

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

(код и наименование направления подготовки, специальности)

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

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему: «Разработка плазмотрона для плазменной сварки алюминиевых сплавов
дугой разнополярными прямоугольными импульсами тока»

Обучающийся

А.А. Ларчина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Старший преподаватель Д.Э. Советкин

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

Тольятти 2023

Аннотация

Из дуговых способов сварки плазменная сварка является самым эффективным способом сварки, однако, данный способ применяется в основном на больших предприятиях, так как является слишком дорогостоящим для бытового или индивидуального применения. Стоимость оборудования обуславливается тем, что конструкции большинства плазмотронов сложны и содержат в себе большое количество разнообразных деталей.

Целью работы является снижение себестоимости изготовления плазмотрона за счёт упрощения конструкции.

В работе решены задачи:

1. Разработана схема и устройство плазмотрона для плазменной сварки на РПИ;
2. Оценена работоспособность разработанного плазмотрона;
3. Произведена оценка экономической эффективности разработанного плазмотрона.

При выполнении экологического раздела выполнен анализ предлагаемых технологических решений на безопасность труда, пожарной безопасности.

Экономические расчёты подтвердили эффективность и выгоду проектного плазмотрона.

Annotation

Of the arc welding methods, plasma welding is the most effective welding method, however, this method is mainly used in large enterprises, as it is too expensive for domestic or individual use. The cost of the equipment is due to the fact that the designs of most plasma torches are complex in the device and have a large number of various parts.

The aim of the work is to reduce the cost of the plasma torch design by simplifying the design.

The work has solved the following tasks:

1. The scheme and device of the plasma torch for plasma welding of naRPI have been developed;
2. The efficiency of the developed plasma torch is evaluated;
3. The economic efficiency of the developed plasma torch has been evaluated.

When performing the environmental section, the analysis of the proposed technological solutions for occupational safety and fire safety was carried out.

Economic calculations have confirmed the effectiveness and benefits of the design plasma torch.

Содержание

Введение.....	5
1 Современное состояние плазменной сварки алюминиевых конструкций .	7
1.1 Описание особенностей применения плазменной сварки.....	7
1.2 Анализ конструкций плазмотронов	8
1.3 Особенности конструкций плазмотронов постоянного и переменного токов	18
1.4 Особенности проектирования плазмотронов.....	25
1.5 Формулировка задач ВКР	27
2 Методика исследования	28
2.1 Описание и анализ известной конструкции плазмотрона	28
2.2 Проектная конструкция плазмотрона.....	30
2.3 Оценка работоспособности проектного варианта плазмотрона	33
2.4 Выводы по разделу	36
3 Безопасность и экологичность объекта исследования.....	38
3.1 Анализ вредных и производственных факторов	38
3.2 Уменьшение влияния опасных факторов	39
4 Экономическая эффективность	42
4.1 Экономическая оценка стоимости разработанной конструкции плазмотрона	42
4.2 Анализ затрат на проведение экспериментов	42
4.3 Заключение по экономическому разделу	47
Заключение	49
Список используемой литературы и используемых источников	50

Введение

В последние десятилетия наблюдается темп роста производства алюминиевой промышленности. Данная тенденция обусловлена тем, что повышается спрос на алюминий и алюминиевые сплавы, которые находят своё применение в различных сферах деятельности: машиностроение, авиастроение, судостроение, при строительстве различных конструкций, в приборах и т.п. [20].

Неотъемлемой частью машиностроения является сварочное производство. Производство большинства конструкций, деталей и изделий невозможно без сварочных технологических процессов. Для получения качественного сварного соединения, которое будет соответствовать стандартам качества и эффективности процесса существуют разные способы сварки. Наиболее распространенные способы сварки алюминиевых сплавов: механизированная сварка плавящимся электродом, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом [3]. Следует отметить, что у данных способов при сварке алюминиевых сплавов существует целый ряд недостатков: низкая производительность процесса при сварке большой толщины; потеря прочности металла в области сварного соединения; высокая текучесть алюминия затрудняет сварочный процесс вне горизонтального положения; завышенные требования при подготовки к сварочному процессу усложняют технологию сварки. Однако, среди наиболее распространенных способов сварки алюминиевых сплавов существует ещё плазменная сварка – сварка сжатой дугой.

Плазменная сварка нашла своё применение практически во всех сферах промышленности, таких как, машиностроение, авиастроение, приборостроение. Используется для сварки алюминия и его сплавов, вольфрама, всех типов стали, меди, молибдена, никеля, чугуна, магния, титана и т.п.

Плазменная сварка – дуговой способ сварки плавлением, появившейся в середине прошлого столетия; позволяет делать сварные соединения, которые

менее подвержены трещинообразованию и короблению; отличается глубоким проплавлением металла. Для плазменной сварки используют специальную сварочную горелку, которая носит название – плазмотрон. Большинство конструкций плазмотронов работает на постоянном токе прямой полярности, что воспрепятствует сварки алюминиевых сплавов из-за оксидной плёнки на поверхности сплава.

Плазменная сварка является наиболее эффективным процессом из дуговых способов сварки, однако, существует ряд проблем, которые сдерживают применение и развитие данного способа сварки. Данный способ сварки чаще всего применяется в промышленных масштабах на больших предприятиях, так как для бытового или индивидуального применения данный способ является слишком дорогостоящим. Конструкции большинства плазмотронов сложные, состоят из большого количества деталей, которые увеличивают не только габариты конструкции, но и её стоимость.

Повышение производительности и эффективности дуговых процессов сварки для алюминиевых сплавов, остается на данный момент актуальным.

Целью работы является снижение себестоимости конструкции плазмотрона для плазменной сварки алюминиевых сплавов сжатой дугой питаемой от разнополярных прямоугольных импульсов тока, путем упрощения конструкции плазмотрона.

1 Современное состояние плазменной сварки алюминиевых конструкций

1.1 Описание особенностей применения плазменной сварки

Первые сварочные плазмотроны были разработаны на базе горелок для аргонодуговой сварки. Основное отличие их заключалось в применении металлического сопла, сжимающего сварочного дугу, как правило охлаждаемого водой, при этом чтобы электрическая дуга не горела с металлического сопла потребовалась керамическая развязка сопла с электродом. Проходящий под давлением между стенками камеры сжимающего сопла и столбом дуги газ охлаждал и сжимал столб, а также обеспечивал его тепловую и электрическую изоляцию от стенок сопла.

«Оценивая возможности и преимущества современного плазменного оборудования в сравнении с другими устройствами и технологиями, использующими способы высокоэнергетического воздействия на материалы, можно отметить следующие положительные стороны осуществляемого с их применением процесса:

- пространственная устойчивость дуги;
- высокие скорости сварки;
- широкий диапазон толщин свариваемого металла;
- малая зона термического влияния;
- большая производительность и низкая стоимость процесса в пересчете на метр» [1].

Современные плазмотроны способны работать с разным термическим коэффициентом полезного действия, преобразовывая электрическую энергию в тепловую и кинетическую, тем самым создавая термокинетическое воздействие на материалы, придавая им различную структуру и свойства [2]. На рисунке 1 представлен вид сжатой дуги в процессе сварки, показывающий высокую пространственную устойчивость дуги.

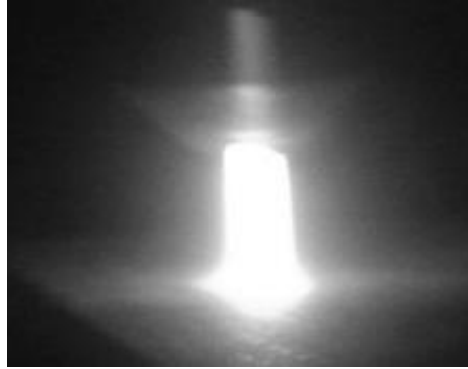
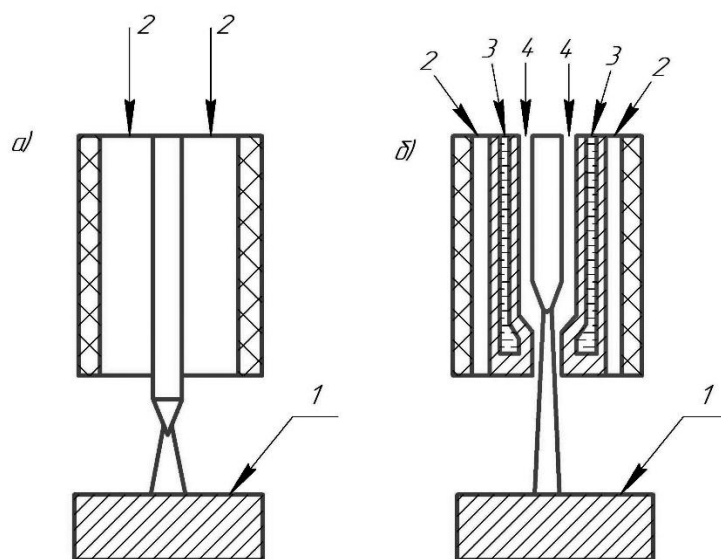


Рисунок 1 – Вид сжатой дуги в процессе плазменной сварки

Плазменная сварка способна сваривать большинство известных металлов и их сплавов, среди них: титан, титановые сплавы, алюминий, алюминиевые сплавы, медь, медные сплавы, сплавы никеля, чугун, нержавеющие стали. Плазменная сварка с каждым годом находит всё большее применение в самых разных областях промышленности, таких как судостроение, вагоностроение, авиастроение, а также при прокладке трубопроводов и магистралей. Стоит отметить, что в настоящее время плазменные технологии применяются для резки, сварки металлов и напыления, наплавки на слоях с особыми свойствами.

1.2 Анализ конструкций плазмотронов

«Первые плазменные горелки были созданы на базе аргонодуговых (рисунок 2, а) и отличались от них тем, что неплавящийся вольфрамовый электрод и часть столба дуги помещались в водоохлаждаемую металлическую камеру. Камера оканчивалась цилиндрическим отверстием (соплом), расположенным соосно с электродом (рисунок 2, б). Плазмообразующий газ, проходя через сопло, пространственно стабилизировал (обжимал) столб дуги, а также обеспечивал его тепловую и электрическую изоляцию от стенок сопла. Часть газа проходила через дугу, ионизировалась и превращалась в плазму» [11].



