

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
(наименование)

15.03.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Технологии сварочного производства и инженерия поверхностей»

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Исследование горения сжатой дуги на токе обратной полярности»

Обучающийся

И.И. Кочкаров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

ст. преподаватель Д.Э. Советкин

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

Консультанты

к.э.н., доцент О.М.Сярдова

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

к.ф-м.н., доцент Д.А. Романов

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

Аннотация

В выпускной квалификационной была проведена работа по исследованию стабильности горения сжатой дугой на токе обратной полярности.

Используемый метод сварки рассматривается для проведения сварочных работ для алюминиевых сплавов, которые в нынешнее время все чаще используются во многих сферах промышленности.

Главная цель выпускной работы заключается в повышении эффективности и качества сварки алюминиевых сплавов путем проведения исследований и экспериментов по сварке сжатой дугой на обратной полярности.

В рамках работы были выполнены следующие задачи:

- Проведен анализ горения сжатой дуги на обратной полярности.
- Проведен анализ состояния плазмотрона при сварке на обратной полярности.
- Проведена оценка проектной технологии с учетом безопасности труда и воздействия на окружающую среду.
- Выполнены экономические расчеты для показателей эффективности выпускной квалификационной работы.

Пояснительная записка состоит из 40 страниц и содержит графическую часть на 6 листах А1.

Annotation

In the final qualification, work was carried out to study the stability of combustion by a compressed arc at a reverse polarity current. Burning the welding method used is being considered for welding operations for aluminum alloys, which are currently increasingly used in many industries.

The main goal of the graduation work is to improve the efficiency and quality of welding aluminum alloys by conducting research and experiments on welding with a compressed arc in reverse polarity.

As part of the work, the following tasks were completed:

- The analysis of the combustion of a compressed arc on the reverse polarity was carried out.

- The analysis of the plasma torch state during reverse polarity welding has been carried out.

- An assessment of the design technology has been carried out taking into account occupational safety and environmental impact.

- Economic calculations have been performed for the performance indicators of the final qualification work.

The explanatory note consists of 40 pages and contains a graphic part on 6 A1 sheets.

Содержание

Введение.....	5
1. Анализ состояния вопроса	7
1.1 Особенности сварки алюминиевых сплавов	7
1.2 Особенности сварки сжатой дугой.....	10
1.3 Особенность сварки сжатой дугой на переменном токе	13
1.4 Особенность конструкций плазмотронов работающих на токе обратной полярности.....	15
2 Исследование стабильности горения сжатой дуги на токе обратной полярности с водоохлаждаемым неплавящимся электродом.....	18
2.1 Методика проведения экспериментов.....	18
2.2 Методика проведения исследования	21
2.3 Анализ результатов	23
3 Экологичность и безопасность объекта исследования.....	27
3.1 Описание процесса эксперимента.....	27
3.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов	28
3.3 Снижение влияния травмоопасных факторов.....	28
4. Экономическое обоснование исследовательской работы	30
Заключение.....	37
Список используемой литературы.....	38

Введение

В настоящее время наблюдается повышение производства сварных конструкций с применением алюминия. Это обусловлено повышением спроса на конструкции из алюминия, которые применяются во всех сферах промышленности: машиностроение, авиастроение, судостроение, при строительстве различных конструкций, в приборах и т.п. [24].

Производство большинства конструкций, деталей и изделий невозможно без сварки. Для получения качественного сварного соединения, существуют различные способы сварки. Самыми распространенными способами сварки алюминиевых сплавов является механизированная сварка плавящимся электродом, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом.

Следует отметить, что у метода сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов имеется ряд недостатков: низкая эффективность процесса при сварке материалов большой толщины; снижение прочности металла в зоне сварного соединения; сложность сварки из-за высокой текучести алюминия вне горизонтального положения; требования к подготовке к сварке усложняют технологию этого процесса. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом позволяет добиться лучших показателей прочности сварного шва при сварке алюминиевых сплавов. С развитием аргонодуговой сварки, произошла его модернизация, в виде плазменной сварки (сварки сжатой дугой).

