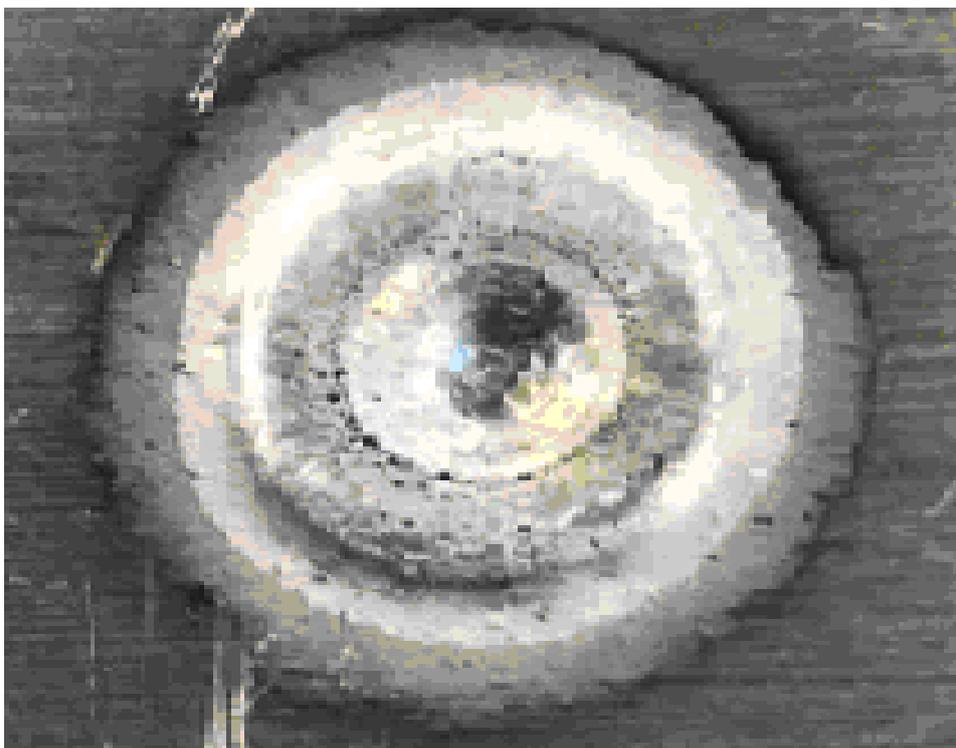


Рисунок 40 – Сварная точка из АМг-6

- По полученным точкам, видно, что зоны отчистки от оксидной пленки присутствуют на обоих образцах;
- На рисунке 40 видно, что была проведена недостаточная зачистка зоны сварки, поэтому присутствуют небольшие включения.

Весь технологический процесс сварки предоставлен в таблице 14.

Таблица 14 - технологический процесс сварки

№ п/п	Операция	Эскиз	Материалы, оборудование, инструменты	Режимы	Технологические требования
1	Разметка образцов		Сплав алюминия Амг-3 или Амг-6 толщиной 2 мм, линейка, маркер	Сделать разметку на листе размером 150мм на 40 мм для двух образцов	Допускается погрешность при разметке $\pm 3$ мм
2	Вырезка образцов		Гильотина METALM ASTER MG-800	Разместить лист на стол гильотины и применить силу 500 Н	Соблюдение мер безопасности
3	Обезжиривание		Ацетон, бензин авиационный, ветошь	Обезжирить место сварки диаметром 35-50 мм	Смочить полотно или ветошь обезжиривающим средством и обработать предлагаемое место сварки от лишних включений

Продолжение таблицы 14

4	Механическая зачистка		Шабером или щеткой	Зачистить место сварки и прилегающую зону щеткой	Провести зачистку образца до металлического блеска
5	Сборка под сварку		Сварочный стол, струбцина	Наложить два образца друг на друга	Зафиксировать струбциной образцы с силой 45 кг
6	Подготовка сварочных материалов	<p style="text-align: center;"><b>ЗАТОЧКА ДЛЯ СВАРКИ ТОКОМ</b>          постоянным                      переменным</p> 	Вольфрамовый электрод – 20, наждачный станок	Провести заточку по схеме	Соблюдение мер безопасности