а – аргонодуговая горелка; б – плазменная горелка; 1 – обрабатываемое изделие;
 2 – защитный газ; 3 – вода; 4 – плазмообразующий газ

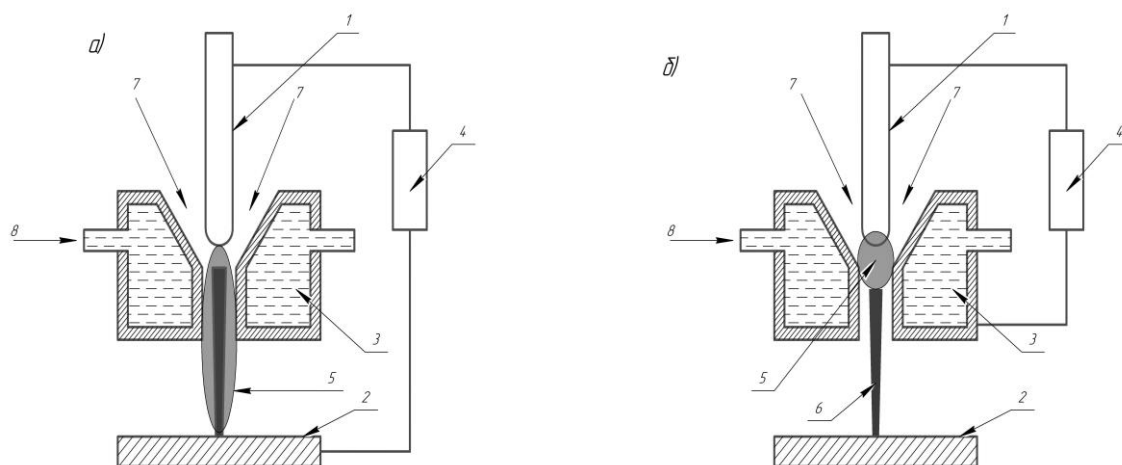
Рисунок 2 – Сварочные горелки

Дальнейшее развитие техники позволило создавать конструкции плазмотронов под различные цели и задачи, в настоящее время классификация плазмотронов делит их по виду дуги, по системе охлаждения, по стабилизации дуги, по виду электрода, по плазмообразующей среде, роду и форме тока.

По виду дуги плазмотроны делятся на два типа: на плазмотроны прямого и косвенного действия (рисунок 3).

Процесс возбуждения дуги прямого действия происходит с появления дуги косвенного действия между соплом и электродом, которая выдувается потоком плазмы образуя основную сжатую дугу. Сопло является электрически нейтральным по отношению к катодному (электродному) узлу и выполняет роль сжатия и стабилизации дуги. По форме сварочная дуга плазмотрона прямого действия похожа на цилиндр, который немного расширяется у поверхности обрабатываемого изделия. «Сжатие столба дуги происходит следующим образом: рабочий газ, проходящий через столб дуги,

нагревается, ионизируется и выходит из сопла плазмотрона в виде плазменной струи» [4]. К преимуществам относятся высокие КПД и тепловая мощность.



1 – электрод; 2 – обрабатываемое изделие; 3 – водоохлаждаемый корпус;
4 – источник постоянного напряжения; 5 – дуговой разряд; 6 – плазменная струя;
7 – подача газа; 8 – вода

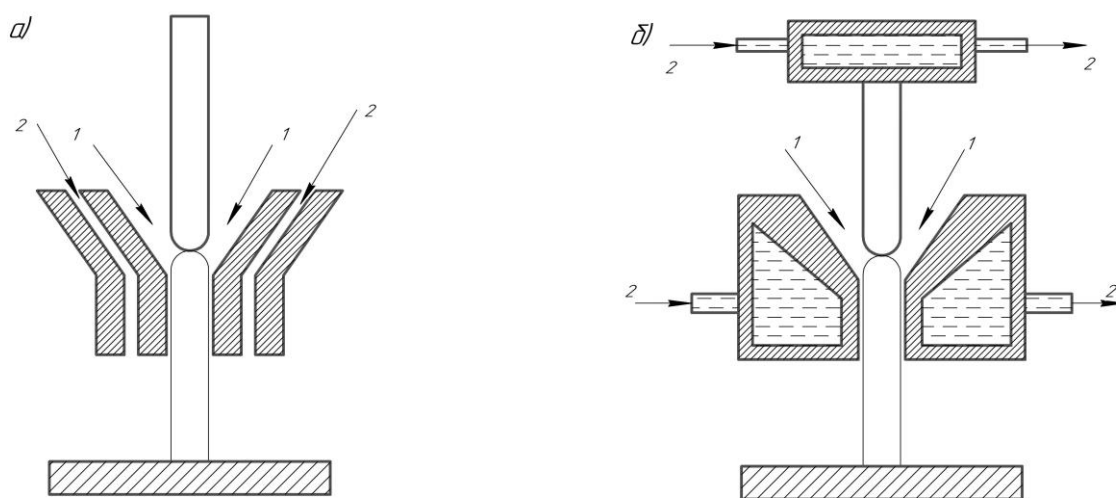
Рисунок 3 – Схема плазмотрона прямого (а) и косвенного (б) действия

Возбуждение дуги в плазмотронах косвенного действия происходит между стержневым электродом и сжимающим соплом. Сопло при этом является анодом, подключенным к источнику питания. В плазмотронах косвенного действия дуга косвенного действия постоянно горит на сопло, а плазмообразующий газ, протекающий через цилиндрическую часть канала плазмотрона пронизывая дугу косвенного действия, разогревается и направляется на изделие. Недостатком дуги косвенного действия является низкий КПД, она уступает в этом плазмотрону с дугой прямого действия. Пример конструкции плазмотрона косвенного действия можно увидеть в работе [13].

Плазмотроны прямого действия предпочтительно использовать для сварки, резки и наплавки, однако для таких операций как нагрев и напыление больше подходят плазмотроны косвенного действия. Слой газа, который обволакивает столб дуги снаружи, остается холодным, образуя тепловую

и электрическую изоляцию между плазменной дугой и каналом сопла. Плотность тока дуги в плазмотронах достигает 100 А/мм^2 , а температура примерно $15000\text{-}30000 \text{ }^\circ\text{С}$.

По системе охлаждения плазмотроны делятся на систему с воздушным охлаждением и водяным охлаждением (рисунок 4). Система охлаждения выполняет важную роль – защищает электрод и сопло от плавления, так как сварочная дуга имеет высокую температуру. «Система охлаждения, включающая рубашки охлаждения теплонапряженных элементов конструкции, каналы для организации потока охлаждающей среды, уплотнения, присоединительные элементы к внешней системе отвода тепла» [10]. Однако, системы охлаждения не всегда может быть достаточно ввиду различных причин, например, при сварке на прямой и обратной полярности тепловложение в плазмотрон и электрод будут существенно отличаться.



а – воздушное охлаждение; б – водяное охлаждение; 1 – электрод; 2 – сварочная дуга; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – подача плазмообразующего газа; 5 – подача защитного газа; 5 – подача воды

Рисунок 4 – Схема плазмотрона по системе охлаждения

В плазмотронах с системой воздушного охлаждения электрод и сопло охлаждает защитный и плазмообразующий газ, который подается по различным каналам. Обычно такие конструкции просты, но имеют

существенный недостаток – низкую теплоемкость воздуха (газов). Важную роль в системе воздушного охлаждения имеют межэлектродные вставки, этот фактор детально описан в работе [21] и должен быть учтен при проектировании плазмотронов.

В плазмотронах с системой водяного охлаждения электрод и сопло охлаждает вода, подводимая к поверхностям по системе каналов с замкнутым контуром. Теплоемкость воды в сравнение с воздухом намного выше, благодаря этому электрод и сопло способны работать при повышенных тепловых нагрузках, в следствие чего увеличивается производительность всего процесса сварки. Огромную роль в охлаждении играет чистота воды, чем чище вода, тем эффективнее будет процесс охлаждения. Главным недостатком водяного охлаждения является сложность как отдельных узлов конструкции, так и всей конструкции в целом, а значит это значительно удорожает её.

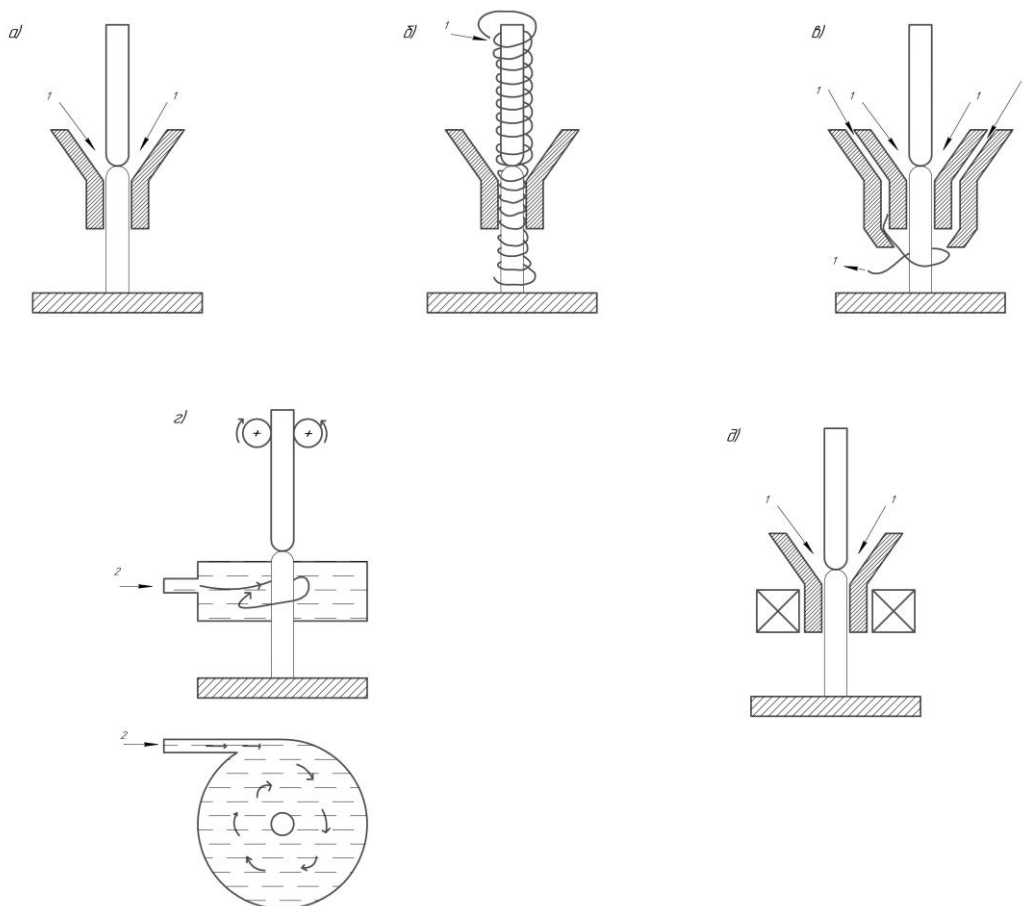
Стоит отметить, что для более эффективного охлаждения применяется конструкция плазмотрона с комбинированным охлаждением, что позволяет повысить КПД плазмотрона примерно на 70%. Плазмотрон с комбинированной системой охлаждения [21] имеет существенный недостаток – сложность конструкции, что приводит к высокой себестоимости изготовления.