Плазменная сварка – дуговой способ сварки плавлением, позволяющий изготавливать сварные изделия, которые менее подвержены образованию трещин и отличается глубоким проплавлением металла.

«Процесс плазменной сварки алюминиевых сплавов, как правило ведется на переменном токе, что позволяет эффективно удалять оксидную пленку за счет ее катодного распыления и одновременно снижать тепловую нагрузку на неплавящийся электрод. Однако применение обратной полярности сказывается на стойкости электродов [15,16].

«Ранее в работе [15] был разработан водоохлаждаемый электрод который позволил повысить допустимый ток для электрода диаметром 3 мм в 2 раза с 40 А до 80 А в сварочных плазмотронах».

Однако, анализ стабильность осуществления процесса сварки сжатой дугой на токе обратной полярности с водоохлаждаемым электродом не производился.

Таким образом, целью работы является повышение качества сварки сжатой дугой алюминиевых сплавов, путем исследования стабильности протекания процесса сварки сжатой дугой на токе обратной полярности с использование водоохлаждаемого электрода.

1. Анализ состояния вопроса

1.1 Особенности сварки алюминиевых сплавов

В настоящее время алюминий и его сплавы широко используются в промышленности авиационной, космической, автомобильной, строительной, электротехнической, химической. Так же используется в судостроении и производстве железнодорожных транспортов.

«Среди конструкционных металлов алюминий имеет самый высокий термический коэффициент линейного расширения – в два раза больше, чем у стали. Это во многом обуславливает его склонность к образованию значительных литейных усадок, значительным деформациям при сварке – и как следствие плохую свариваемость с такими распространёнными металлами как сталь и медь» [22].

«Несмотря на высокую активную химическую активность алюминия изделия из него практически не теряют свой металлический блеск на воздухе, в морской воде и ряде окислительных сред слабой агрессивности. Это связано с тем, что при нормальных условиях поверхность алюминия постоянно покрыта сравнительно тонкой, но очень плотной, очень прочной, абсолютно непластичной и тугоплавкой плёнкой, состоящей из корунда. Эта плёнка является результатом взаимодействия алюминия с окружающей средой – результатом окисления кислородом окружающей среды. Именно окислённые поверхностные слои алюминия выполняют защитные функции, предотвращая интенсивное разрушение основного металла» [22].

«Алюминий – металл со сравнительно низкой температурой плавления. В тоже время температура плавления корунда, постоянного присутствующего на его поверхности, превышает температуру плавления алюминия в несколько раз» [23].

К сплавам обладающими хорошей свариваемостью при аргонодуговой сварке и не упрочняемых термической обработкой следует отнести: АД, АД-1, АМц, АМгЗ, АМг5, АМг6.

К сплавам обладающим хорошей свариваемостью при аргонодуговой сварке и упрочняемых термической обработкой относятся: АВ, АДЗЗ, АДЗЗ, АДЗ5, Д20, В96 и В96Ц.

«Металлургические особенности сварки алюминия обусловлены физическими и химическими свойствами металла. Одной из существенных особенностей алюминиевых сварных швов является наличия в нем выраженной зоны слабины. Зоной слабины принято называть область скопления шлаков металлических и неметаллических паразитных включений. При изготовлении металлических заготовок используются специальные технологии, обеспечивающее частичный вывод вредных включений из изделия, их модификацию и локализацию внутри изделия, а при необходимости – равномерное распределение и фиксацию по всему его объему» [22].

«На сегодняшний день существует множество способов сварки алюминиевых сплавов. Среди них - ручная дуговая сварка с покрытыми электродами, сварка в защитных газах как вручную, так и с применением механизации, автоматическая сварка с использованием слоя флюса, плазменная сварка, сварка трением и контактная сварка. Плюсы и минусы каждого из способов сведены в таблице 1. В числе наиболее распространенных методов сварки алюминиевых конструкций можно выделить аргонодуговую сварку с неплавящимся электродом в инертных газах, механизированную сварку с плавящимся электродом в инертных газах и сварку сжатой дугой в инертных газах» [3]. Далее в таблице 1 приведены сравнение всех возможных видов сварки алюминиевых сплавов.