Продолжение таблицы 14

7	Сварка образца АМг-6			<p><math>I_{св} = 100 \text{ А,}</math>          Баланс          полярностей          60/40, <math>q =</math>  <math>1 \text{ л/мин, } t_{св} =</math>  <math>7 \text{ с}</math></p>	<p>Выставит          ь          значение          тока на          инвертор          е,          выставит          ь расход          защитног          о газа,          замерить          расстоян          ие между          соплом и          образцом,</p>
8	Сварка образца АМг-3		<p>Инвертор          Вгма TIG          200P          AC/DC,          плазмотр          он ГВС-1,          шуп,          защитный          газ</p>	<p><math>I_{св} = 120 \text{ А,}</math>          Баланс          полярностей          60/40, <math>q =</math>  <math>1 \text{ л/мин, } t_{св} =</math>  <math>12 \text{ с}</math></p>	<p>перед          началом          сварки          включить          обдув          защитног          о газа и          засечь          время          сварки</p>
9	Контроль качества		<p>Штангенц          иркуль,          УШС-1,          лупа,          плоскогуб          цы</p>	<p>В ручную</p>	<p>После          сварки          подождат          ь пока          образец          остынет и          произвест          и          визуальн          ый и          измерите          льный          контроль          на          наличие          дефектов          и          зафиксир          овать          геометри          ческие          размеры          сварной          точки</p>

Учитывая требования ГОСТ Р 59849-2021 в таблице 14 описан технологический процесс сварной точки на образцах.

Но данный плазмотрон требует доработки для поступления его в серийное производство, поэтому прилагается технологическое задание с геометрическими параметрами плазмотрона ГВС-1, а также рекомендациями по улучшению конструктивных составляющих, что должны оказать положительное влияние на эффективность процесса точечной сварки, а также на получение более качественной точки.

#### **4.2 Техническое задание для дальнейшего применения плазмотрона ГВС-1**

Данная конструкция плазмотрона требует доработки для применения в серийном производстве.

Геометрические размеры плазмотрона предоставлены в таблице 13.

Таблица 13 – Геометрические размеры плазмотрона

Название элемента	L, мм	d, мм	S <sub>стенки</sub> , мм
Держатель сопла	25	20	10
Корпус	150	20	10
Шайба	45	20	13
Отверстие подачи газа	35	10	5

Рекомендуется заменить тройник на литое изделие в форме трубы, с резьбой под держатель сопла и верхней заглушки. Сам корпус рекомендуется изготавливать из теплоустойчивых сталей, так как температура при сварочном процессе высокая и требуется устойчивость к тепловым нагрузкам.

Крышку, через которую подается защитный газ и фиксатор электрода сделать так же из стали, что и из корпуса плазмотрона для лучшей изоляции. Подачу защитного газа сделать непременно на сопло, а не по всему корпусу плазмотрона. Сделать более точную фиксацию вольфрамового электрода.

Также массу подключить к плазмотрону, а не при помощи крокодила, который крепится напрямую к корпусу.

На рисунке 41 представлено медное сопло с его геометрическими размерами.