Классификация плазмотронов по способу стабилизации дуги делится на три типа: первый – это газовый тип, в этот тип сходят аксиальная одинарная, вихревая и двойная; второй – водяная; третий – магнитная (рисунок 5).

Качество сварных швов напрямую зависит от способа стабилизации сжатой дуги, так как данная система позволяет обеспечивать сжатие столба дуги и точно фиксировать его по оси сопла плазмотрона.

При газовой стабилизации дуги холодный поток плазмообразующего газа омывает столб дуги, тем самым охлаждает и сжимает его. Аксиальная одинарная стабилизация дуги обеспечивает стационарное течение, то есть слои газа не перемешиваются и скользят относительно друг друга. Двойная стабилизация дуги работает по принципу аксиальной, разница лишь в том, что

подача газа ведется по двум каналам (рисунок 5). При вихревой стабилизации дуги плазмообразующий газ закручивается вихрем и образует столб вихря от электрода до обрабатываемого изделия, благодаря этому удастся достичь наибольшего обжатия дуги. Главным преимуществом является простота конструкции. В работе [22] наглядно отображено влияние подачи плазмообразующего газа на процесс сварки, что следует учитывать при проектировании плазмотрона.



а – аксиальная одинарная; б – вихревая; в – двойная; г – водяная; д – магнитная;
 1 – электрод; 2 – сварочная дуга; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – подача
 плазмообразующего газа; 5 – подача воды

Рисунок 5 – Схема плазмотрона по стабилизации дуги

При водяной стабилизации дуги достигается самая высокая степень сжатия, но пары воды находятся рядом с электродной (катодной) областью, в следствие чего электроды быстро сгорают. В конструкции чаще всего

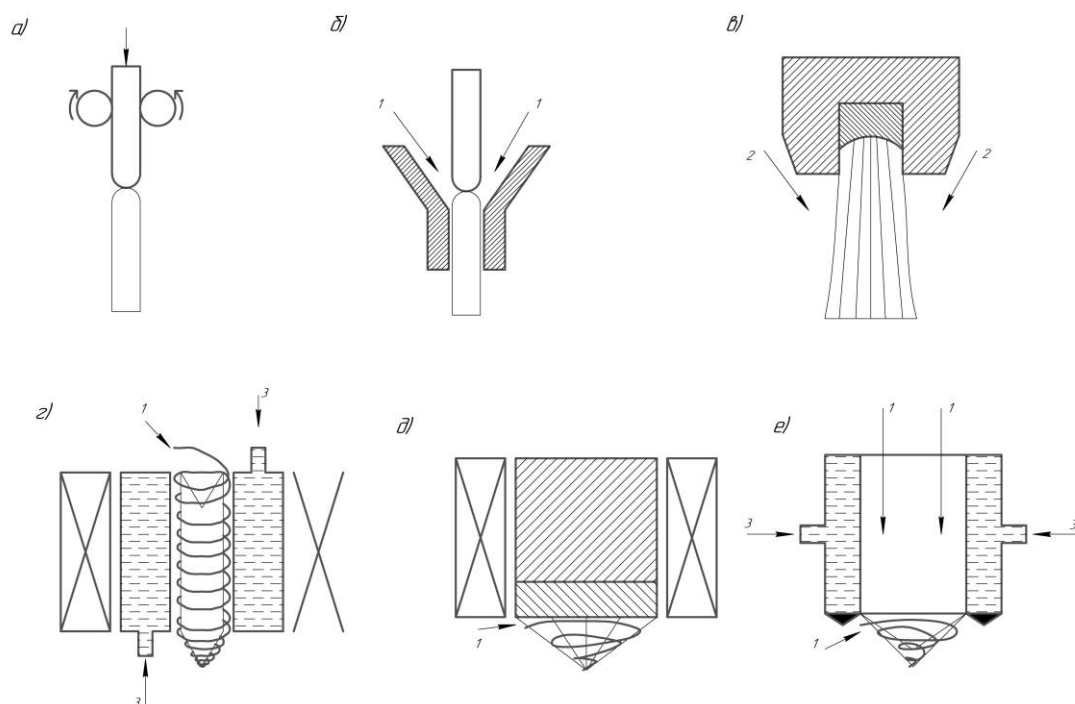
используются графитовые электроды, вместо привычных вольфрамовых. Недостатком данной конструкции является её сложность. Плазмотроны с водяной стабилизацией дуги чаще всего используются для резки металла, в работе [14] можно увидеть пример конструкции данного плазмотрона.

«Назначение магнитных систем – принудительное, с помощью электромагнитной силы, перемещение разряда – в плазмотронах с магнитной стабилизацией разряда, или приэлектродных участков – для магнитной фиксации положения привязки в плазмотронах с газовой стабилизацией» [10]. При магнитной стабилизации дуги создается продольное магнитное поле, которое сжимает столб дуги. В конструкции плазмотрона используется соленоид, из-за которого усложняется не только сама конструкция, но и добавляет ей габариты. Главное преимущество плазмотрона с магнитной стабилизацией дуги – это регулировка степени сжатия столба, не зависимо от расхода рабочего газа. Плазмотроны с магнитной стабилизацией дуги чаще всего применяются для резки, пример такого плазмотрона представлен в работе [15].

По виду электрода – катода плазмотроны делятся на два типа: первый тип – это плазмотроны со стержневым катодом и плазмотроны с распределенным катодом (рисунок 6). Плазмотроны со стержневым катодом бывают: расходуемые, газозащищенные (стержневые) и плёнкозащитные. Плазмотроны с распределенным катодом – полые, дисковые и кольцевые. Стоит отметить, что в плазмотронах со стержневым электродом катодное пятно концентрируется на торце электрода, а в плазмотронах с распределенным катодом катодное пятно перемещается по развитой поверхности электрода при помощи магнитного или газовихревого вращения.

В плазмотронах с расходуемым электродом обычно используется графитовый электрод, часто используется вместе с водяной стабилизацией дуги. Несмотря на то, что графитовый электрод плавится при высоких температурах – имеет повышенный расход из-за того, что происходит процесс сублимации (переход из твёрдого состояния сразу в парообразное, минуя

стадию плавления и кипения). В работе [12] наглядно показана стойкость графитовых электродов при разной электрической мощности, что следует учитывать при проектировании плазмотронов. Пример расходуемого электрода можно увидеть в работе [16].



а – расходуемый; б – газозащитный (стержневой); в – плёнкозащитный;
 г – полый; д – дисковый; е – кольцевой; 1 – подача плазмообразующего газа;
 2 – подача воздуха; 3 – подача воды

Рисунок 6 – Схема плазмотрона по виду электрода – катода

В плазмотроне с газозащитный электродом используют вольфрамовый электрод, который работает в инертной среде. «Газозащитный вольфрамовый электрод – самый распространенный из всех видов электродов» [1]. Главное преимущество вольфрамового электрода состоит в том, что он имеет высокие показатели прочности, теплопроводности и электропроводности.

В конструкции плазмотронов с плёнкозащитным электродом используют стержень из циркония или гафния, запрессованного в медную обойму, чтобы достичь высокой стойкости электродов работа ведется в восстановительной среде. Электроды из циркония и гафния обладают высокой

термостойкостью благодаря прочной тугоплавкой плёнке из оксидов и нитридов, которая защищает чистый металл от испарения. В основном активная вставка электрода расходуется при зажигании дуги, из-за чего плёнка разрушается вследствие быстрого нагрева. Плотность тока при использовании электрода из циркония может достигать 80-100 А/мм². Недостатком данной конструкции является её сложность.

В конструкции плазмотронов с распределенным током, а именно: в полом, дисковом и кольцевом используется окислительная среда, преимущество данных конструкций состоит в том, что они работают на токах большей мощности от 1000А. «Недостатками распределенных катодов являются сложность их конструкции, трудность равномерного перемещения катодного пятна по всей поверхности электрода, низкая стабильность горения дуги, возрастание напряжения прикатодной области дуги и связанное с этим увеличение потерь мощности в электроде» [25].

По плазмообразующей среде плазмотроны делятся на три группы: инертная – аргон и гелий; восстановительная – водород, азот, углеводород и аммиак; окислительная – кислород, углекислый газ, вода и смесь водорода с кислородом (рисунок 7).

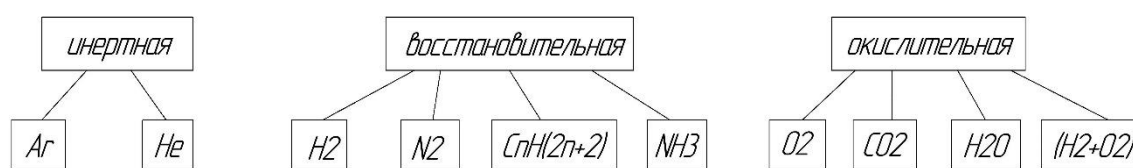
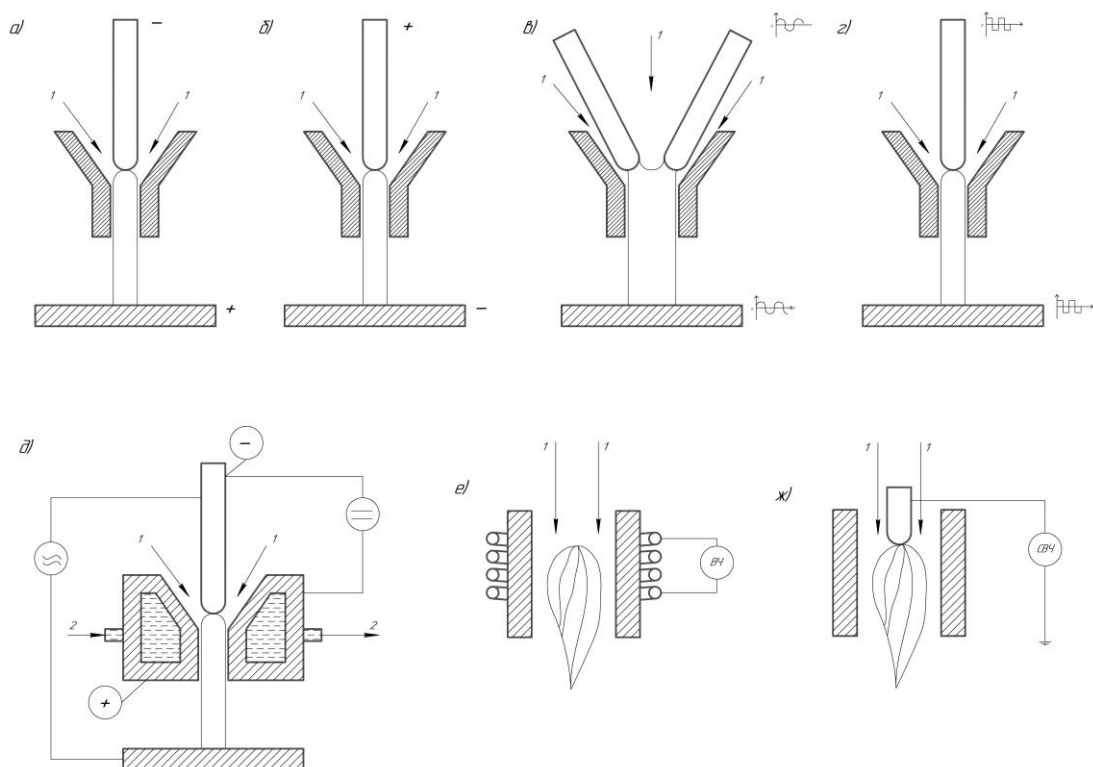


Рисунок 7 – Схема классификации плазмотронов по плазмообразующей среде

От выбора плазмообразующих веществ зависит технологический процесс и конструкция плазмотрона. «В качестве рабочих веществ в плазмотронах чаще всего используют: инертные газы – аргон, гелий; малоактивные восстановительные газы – азот, водород, углеводороды, аммиак; окислительные среды – воздух, кислород, водяной пар» [10].