Таблица 1 – Сравнение видов сварки

Параметр сварки	Ручная-дуговая сварка	Сварка неплавящимся электродом	Ручная-дуговая сварка покрытым электродом	Сварка сжатой дугой (плазменная сварка)
Толщины	От 0,5 мм	От 0,2 мм	От 0,2 мм	От 0,1 мм
Скорость сварки	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая
Стойкость электрода	Отсутствует	Высокая	Отсутствует	Высокая
Свариваемый материал	Алюминий	Все свариваемые металлы	Все виды сталей	Все сварные материалы

Самым эффективными способами для сварки алюминия являются TIG и PAW сварка так как позволяет удалять окисную плёнку, и обладают повышенными тепловложениями в изделие, что очень важно при сварке алюминиевых сплавов.

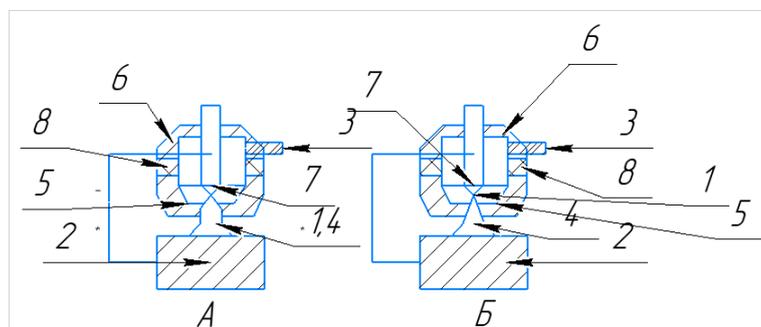
«Из анализа научно-технической информации о дуговой сварке алюминиевых сплавов можно сделать вывод о том, что плазменная сварка представляет собой эволюцию и улучшение аргонодуговой сварки с вольфрамовым неплавящимся электродом. Сварка сжатой дугой является более эффективным способом соединения алюминиевых сплавов так как обладает повышенной проплавающей способностью, имеет повышенную производительность сварки и пространственной устойчивостью дуги» [22].

Однако, плазменная сварка менее распространена, до конца 20 века источники питания имели массивные размеры и сложную конструкцию, стоит отметить и отсутствие серийности их производства.

1.2 Особенности сварки сжатой дугой

Сжатая дуга образуется в узком канале сопла при продувании через него струи плазмообразующего газа. С помощью сжатой дуги сваривают различные металлы, включая тугоплавкие и легкоокисляемые материалы, а также осуществляют наплавку проволокой, более широкое применение этот метод нашел для резки.

Сварка сжатой дугой применяется для материалов с высокой теплопроводностью или когда необходимо увеличить глубину проплавления и производительность процесса. Сжатая дуга отличается от свободной дуги высокой плотностью мощностью и давлением (15 000—25 000 К и более). Сопло выступает в качестве стабилизирующего канала, через который проходит столб дуги, обеспечивая высокую эффективность сварки. Существует два способа ведения процесса сварки сжатой дугой (рисунок 1).



А — прямого действия (плазменно-дуговая); Б — косвенного действия (плазменной струей); 1 — дуга; 2 — свариваемый металл; 3 — подача газа; 4 — плазменная струя; 5 — сопло; 6 — катодный узел; 7 — электрод; 8 — электроизолятор

Рисунок 1 – Схема плазменной сварки

В первом варианте сжатая дуга прямого действия воздействует на металл напрямую, однако требует от источников питания повышенного напряжения на дуге, она также характеризуется высокой пространственной стабильностью,

оставаясь точно по оси плазмотрона. Метод сварки с использованием сжатой дуги прямого действия известен как плазменно-дуговая сварка.