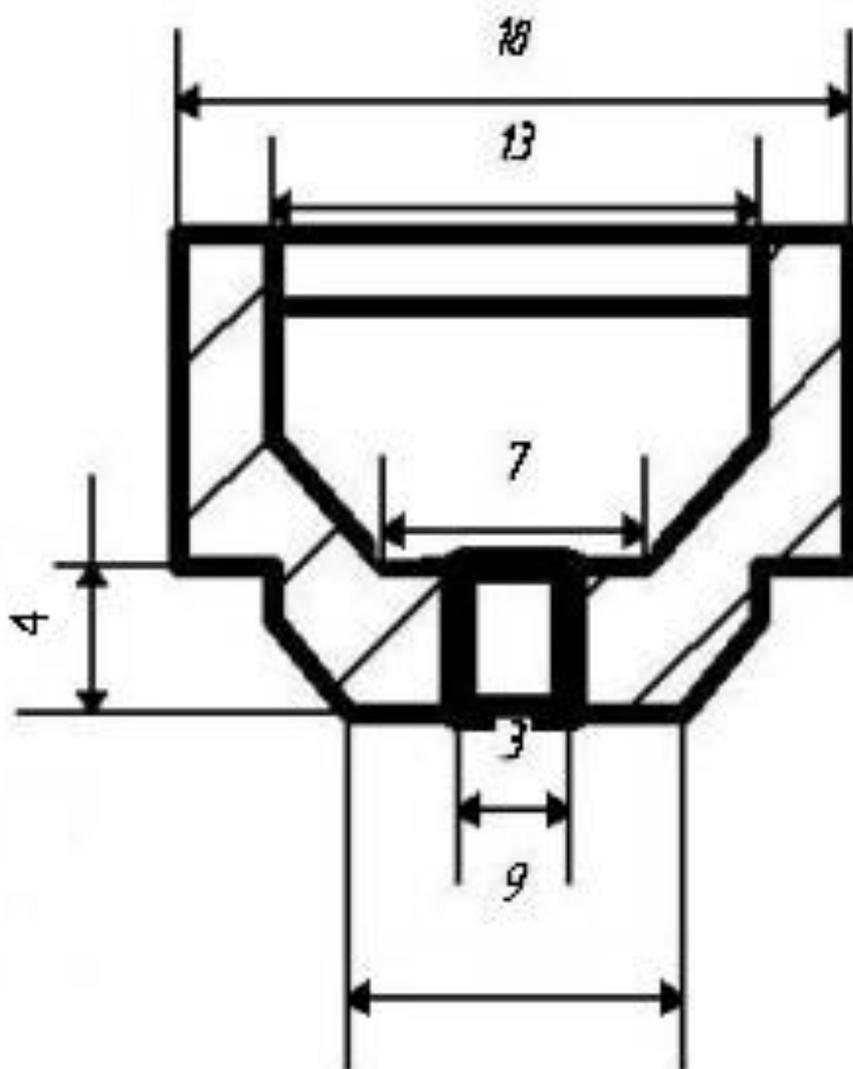


Рисунок 41 - Геометрические параметры сопла

Необходимо соблюдать все геометрические параметры сопла, чтобы процесс сварки происходил в безаварийном режиме, то есть для предотвращения возникновения двойного дугообразования.

Также рекомендуется сделать диаметр сопла 2 мм, для возможности использования электрода диаметром менее 3 мм и получения менее объемной точки, но в связи с этим необходимо будет актуализировать параметры сварки под другой диаметр электрода.

Как правило, сопло изготавливается из меди и его сплавов, что позволяет выдерживать высокие температуры и не изменять геометрические показатели сопла, которые в свою очередь могут повлиять на образование двойной дуги, а также неравномерной подачи защитного газа.

Немаловажную роль в серийном производстве окажет влияние перемещения плазмотрона по необходимым координатам сварочной зоны, что повысит производительность, поэтому необходимо сделать держатель на корпусе плазмотрона, с помощью которого можно будет прикреплять его к оборудованию.

## Заключение

Изучив технологические возможности TIG 200P AC/DC, формирующий переменный ток с прямоугольной формой импульсов, было выявлено, что такая форма тока может влиять на проплавляющую способность дуги, размеры зоны катодной очистки от оксидной пленки в зависимости от баланса полярностей, величину эффективной мощности прямой и обратной полярности, стабильность горения дуги за счет скорости перехода через нуль по сравнению с синусоидальной формой тока.