По роду тока плазмотроны бывают: постоянного тока, переменного тока, комбинированные и высокочастотные (рисунок 8).



а – постоянный ток прямой полярности; б – постоянный ток обратной полярности;

в – переменный ток синусоидальной формы; г – переменный РПИ;

д – комбинированный ток; е – высокочастотный ток; ж -сверхвысокочастотный;

1 – подача плазмообразующего газа; 2 – подача воды

Рисунок 8 – Схема плазмотрона по роду тока

Плазмотроны постоянного тока делятся на две группы – прямой полярности и обратной полярности. Большая часть плазмотронов работает на прямой полярности, дело в том, что на катоде электрода выделяется меньшее количество тепла, чем на аноде электрода.

Плазмотроны по роду тока делятся на переменного тока и постоянного тока. Плазмотроны переменного тока делятся на две группы по форме тока– с синусоидальной формой тока и прямоугольной формой тока, плазмотроны постоянно тока делятся на две группы: прямой полярности и обратной полярности.

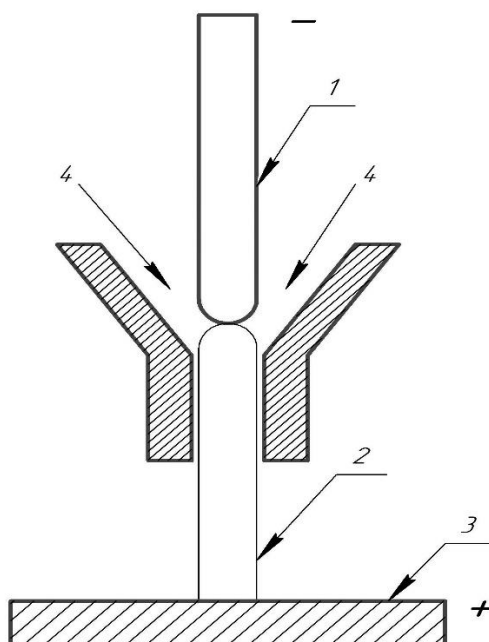
Стоит отметить, что для повышения стабильности дуги плазмотроны могут быть комбинированными, пример такого плазмотрона представлен в работе [18].

Высокочастотные и сверхвысокочастотные плазмотроны нашли своё применение в металлургической и химической отрасли, работают на токах промышленной частоты. Основным преимуществом конструкции является её надёжность и возможность работать в течение пары месяцев без замены расходных материалов.

1.3 Особенности конструкций плазмотронов постоянного и переменного токов

1.3.1 Плазмотроны постоянного тока на прямой полярности

Большинство плазмотронов работает на постоянном токе прямой полярности, анод «-» стоит на электроде, а катод «+» на обрабатываемом изделии (рисунок 9).



1 – электрод; 2 – сварочная дуга; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – подача газа

Рисунок 9 – Схема плазмотрона на постоянном токе прямой полярности

Преимуществом сварки на постоянном токе прямой полярности является пониженное тепловое воздействие на электрод, следовательно повышается стойкость электрода в процессе сварки. При повышении токовых нагрузок на прямой полярности увеличивается эффективность процесса сварки, а значит происходит более глубокое проплавление металла. Повышенное тепловое воздействие направлено на обрабатываемое изделие, а значит плазмотрон менее загружен и не требует столь активного охлаждения, что приводит к упрощению его конструкции.

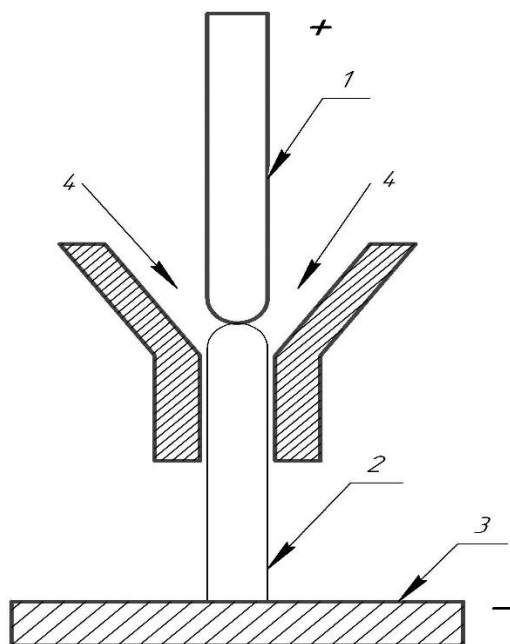
Распределение энергии в сжатой дуге при работе плазмотрона на токе прямой полярности изучалось в работе [26], и показавшее, что наиболее теплонагруженным элементом является плазмообразующее сопло.

Сварка алюминиевых сплавов на постоянном токе прямой полярности возможна, однако, данный метод является затруднительным из-за появления окислов в области сварного соединения. Поэтому перед тем как начинать проводить сварку алюминиевых сплавов сжатой дугой на прямой полярности нужно обязательно тщательно удалить оксидную плёнку с основного металла. Удаляют оксидную плёнку с алюминия с помощью специальных растворов, например, фтороводородной или азотной кислот, затем зачищают механически с помощью специальной щётки. Зачистка проводится непосредственно перед сваркой.

1.3.2 Плазмотроны постоянного тока на обратной полярности

При плазменной сварке на обратной полярности анод и катод меняются местами, то есть «+» на электроде, а «-» на обрабатываемом изделии, схема плазмотрона на постоянном токе обратной полярности представлена на рисунке 10.

Очевидное преимущество сварки сжатой дугой на обратной полярности состоит в явлении катодного распыления, благодаря которому удастся убрать оксидные плёнки с поверхности обрабатываемого изделия. Так же при сварке на обратной полярности эмиссионные свойства материала определяют теплопередачу в изделие и мощность сжатой дуги, повышение доли тепла приводит к повышению эффективности процессов при работе [26].



1 – электрод; 2 – сварочная дуга; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – подача газа

Рисунок 10 – Схема плазмотрона на постоянном токе обратной полярности

Работа плазмотрона на постоянном токе обратной полярности имеет ряд проблем и недостатков. При работе плазмотрона на токе обратной полярности повышается тепловое воздействие на электрод из-за чего быстро приходит в негодность [5]. Стоит отметить, что медно-вольфрамовые электроды имеют повышенный срок службы [27]. Избыток тепловой мощности, сконцентрированный в электроде способен вывести из работы всю конструкцию плазмотрона, поэтому требуется снижение токовых нагрузок, а

также интенсивная система охлаждения и части деталей с высокой теплопроводностью, но и делает её более сложной.

Несмотря на то, что сварка на обратной полярности способна удалять оксидные плёнки, рекомендуется зачищать образец, как и при сварке на прямой полярности. Загрязненный металл и потоки воздуха способны вызвать такое явление как блуждание дуги – беспорядочное перемещение сварочной дуги по обрабатываемой поверхности [11].

1.3.3 Плазмотроны на переменном синусоидальном токе

Преимуществом сварки на переменном синусоидальном токе (рисунок 11) является то, что это позволяет эффективно сваривать алюминиевые сплавы, удаляя при этом оксидную плёнку, при снижении мощности в электрод. «Удаление оксидной плёнки происходит в момент полупериода обратной полярности, при этом на электрод воздействует около 70% тепла» [7].

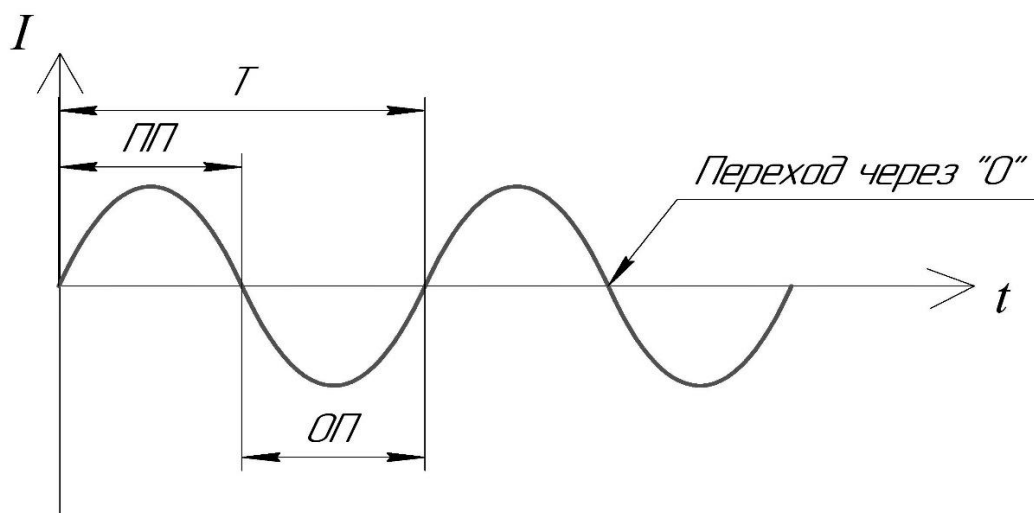


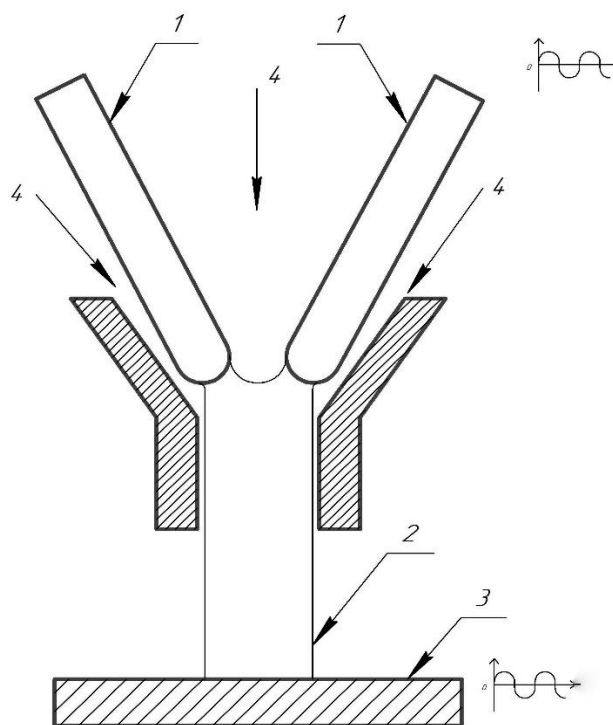
Рисунок 11 – График переменного тока синусоидальной формы

Главный недостаток сварки сжатой дугой на переменном синусоидальном токе является проблема двойной дуги, дело в том, что в процессе сварки случаются аварии, при которых дуга горит вначале на сопло, а потом на изделие, приводя в негодность само сопло и изделие. Среди

недостатков следует так же отметить, проблему стабильного перехода переменного тока через ноль (дуга может прерываться), сложность оборудования, так как дуга крайне нестабильна, то для её стабилизации приходится использовать осцилляторы и стабилизаторы.