Выявлено оптимальное значение длительности прямой и обратной полярности для сварки алюминиевых сплавов АМг-3 и АМг-6 (2+2) мм.

Исследовано влияние параметров серийного плазмотрона ГСД-1 для сварки сжатой дугой на формирование сварной точки.

Исследовано влияние параметров серийного плазмотрона ГСД-1 на формирование сварной точки.

Установлено, что наибольшее влияние на геометрические характеристики точки оказывает сила сварочного тока и время сварки, но основной проблемой на стационарном оборудовании стало возникновение двойной дуги, поэтому был спроектирован и изготовлен новый плазмотрон с различным комплектом сопел с различными характеристиками для выявления влияния неэлектрических параметров на формирование сварной точки и стабилизации процесса сварки.

Разработана методика проведения исследования на новом плазмотроне ГВС-1 и проведена серия экспериментов на разной длине открытой составляющей дуги и длине канала сопла. Определен диапазон параметров для данного плазмотрона и установлены оптимальные неэлектрические параметры для формирования качественной сварной точки. Поэтому спроектированный плазмотрон ГВС-1 при работе с современным оборудованием обеспечивает стабильное горение сжатой дуги.

Разработан технологический процесс сварки сжатой дугой переменного тока с прямоугольными импульсами с описанием проведения операций для алюминиевых сплавов АМг-3 и АМг-6. Но так как плазмотрон является экспериментальным образцом было написано техническое задание для выпуска данного плазмотрона в его серийное производство, где указаны геометрические размеры самого плазмотрона ГВС-1, геометрические размеры сопел под данную конструкцию и рекомендации по модернизации конструктивных частей плазмотрона.

Все поставленные задачи в данной выпускной квалификационной работе были решены и предложен вариант технологического процесса с использованием новой конструкции плазмотрона ГВС-1 в серийное производство.

## Список используемой литературы

1. В.С. Гвоздецкий – 80..... // Автоматическая сварка. – 2010. – № 9. – С. 62.
2. Ваничкин Н.Е. Плазменная сварка алюминиевых сплавов разнополярными импульсами от источника питания свободной дугой / Выпускная квалификационная работа: Тольятти, 1922. – 60с.
3. Вербицкий В. Г. и др. Горелка для сварки сжатой дугой. – М. – Изд-во НИАТ, 1967.
4. Влияние параметров режима на пространственную устойчивость дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона / А.С. Киселев, А.С. Гордынец // Вестник науки Сибири. 2013. №4
5. Влияние рода тока и полярности на формирование шва при сварке под флюсом Петр Павлович Гвоздев, Антон Александрович Линник
6. Влияние формы кривой переменного тока на тепловые характеристики дуги и геометрические размеры шва / Г.М. Короткова, Р.А. Цепенев // «Сварочное производство», 1973. - №2. – с.....
7. ГОСТ Р 59849-2021 «Соединения сварные конструкции кузовов железнодорожного подвижного состава из алюминиевых сплавов»
8. Гринюк А. А. и др. Гибридные технологии сварки алюминиевых сплавов на основе дуги с плавящимся электродом и сжатой дуги //Автоматическая сварка. – 2016.
9. Гринюк А. А. и др. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов //Автоматическая сварка. – 2015. – №. 11. – С. 39– 50.
10. Коржик В. Н. и др. Особенности формирования швов при гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов //American Scientific Journal. – 2016. – №. 5. – С. 36-43.
11. Кузнецов Д.С. Исследование параметров процесса сварки из алюминиевых сплавов однофазной сжатой дугой точками // Выпускная

квалификационная работа бакалавра: Тольятти 2019 – 48с.  
<http://hdl.handle.net/123456789/9911>.

12. Моторин К.В., Сидоров В.П., Короткова Г.М., Забияка И.С., Троицкий В.А. ГОРЕЛКА ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ. – 2013.