1.3.4 Плазмотроны переменного тока трёхфазной сжатой дугой

Решить проблему двойной дуги можно с помощью конструкции плазмотрона трёхфазной сжатой дугой – два неплавящихся электрода (рисунок 12).



1 – электрод; 2 – сварочная дуга; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – подача газа

Рисунок 12 – Схема плазмотроны трёхфазной сжатой дугой работающей на переменном синусоидальном токе

Сварка трёхфазной сжатой дугой происходит следующим образом: электроды закрепляют, к каждому электроду подключают по фазе, третью фазу подключают к изделию; получаются две зависимые рабочие дуги горят между электродами и изделием, дежурная дуга – между электродами. «При

работе таких плазмотронов прохождение тока через нуль может вызвать погасание дуги, поэтому напряжение холостого хода источника питания переменным током не менее чем вдвое превышает рабочее напряжение дуги» [1]. Возбуждение зависимых дуг происходит за счёт плазмообразующего газа и дежурной дуги при приближении горелки к изделию. Дежурная дуга создает небольшую плазменную дугу, которая при соприкосновении с изделием зажигает основную дугу. После того как дуга зажглась, дежурная дуга отключается в автоматическом режиме.

К преимуществам конструкции относится повышение стабильности дуги из-за чего по свойствам дуга похожа на свойства дуги на обратной полярности. Среди недостатков сложность конструкции и дороговизна оборудования.

1.3.5 Плазмотроны переменного тока разнополярными прямоугольными импульсами тока

Сварка разнополярными прямоугольными импульсами тока (рисунок 13) похожа на сварку на переменном синусоидальном токе, главное отличие – форма тока прямоугольная, что обеспечивает резкий переход от прямой полярности к обратной и наоборот. «Технология сварки хорошо подходит для сварки в горизонтальном положении, поскольку она может обеспечить подходящее распределение энергии дуги и давления дуги» [31].

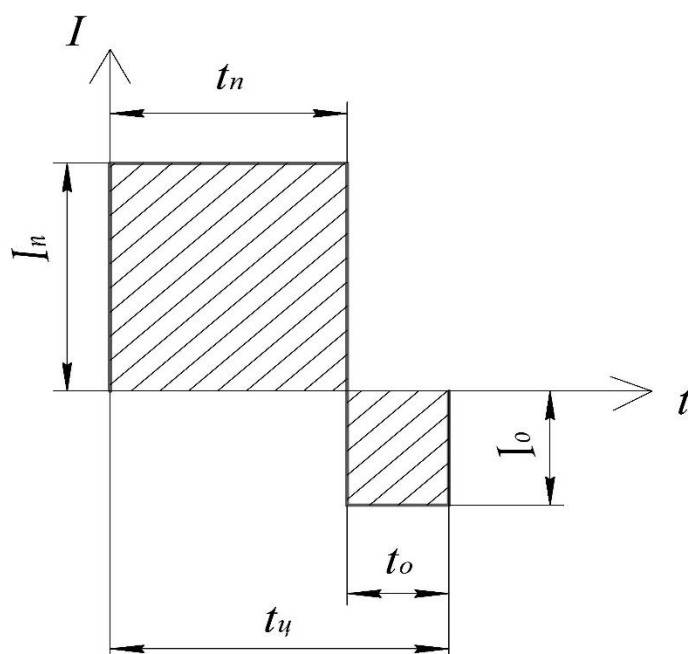
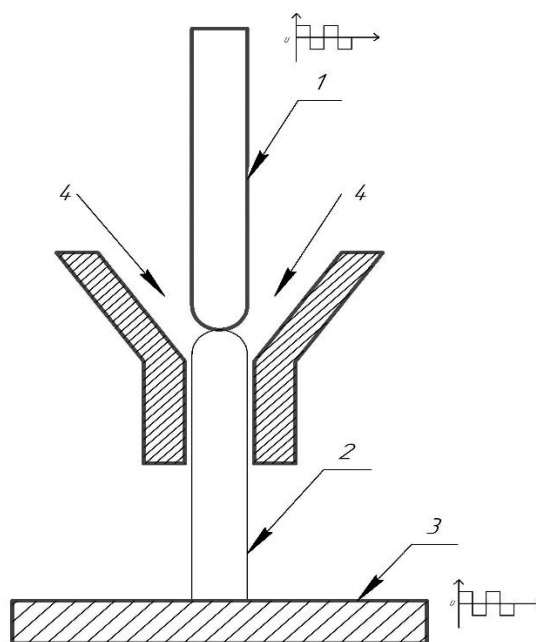


Рисунок 13 – График переменного тока прямоугольной формы

Преимущества данного способа сварки: не требуется осциллятор для стабилизации дуги, устойчивый переход между полярностями (дуга не гаснет), стабильное возбуждение дуги, повышается эффективность процесса. «Ещё одной главной особенностью является возможность изменять эти прямоугольники, тем самым регулировать время и силу тока на прямой или обратной полярности» [23].

Плазмотроны для сварки на переменном токе с разнополярными прямоугольными импульсами тока (рисунок 14), могут существенно отличаться по своей конструкции в сторону её упрощения. Как было отмечено ранее при сварке алюминиевых сплавов требуется участие обратной полярности, которая существенно увеличивает тепловые нагрузки на электрод и сопло плазмотрона [24]. Использование РПИ позволяет регулировать долю участия обратной полярности, тем самым обеспечивая качественное удаление оксидной пленки и снижение тепловложения в плазмотрон [23].



1 – электрод; 2 – сварочная дуга; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – подача газа

Рисунок 14 – Схема плазменной сварки разнополярными
прямоугольными импульсами тока

Нужно упомянуть и тот факт, что прямоугольный ток можно регулировать не только по доли участия прямой полярности и обратной полярности, но и по амплитуде для каждой из полярностей [29]. Кроме того, регулирование импульсов тока по высоте может влиять на увеличение сжатия дуги из-за увеличения силы тока [28].

1.4 Особенности проектирования плазмотронов

Чтобы обеспечить основные параметры процесса сварки сжатой дугой следует учитывать следующие основные параметры: диаметры сопла, длина канала сопла, расход плазмообразующего газа, диаметр вольфрамового электрода, скорость сварки, длина закрытой части дуги, длина открытой части дуги.

При сварке на прямой полярности стойкость электрода значительно выше, токовые нагрузки больше, при этом теплоотдача в сопло возрастает.

При сварке на обратной полярности токовые нагрузки на электрод значительно ниже. При равных условиях сварки на прямой и обратной полярности тепловой поток на анод в два раза больше, чем на катод. Чаще всего применяются прессованные или паяные водоохлаждаемые вольфрамовые аноды, что приводит к увеличению размеров плазмотрона из-за того, что поперечный электродный узел с составными анодами значительно больше стержневого.

Плазмотроны переменного тока с РПИ позволяет гибко регулировать эффективность процесса снизив себестоимость плазмотронов и процесса сварки в целом.

Ведущие роли в конструкциях плазмотронов играют системы охлаждения и системы подачи газа, от них зависят эффективность работы конструкции и сложность выполнения конструкции, которая влияет на габариты и себестоимость.

Система охлаждения служит для охлаждения электрода и сжимающего сопла, так как они являются самыми теплонагруженными элементами. Как было сказано выше, системы могут быть воздушными, водяными и смешанными. «Система охлаждения предназначена для отвода потоков на стенки элементов конструкции и обеспечения их работоспособности» [10].

Газовая система подачи газа служит для подачи плазмообразующего, защитного и стабилизирующего газа через специальные каналы. Газовая система подачи газа находится внутри конструкции плазмотрона, способствует: транспортировке потока газа внутри конструкции; обеспечивает стабилизацию столба разряда; отводит тепло от столба; придает потоку газа необходимую скорость и направление; охлаждает детали конструкции [10].

На практике применение водяного охлаждения чаще всего применяется для конструкций плазмотронов работающих на высоких мощностях, что добавляет им комплектующих деталей, увеличивающих их массу и размеры, приводят к удорожанию конструкции.

Наиболее оптимальной системой является воздушное охлаждение, так как простота конструкции уменьшает её размеры, а значит и себестоимость.

1.5 Формулировка задач ВКР

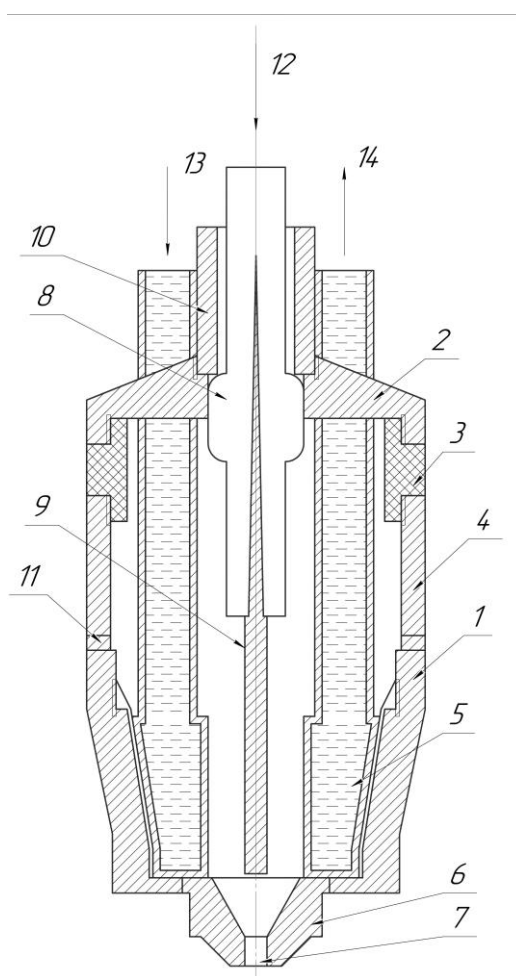
Таким образом достижение цели ВКР возможно путем решения следующих задач:

1. Разработать схему и устройство плазмотрона для плазменной сварки на РПИ;
2. Провести проверку работоспособности разработанного плазмотрона в процессе сварки;
3. Оценить экономическую эффективность разработанного плазмотрона.

2 Методика исследования

2.1 Описание и анализ известной конструкции плазмотрона

В ходе работы была изучена запатентованная конструкция горелки для точечной плазменной сварки [17] – ГСД-1, разработанной в Тольяттинском государственном университете. Конструкция плазмотрона ГСД-1 была взята в качестве базового варианта конструкции плазмотрона (рисунок 15) и рассмотрена на предмет упрощения.



1 – корпус; 2 – крышка; 3 – изолятор; 4 – стягивающая гайка; 5 – камера охлаждения; 6 – сопло; 7 – канал сжатия; 8 – цанга (электродержатель); 9 – электрод; 10 – гайка; 11 – уплотнительное кольцо; 12 – подача газа; 13 – подача воды; 14 – слив воды

Рисунок 15 – Схема плазмотрона ГСД-1 в разрезе

Корпус и крышка плазмотрона разделены изолятором, которые в свою очередь стянуты гайкой, между корпусом и гайкой расположено уплотнительное кольцо для большей герметичности конструкции. Внутри корпуса располагается водяная система охлаждения. В центре крышки расположена цанга (электродержатель), фиксирующаяся гайкой. В цанге расположен электрод, рабочий конец которого расположен перед соплом. В крышке так же есть две дополнительные трубки для подачи и слива воды.

При сварке сжатая дуга горит между электродом и свариваемыми деталями, формируя сварную точку. Расстояние от электрода до свариваемого изделия поток плазмы преодолевает через канал сжимающего сопла.

Горелка ГСД-1 для точечной плазменной сварки позволяет улучшить прочностные свойства сварной точки за счёт уменьшения усадки сварочного кратера [17]. Технические характеристики плазмотрона ГСД-1 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики плазмотрона ГСД-1

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина
Диаметр W электрода	d_w	мм	1,0 – 3,0
Диаметр канала	d_c	мм	1,5 – 3,0
Расход плазмообразующего газа	$Q_{пл}$	л/мин	7,0 – 8,0
Расход защитного газа	$Q_{защ}$	л/мин	
Скрытая длина дуги	$l_{ск}$	мм	1,0 – 5,0
Открытая длина дуги	$l_{откр}$	мм	1,0 – 3,0
Номинальный ток дуги	$I_{ном}$	А	10 – 300
Расход воды	Q_{H_2O}	л/мин	

По классификации, плазмотрон ГСД-1 относится к плазмотронам прямого действия, с водяной системой охлаждения с коаксиальной подачей газа. В конструкции плазмотрона предусмотрена возможность отдельной

подачи плазмообразующего и защитного газа. В качестве плазмообразующей и защитной среды используют инертный газ – аргон.

Плазмотрон способен работать на постоянном токе прямой и обратной полярности, а также, на переменном токе. Конструкция катода – электрода стержневая. Рекомендуемые токи для плазмотрона ГСД-1 при сварке вольфрамовым электродом диаметром 3 мм приведены в таблице 2 [8].

Таблица 2 – Рекомендуемые токи

Род тока	Обозначение	Обозначение	Величина
Постоянный ток прямой полярности	$I_{пп}$	А	140-180
Постоянный ток обратной полярности	$I_{оп}$	А	20-40
Переменный ток	$I_{пер}$	А	100-160

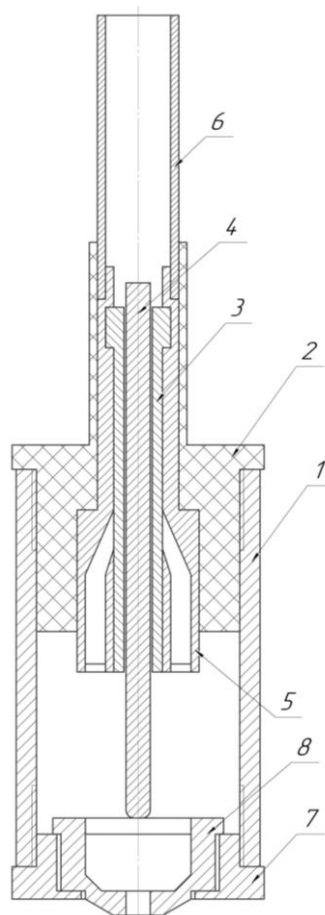
Не смотря на все вышеперечисленные преимущества данная конструкция является габаритной из-за большого количества составляющих деталей, что делает себестоимость конструкции дорогостоящей.

2.2 Проектная конструкции плазмотрона

Предлагаемая проектная конструкция плазмотрона применима для точечной плазменной сварки разнополярными прямоугольными импульсами тока преимущественно для сварки алюминиевых сплавов.

Конструкция плазмотрона ГСД-1, как и большинство других плазмотронов имеют сложности в конструкции, в следствие чего их доступность ограничена для выполнений небольших экспериментальных исследований, вроде лабораторных работ.

Предлагаемая конструкция плазмотрона (рисунок 16) существенно снизит затраты на себестоимость конструкции благодаря своей простоте и эффективности.



1 – корпус; 2 – изолятор; 3 – цанга (электродержатель); 4 – электрод; 5 – газовый диффузор; 6 – трубка для подачи плазмообразующего газа; 7 – гайка; 8 – сопло

Рисунок 16 – Схема проектного плазмотрона в разрезе

Конструкция предлагаемого варианта плазмотрона состоит из корпуса, изолятора – который выполняет роль крышки и соединяются с помощью винтовой резьбы в верхней части конструкции. Расположение изолятора выбрано в верхней части по двум причинам: первая чтобы предотвратить его расплавление из-за высоких температур, так как выполнен из пластика; вторая для упрощения конструкции. В центре изолятора находится газовая линза, в которой располагается цанга с электродом и трубка для подачи плазмообразующего газа. В нижней части корпуса находится гайка, в углубление которой расположено сопло.

Технические характеристики проектного плазмотрона указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики проектного плазмотрона

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина
Диаметр W электрода	d_w	мм	1,0 – 4,0
Диаметр канала	d_c	мм	1,5 – 5,0
Расход плазмообразующего газа	$Q_{пл}$	л/мин	0,2 – 1,5
Расход защитного газа	$Q_{защ}$	л/мин	-
Скрытая длина дуги	$l_{ск}$	мм	1,0 – 3,0
Открытая длина дуги	$l_{откр}$	мм	1,0 – 3,0
Номинальный ток дуги	$I_{ном}$	А	10 – 200
Расход воды	Q_{H_2O}	л/мин	нет

В проектном плазмотроне применяется коаксиальная подача газа, путем применения газовой линзы для аргонодуговой сварки. Газовая линза способствует образованию ламинарного потока газа вдоль оси электрода, что создает внутри конструкции равномерное течение плазмообразующего газа в сжимающее сопло. В качестве плазмообразующего газа используется инертный газ – аргон.

В отличие от плазмотрона ГСД-1, который был взят за базовый вариант, в проектном отсутствует система каналов и трубок для водяного охлаждения конструкции от перегрева. Система охлаждения воздушная. Регулирование тепловложения в плазмотрон происходит за счёт выбора расхода газа и регулирования баланса прямоугольных импульсов тока. В качестве материала корпуса используется латунная муфта. В качестве электрода – катода используется стержневой вольфрамовый электрод, диаметром от 1 до 4 мм.

Для сборки проектного плазмотрона (рисунок 17) потребовались следующие детали: латунная муфта (в качестве корпуса горелки), латунная гайка, газовый линза (для аргонодуговой сварки) в комплекте с цангой,

вольфрамовый электрод, медное сопло, пластиковый штуцер и стальная трубка.



Рисунок 17 – Внешний вид проектного плазмотрона.

Из рисунка видно, что данный плазмотрон можно собрать из доступных материалов. Сборка такой конструкции плазмотрона не занимает особых усилий, достаточно обойтись подручным инструментом.

Оценку работоспособности данного устройства плазмотрона проводили экспериментально.

2.3 Оценка работоспособности проектного варианта плазмотрона

Для экспериментов были выбраны две пластины из алюминиевого сплава марки АМг6 толщиной 2 мм, длиной 135 мм и шириной 45 мм. Перед процессом сварки образцы зачищались с помощью металлической щётки, опытные образцы находились на расстоянии 1,9 мм до среза сопла. Сжимающее сопло имело форму представленную на рисунке 18.

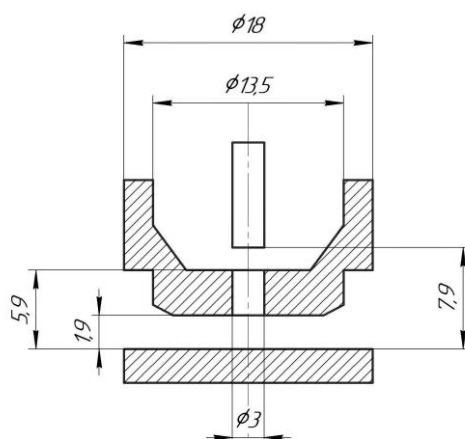


Рисунок 18 – Форма медного сопла для эксперимента

В качестве источника питания использовался сварочный инвертор «BRIMA TIG 200 р AC / DC» (рисунок 19). Для проведения эксперимента были выбраны фиксированные режимы, баланс прямой полярности к обратной в соотношении 60/40% [23]. Параметры режима от прямой полярности к обратной влияют на глубину сварочной ванны [30].



Рисунок 19 – Сварочный инвертор «BRIMA TIG 200 р AC / DC»

После каждого эксперимента измерялись диаметры наплавленной точки с лицевой стороны (D1) и обратной стороны (D2).

В общей сумме проведено 7 наплавов. При проведении эксперимента фиксировалось время сварки, сила тока, длина открытой части дуги, длина дуги, диаметры точек с лицевой и обратной стороны, расход плазмообразующего газа. Результаты экспериментов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты экспериментов

№ эксперимента	$t_{св}, с$	$I_{св}, А$	$L_{откр. дуги}, мм$	D1, мм	D2, мм	Расход газа, л/мин
1	7	100	1,9	11,5	-	4
2	8	100	1,9	11,5	4,5	4
3	7	100	1,9	12	6	4
4	7	100	1,9	12	7	4
5	10	85	1,9	15	8	3
6	5	100	1,9	12	7	4
7	5	100	1,9	12	6	4

В 1 и 2 эксперименте (рисунок 20), получилось сварное отверстие, весь расплавленный алюминий выдуло равномерно по окружности, образовав кольцевое соединение в виде тороида.