13. Неровный В.М. Плазменная сварка Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана. Москва: 2004г. – С. 34 – 36 5

14. Наплавка покрытыми электродами дугой, питаемой разнополярными импульсами тока. В.П.Сидоров, Д.Э. Советкин. – С. 7 – 11.

15. Овчинников В. В. и др. Современные тенденции развития технологии плазменной сварки алюминиевых сплавов //Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – №. 3. – С. 10-23.

16. Пащенко Т. Ю. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ //Студентський вісник ДДМА: тематичний збірник наукових праць.–Краматорськ: ДДМА, 2009.–266 с. – 2009. – С. 42.

17. Сварка особо тонкостенных труб / [Д.А. Дудко, В.Г. Вербицкий, Б.И. Шнайдер и др.]; Под ред. Д.А. Дудко. – Москва: Машиностроение, 1977. - 128 с

18. Сварка сжатой дугой на переменном токе / Дудко Д.А., Лакиза С.П., Виноградский Ф.М., Корниенко А.Н. // Автомат. сварка. – 1966. – № 7. – С. 47–49.

19. 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. 6

20. Сидоров В. П. и др. Влияние способов подачи плазмообразующего газа на пятно нагрева при сварке сжатой дугой //Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – №. 3. – С. 97-101.

21. Сидоров В.П., Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Советкин Д.Э. Эффективная мощность сварочной дуги обратной полярности при наплавке

алюминия плавящимся электродом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 020. № 4. - С. 34–42.

22. Сидоров В. П., Советкин Д. Э., Короткова Г. М. О допустимых токах на вольфрамовый электрод дуги с разнополярными импульсами тока // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. –2020 – Т. 22 – №. 4 DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.01

23. Сидоров В.П., Советкин Д.Э., Мельзитдинова А.В. Эффективная мощность дуги прямой полярности с неплавящимся электродом // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, 2020. - №2. – С. 5 – 6.

24. Сидоров, В.П. Расчетно-экспериментальное определение провара точки, наплавленной неподвижной дугой / В.П. Сидоров, А.В. Мельзитдинова // Вектор науки ТГУ. – 2018 – № 4 (46). – С. 40–46.

25. Щицын Ю. Д., Косолапов О. А., Струков Н. Н. Распределение энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2010. – №. 3. – С. 13-16.

26. A. Sahoo, S. Tripathy, Development in plasma arc welding process: A review, Materials Today: Proceedings, Volume 41, Part 2, 2021, Pages 363-368, ISSN 2214-7853.

27. Huang J. et al. Process of welding-brazing and interface analysis of lap joint Ti-6Al-4V and aluminum by plasma arc welding // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Т. 61. – С. 396-407.

28. Klett J. et al. Plasma welding of aluminum in an oxygen-free argon atmosphere // Advances in Materials Science. – 2023. – Т. 23. – №. 1. – С. 5-18.

29. Lathi K., Jenström P. Plasma Welding Aluminium // Svetsaren. – 1999. – № 3. – P. 26–28.

30. Shchitsyn, Y. D., Shchitsyn, V. Y., Herold, H., & Weinhart, W. (2003). Plasma welding of aluminium alloys. Welding International, 17(10), 825–832.

31. Xiaoqing Jiang, Shujun Chen & Jinlong Gong. (2018) Effect of non-axisymmetric arc on microstructure, texture and properties of variable polarity plasma arc welded 5A06 Al alloy. *Materials Characterization* 139, pages 70-80.

32. Yang T., Xiong J., Chen H. Effect of process parameters on tensile strength in plasma-MIG hybrid welding for 2219 aluminum alloy //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – T. 84. – C. 2413-2421.

33. Zhaoyang Yan, Shujun Chen, Fan Jiang, Wang Zhang & Ning Huang. (2019) Study and optimization against the gravity effect on mechanical property of VPPA horizontal welding of aluminum alloys. *Journal of Manufacturing Processes* 46, pages 109-117.