Рисунок 20 – Результат 2 опыта

Эксперименты 3 и 4 закончились аварийным режимом с образованием короткого замыкания на сжимающее сопло (рисунок 21).



Рисунок 21 – Внешний вид наплавленной точки в эксперименте 3

В остальных экспериментах наблюдался тот же самый эффект, что и в опыте 1-2-3-4, выдувание сварочной ванны, причем уменьшение времени сварки не влияло на конечный результат. Очевидно, что расход плазмообразующего газа превышен и должен быть существенно меньше 4 л/мин. Методом последовательного перебора было установлено, что оптимальный расход плазмообразующего газа, для данной конструкции плазмотрона находится в диапазоне 0.3-0.7 л/мин, это меньше рекомендуемых значений расхода плазмообразующего газа для базового варианта примерно в 8 раз.

2.4 Выводы по разделу

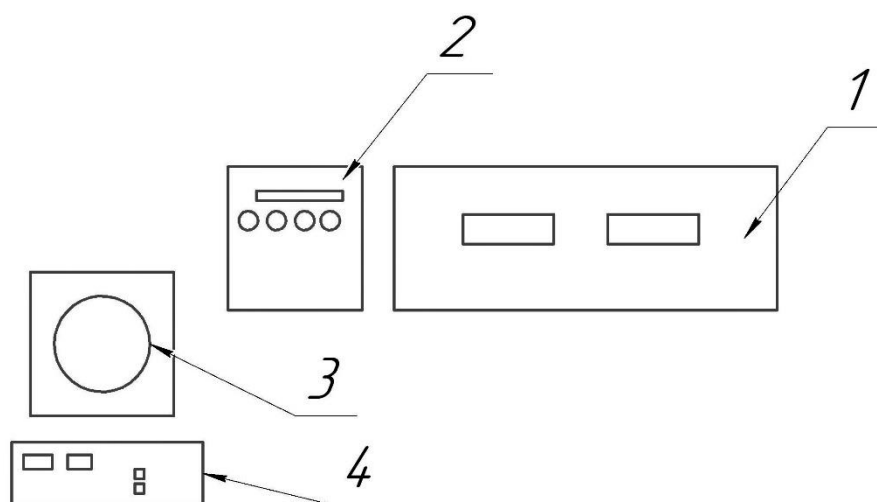
Таким образом, проектный вариант конструкции плазмотрона может быть использован в качестве демонстрационного устройства для точечной плазменной сварки в лабораторных целях. На примере данной конструкции плазмотрона можно экспериментально показывать зависимости расхода плазмообразующего газа на размеры сварочной ванны, зависимости

аварийных режимов плазменной сварки от тока дуги и расхода плазмообразующего газа, а так же принципиальную схему и устройство плазменных горелок.

3 Безопасность и экологичность объекта исследования

3.1 Анализ вредных и производственных факторов

Рассмотрим стенд плазменной сварки в Тольяттинском государственном университете на кафедре «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы». На рисунке 22 изображена схема организации рабочего пространства.



1 – сварочный стол с прижимами; 2 – источник питания; 3 – баллон с плазмообразующим газом; 4 – устройство регистрации сварочных данных

Рисунок 22 – схема организации рабочего пространства

Процесс организации эксперимента требует от обучающегося выполнения технологических операций, представленных в таблице 5.

Таблица 5 – Технологический процесс плазменной сварки образцов из алюминия [6].

Наименование операции технологического процесса	Должность работника технологической операции	Технологическое оборудование для операции	Вспомогательные материалы и вещества для операции
Разметка образцов	Слесарь-сборщик	Марка, линейка	Рукавицы, Штангенциркуль
Вырезка образцов	Слесарь-сборщик	Гильотина	Штангенциркуль

Механическая обработка	Слесарь-сборщик	Металлическая щётка	Ацетон, Ветошь
Сборка	Слесарь-сборщик	Стенд	Штангенциркуль
Сварка	Сварщик	Сварочный инвертор, Вольфрамовый электрод	Защитный газ-аргон
Контроль качества	Сварщик	Штангенциркуль, плоскогубцы	Лупа

Проанализируем опасные и вредные факторы сопровождающие данный технологический процесс. В таблице 6 приведены основные этапы, в которых приведены основные источники опасности и вредные факторы приносящие вред здоровью.

Таблица 6 – Анализ опасных и вредных факторов [6]

Операция	Источник опасности	Факторы
Подготовка образцов - резка	Гильотина	Подвижные рабочие части, опасные инструменты
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)	Ультрафиолетовое излучение, инфракрасное излучение, повышенная концентрация газов (при повышенной концентрации в воздухе способен вызывать удушье), высокая температура металла

3.2 Уменьшение влияния опасных факторов

Уменьшить влияние опасных и вредных факторов на обучающегося возможно за счет проведения инструктажа перед началом работы. Перед началом эксперимента каждый его участник обязательно должен следовать только указаниям руководителя работ в лице преподавателя. Запускать

установки, источники питания, подключать баллоны с газом, возможно только в присутствии руководителя с его разрешения. В таблице 7 приведены мероприятия по снижению воздействия опасных и вредных факторов при выполнении исследовательской работы (таблица 7), которым подвержены обучающиеся. Что же касается подключения установки к сети, ее запуск, установка расхода газа обычно осуществляется лаборантом или руководителем работ, обучающиеся к данным видам работ не допускаются.

Таблица 7 – Уменьшение опасных факторов [6]

Операции	Опасные факторы	Мероприятия
Подготовка образцов - резка	Подвижные рабочие части, опасные инструменты	Проведение инструктажей по технике безопасности; выдача специальной индивидуальной спецодежды
Обработка образцов – шлифовка, подготовка кромок)	УШМ, наждачная бумага, напильник, ацетон	Проведение инструктажей по технике безопасности; выдача специальной индивидуальной спецодежды
Сварка образцов	Ультрафиолетовое излучение, инфрокрасное излучение, Движущиеся и вращающиеся механизмы УШМ, искры от абразивного круга, горячие вещества повышенная концентрация газов (при повышенной концентрации в воздухе способен вызывать удушье), высокая температура металла	Выдача средств индивидуальной защиты; выдача спецодежды; маска и перчатка сварщика; применение электрофильтров для снижения вредных газов в воздухе; проветриваемость помещения

3.3 Обеспечение пожарной безопасности

Обеспечение пожарной безопасности ориентировано на поиск и защиту от возможного места возникновения пожара. Необходимо создать мероприятия, ориентированные на защиту работников и имущества

предприятия, от опасных фактор возможного пожара. В связи с этим потребуется провести осмотр на возникновение пожара. На данном объекте, пожар относится к классу «Е» - горение объекта пожара, который находится под напряжением.

Так как требуется необходимая защита для работников предприятия от возможного пожара, то следует провести мероприятия по обеспечению пожарной безопасности. В таблице 8 приведены мероприятия по обеспечению пожарной безопасности.

Таблица 8 – Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Наименование участка	Перечень мероприятий Предъявляемые требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты	Предъявляемые требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты
Участок для сборки и сварки	Проводится инструктаж всех работников, так же обязательными являются учения пользования средств при пожаре	На данном участке должны иметься средства защиты; также приспособления которые могут предотвратить возгорание.

Выводы по разделу.

В разделе были рассмотрены технологический процесс плазменной сварки образцов из алюминиевых сплавов и организация рабочего пространства. Выявлены опасные и вредные факторы сопровождающее данный технологический процесс, предложены меры по их предупреждению. Рассмотрены мероприятия по обеспечению пожарной безопасности.

4 Экономическая эффективность

4.1 Экономическая оценка стоимости разработанной конструкции плазмотрона

Проектный вариант конструкции сравнивали со стоимостью базового варианта. Себестоимость разработанной конструкции плазмотрона приведена в таблице 9.

Таблица 9 – Себестоимость разработанной конструкции

Наименование детали	Цена, руб.
Латунная муфта	296
Газовая линза	500
Медное сопло	348
Пластиковый штуцер $\frac{3}{4}$	148
Стальная трубка	172
Электрод	184
Латунная заглушка	152
Общая стоимость	1800

4.2 Анализ затрат на проведение экспериментов

Расчет экономической эффективности внедрения проектного варианта плазмотрона, осуществляли исходя из исходных данных представленных в таблице 10.

Таблица 10 – Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатель	Условные обозначения	Единица измерения	Проект
Цена основного материала	C_m	р/кг	600
Дневная ставка участника НИР	C_m	Р	1200
Коэффициент премиальных доплат	$K_{пр}$	-	1,4
Норма отчисления на социальные нужды	$H_{соц}$	%	30
Суммарная стоимость базового оборудования	$C_{об.б.}$	Р	135000
Суммарная стоимость проектного оборудования	$C_{об.п.}$	Р	86800
Норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию	H_a	%	24
Мощность оборудования	$M_{об}$	кВт	6
КПД	КПД	-	0,85
Стоимость электроэнергии	$C_{э-э}$	Р	7
Норма отчислений на текущий ремонт оборудования	$H_{т.р}$	%	15,6

Для начала рассчитаем экономическую эффективность с учетом текущих затрат.

«Расчет текущих затрат производится по следующей формуле» [9]:

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

Где «ЗМ – фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная платно научно-технического персонала)» [9];

« $O_{с.н}$ - отчисления на социальные нужды» [9];

« $Z_{э-э}$ - затраты на электроэнергию для выполнения исследований» [9];

« $Z_{об}$ - затраты, связанные с эксплуатацией оборудования» [9];

«З_{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)» [9];

«Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле» [9]:

$$ЗМ = ЗМ_{\text{осн}} + ЗМ_{\text{всп}}$$

«ЗМ_{осн} - затраты на основной материал» [9];

«ЗМ_{всп} - затраты на вспомогательный материал» [9].

«Затраты на основной материал рассчитываются по формуле» [9]:

$$ЗМ_{\text{осн}} = Н_{\text{р}} \cdot Ц_{\text{м}} \cdot U$$

где «Н_р - норма расхода основного материала на один образец для испытаний» [9];

«Ц_м - оптовая цена 1 кг основного материала» [9];

U - количество образцов, шт

«Затраты на вспомогательный материал укрупнено принимаем равными 20% от затрат на основной материал» [9]:

$$ЗМ_{\text{всп}} = 0.2 \cdot ЗМ_{\text{осн}}$$

Цена на алюминиевый сплав АМг – 6 за 1 килограмм равна 600 рублей, была взята оптовая цена из магазина металлопроката.

$$ЗМ_{\text{осн}} = 0,1 \cdot 600 \cdot 10 = 600 \text{ руб}$$

$$ЗМ_{\text{всп}} = 0,2 \cdot 600 = 120 \text{ руб}$$

$$ЗМ = 600 + 120 = 720 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату научно– технического персонала:

$$\Phi ЗП = ЗПЛ_{\text{осн}} + ЗПЛ_{\text{доп}}$$

«ЗПЛ_{осн} - основная заработная плата научно– технического персонала» [9];

«ЗПЛ_{доп} - дополнительная заработная плата научно– технического персонала» [9].

«Основная заработная плата вычисляется по формуле» [9]:

$$ЗПЛ_{осн} = \sum T_{раб} \cdot C_{д} \cdot K_{пр} \cdot И$$

« $\sum T_{раб}$ - суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях)» [9];

« $C_{д}$ - дневная ставка каждого участника НИР, руб.» [9];

« $K_{пр}$ - коэффициент премиальных доплат (можно принять =1,4)» [9];

«И- количество исполнителей на каждом этапе, чел» [9].

$$ЗПЛ_{осн} = 2 \cdot 1200 \cdot 1,4 \cdot 1 = 3360 \text{ руб.}$$

«Дополнительная заработная плата определяется по формуле» [9]:

$$ЗПЛ_{доп} = 0,1 \cdot ЗПЛ_{осн}$$

$$ЗПЛ_{доп} = 0,1 \cdot 3360 = 336 \text{ руб.}$$

$$ФЗП = 3360 + 336 = 3696 \text{ руб.}$$

«Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле» [9]:

$$O_{с.н} = \frac{H_{соц} \cdot ФЗП}{100}$$

где « $H_{соц}$ – норма отчислений на социальные нужды = 30%» [9]

$$O_{с.н} = \frac{30 \cdot 3696}{100} = 1108 \text{ руб.}$$

«Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний» [9]:

$$Зэ - э = \frac{M_{об} \cdot t_{исп}}{\eta} \cdot Цэ - э$$

где « $M_{об}$ - мощность оборудования (5,9 кВт)» [9];

« $t_{исп}$ - время проведения испытаний, час» [9];

« η - коэффициент полезного действия оборудования (0,85)» [9];

« $Цэ-э$ - цена 1 кВт·часа электроэнергии = 4 руб» [9].

$$Зэ - э = \frac{5,9 \cdot 0,4}{0,85} \cdot 4 = 11 \text{ руб.}$$

Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:

$$Зоб = Аоб + Рт.р$$

где « $Аоб$ - амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования» [9];

«Р_{т.р} - расходы на текущий ремонт оборудования» [9];

Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле:

$$A_{об} = \sum Ц_{об} \cdot \frac{Н_{а} \cdot t_{исп}}{\Phi_{эф} \cdot 2}$$

где «Н_а- норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 %» [9];

« $\sum Ц_{об}$ - суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб.» [9];

« $\Phi_{эф}$ - эффективный фонд времени работы оборудования (можно принять равным 1903 часа)» [9];

« $t_{исп}$ - время проведения испытаний, час.» [9].

Стоимость используемого оборудования приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Наименование и цены оборудования

Наименование оборудования	Цена, руб.
Регистратор сварочных данных	10000
Сварочный пост	75000
Конструкция базового плазмотрона	50000
Конструкция проектного плазмотрона	1800

$$A_{об.б.} = 135000 \cdot \frac{24 \cdot 0,4}{1903 \cdot 2} = 341,00 \text{ руб.}$$

$$A_{об.п.} = 86800 \cdot \frac{24 \cdot 0,4}{1903 \cdot 2} = 218,10 \text{ руб.}$$

«Расходы на текущий ремонт оборудования» [9]:

$$R_{т. р} = \sum Ц_{об} \cdot \frac{Н_{т.р} \cdot k_3}{\Phi_{эф} \cdot 100}$$

«где Н_{т.р} – норма отчислений на текущий ремонт оборудования (принимается равной 35%)» [9];

« k_3 - коэффициент загрузки оборудования» [9].

$$k_3 = \frac{\text{поб. расчет.}}{\text{поб. прин.}}$$

$$кз = \frac{1}{1} = 1$$

$$Рт.р.б. = 135000 \cdot \frac{35 \cdot 1}{1903 \cdot 2} = 1241,40 \text{ руб.}$$

$$Рт.р.п. = 86800 \cdot \frac{35 \cdot 1}{1903 \cdot 2} = 798,21 \text{ руб}$$

$$З_{об.б.} = 341,00 + 1241,40 = 1582,40 \text{ руб.}$$

$$З_{об.п.} = 218,10 + 798,21 = 1016,31 \text{ руб.}$$

Затрата на аренду помещений, приобретение образцов являются прочими затратами, которые принимаем в размере 5% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:

$$З_{пр} = 0,05 \cdot \text{ФЗП}$$

$$З_{пр.} = 0,05 \cdot 9240 = 462 \text{ руб.}$$

Накладные расходы принимаем в размере 55% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:

$$\text{НР} = 0,55 \cdot \text{ФЗП}$$

$$\text{НР} = 0,55 \cdot 3696 = 2032 \text{ руб.}$$

Приобретение оборудования не требуется, так как на кафедре имеется всё необходимое оборудование для проведения опытов.

4.3 Заключение по экономическому разделу

Рассчитано экономическое обоснование проектного варианта плазмотрона. Результаты расчета экономической эффективности для одного эксперимента по базовому и проектному плазмотронам приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Список затрат на проведение исследования

Наименование статей	Сумма для базового, руб.	Сумма для проектного, руб.
Затраты на материалы	600	600
Фонд заработной платы	3696	3696
Отчисления на социальные нужды	1108	1108
Затраты на электрическую энергию	11	11
Затраты на эксплуатацию оборудования	1582,40	1016
Прочие затраты	462	462
Накладные расходы	2032	2032
Общие затраты на проведение работы	9491	8925

Таким образом 1 эксперимент на проектном варианте плазмотрона обходится на 566 рублей дешевле, 10 экспериментов может обойтись уже существенно дешевле на целых 5660 рублей.

Стоит отметить, что стоимость проектного плазмотрона более чем 27 раз ниже стоимости базового плазмотрона.

Заключение

Разработанный проектный вариант плазмотрона питаемого от регулированных импульсов тока для сварки алюминиевых сплавов, рекомендован в качестве обучающего макета при работе с лабораторным стендом по плазменной сварке. Существенное снижение себестоимости конструкции позволяет снизить затраты на 1 эксперимент, таким образом достигается экономическая эффективность внедрения проектного варианта. Проектный вариант плазмотрона рекомендовано использовать в качестве обучающего макета для исследований экспериментальных зависимостей расхода плазмообразующего газа на аварийные режимы сварки, в том числе влияния конструкции сжимающего сопла на форму и размеры наплавки.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях – учебное пособие, Екатеринбург РГППУ. 2014. С. 144.
2. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. / Новые способы термокинетических свойств металлорежущих плазмотронов / Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, 3 (2019). С. 76–84.
3. Баженов А. М., Панов А.И., Гилев И. А. Плазменная сварка алюминиевых сплавов малых толщин // Вестник ПНИПУ. 2015. №3. С. 5-12.
4. Банников Е. А. Сварка. 2014. С. 305.
5. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Особенности формирования швов при сварке плазменной (сжатой) дугой обратной полярности // Свароч. пр-во. – 1971. – № 9. – С. 25–26.
6. Горина Л.Н. Обеспечение безопасных условий труда на производстве: учебное пособие. Тольятти: ТолПИ, 2000. 68 с.
7. Гринюк А.А, Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А, Пелешекно С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. // Кафедра сварочного производства НТУУ «КПИ» - 80. 2015. №11. С. 39-50.
8. Демидов Л.И. Плазменная сварка алюминиевых сплавов // Итоги и перспективы интегрированной системы образования в высшей школе России: образование–наука–инновационная деятельность. – 2011. – С. 396.
9. 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.
10. Ляпин А.А., Клименко Г.К., Конструкции электродуговых плазмотронов. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 56.

11. Неровный В.М. Плазменная сварка. Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана. Москва: 2004г.
12. Найдек В.Л., Наривский А.В., Тарасевич И.Н., Тарасевич Н.И., Токарева О.О., Федоров В.В., Корниец И.В. / Стойкость графитовых электродов при разной электрической мощности плазмотрона косвенного действия. / Металл и литьё Украины № 8 2015. С. 20-23.
13. Патент № 144587 РФ МПК В23К 10/00 Плазмотрон электродуговой с дугой косвенного действия / Картелев Д.В., Корнилаев Р.В. 2014.
14. Патент № 2506724 РФ МПК Н05В 7/18 Электродуговой плазмотрон с водяной стабилизацией дуги / Михайлов Б.И., Михайлов А.Б.; бюд. №4.2014.
15. Патент № 2163424 РФ МПК Н05В 7/22 Устройство для динамической плазменной обработки изделий / Лежепеков В.П., Лежепеков И.В., Смаглиев А.М. 1999.
16. Патент №114631 РФ МПК В23К 10/02 Плазмотрон для сварки плавящимся электродом / Щицын Ю.Д., Щицын В.Ю./ бюл. №10. 2012.
17. Патент № 2479394 РФ. МКИ В23К10/02 Горелка для точечной плазменной сварки / Моторин К.В., Сидоров В.П., Короткова Г.М.; Бюл. № 11. 2013.
18. Патент № 2440701 Н05Н 1/00 Комбинированный плазмотрон / Лопота А.В., Фролов В.Я. Иванов Д.В.; бюл. №2. 2012.
19. Патон Б.Е. Микроплазменная сварка. 1979. С. 246.
20. Рубинчик Ю.Л. Механизированная сварка корпусных конструкций из алюминиевых сплавов. – Л.: Судостроение, 1974. – С. 136.
21. Сергиенко, С. Н. Электродуговой плазмотрон с комбинированным охлаждением / С. Н. Сергиенко, С. А. Юрьев // Международная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения». г. Луганск, 16–17 октября 2020. — Луганск : ЛГУ им. В. Даля, 2020. — С. 39–40.
22. 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 (21), 2012. С. 97-101.

23. 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.

24. 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.

25. Щицын Ю.Д. / Плазменная обработка материалов / Пермь. 2014. С. 116.

26. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А. Струков Н.Н. Распределение энергии в сжатой дуге при работе плазмотрона на токе прямой и обратной полярности. / Вестник ТГПУ. №2. 2010. С.8-14.

27. Simulation and analysis of heat transfer and fluid flow characteristics of variably polarity GTAW process based on a tungsten-arc-specimen coupled model / J. Pan, S. Hu, L. Jang, H. Li. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 96. – P.346–352. DOI.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.014 017-9310/

28. The effect of electrode energy balance on variable polarity plasma arc pressure / B. Hu, Sh. Tashiro, F. Jang, M. Tanaka, Sh. Chen // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 145. – 118715. DOI.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118.715

29. Thermal efficiency decision of variable polarity aluminum arc welding through molten pool analysis / H. Jeong, K. Park, S. Bajek, J. Cho // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 138. – P. 729–737.

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

31. 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. 306