Второй вариант ведения плазменной сварки, использует сопло в качестве анода, газ пронизывая дугу электрод-сопло формирует плазменный поток, выходящий из канала. Поток, выбранный из дугового столба и направленный как факел, называется дугой косвенного действия или просто плазменной струей. Таким способом возможно обрабатывать не металлические изделия, т.к. не требует использования токопроводящего обрабатываемого изделия.

«Плазменная сварка может применяться для тонкостенных металлов в виде способа микроплазменной сварки, сущностью такого технологического процесса предполагает использование малоамперных источников питания. При помощи микроплазменной сварки можно легко сваривать изделия небольших толщин примерно до 1,5 мм. Чаще всего для микроплазменной сварки используется аргон, но стоит учитывать, что могут добавляться и другие газы» [1].

«Еще одной разновидностью сварки сжатой дугой является плазменная сварка в замочную скважину. Данный технологический процесс используется с высокой плотностью энергии, который позволяет выполнять сварку с глубоким проплавлением с узкими профилями шва. Данный метод идеально подходит для создания прочных и долговечных соединений с минимальными включениями в металле шва. Сварка в замочную скважину чаще всего используется в тяжелом машиностроении, и аэрокосмической промышленности» [7].

В зависимости от назначения сварку сжатой дугой возможно осуществлять на постоянном и переменном токе.

«Сварка сжатой дугой на постоянном токе прямой полярности заключается в уменьшенном тепловом воздействии на электрод, что повышает его стойкость в процессе сварки. Увеличение токовых нагрузок на прямой полярности повышает эффективность сварочного процесса, обеспечивая более глубокое проплавление металла. Повышенное тепловое воздействие направлено на обрабатываемое изделие, что уменьшает нагрузку на плазмотрон и упрощает его

конструкцию. Сварка алюминиевых сплавов на постоянном токе прямой полярности возможна, но требует предварительного удаления оксидов перед началом процесса сварки. Для этого необходимо тщательно очистить оксидную плёнку с основного металла с помощью специальных растворов, таких как фтороводородная или азотная кислота, зачистить механически при помощи специальной щётки непосредственно перед сваркой» [14].

«Плазменная сварка на постоянном токе обратной полярности увеличивает тепловое воздействие на сам электрод, что приводит к его быстрому износу. Излишняя тепловая мощность, сосредоточенная в электроде, может привести к выходу из строя всего плазмотрона, поэтому необходимо снижение токовых нагрузок, эффективная система охлаждения и использование деталей с высокой теплопроводностью, усложняет его конструкцию. Несмотря на способность сварки при обратной полярности удалять оксидные плёнки, рекомендуется все равно очищать поверхность перед сваркой, как и при использовании прямой полярности. Загрязненный металл и воздушные потоки могут вызвать прерывание стабильности горения дуги и общее снижение качества сварного шва» [21].

Сварка на переменном токе представляет из себя сочетание преимуществ и недостатков прямой и обратной полярности. Рассмотрим основные особенности сварки на переменном токе.

1.3 Особенность сварки сжатой дугой на переменном токе

Сварку сжатой дугой на переменном токе можно вести от сварочных трансформаторов которые формируют синусоидальную форму тока (рисунок 2) либо от сварочных инверторов которые как правило формируют прямоугольные импульсы тока (рисунок 3):

«Преимуществом сварки на переменном токе является возможность сваривать алюминиевые сплавы, удаляя оксидную плёнку, при снижении тепловложения в электрод. Удаление оксидной плёнки происходит в момент полупериода обратной полярности, при этом существенно снижается тепловая нагрузка на электрод» [6].

Главным недостатком сварки сжатой дугой на переменном синусоидальном токе является проблема перехода тока через ноль (дуга может прерываться) (рисунок 2), для стабилизации дуги приходится использовать осцилляторы и стабилизаторы. Кроме того, источники питания формирующие синусоидальную форму тока, как правило являются трансформаторами, что существенно увеличивает вес и габариты таких источников.

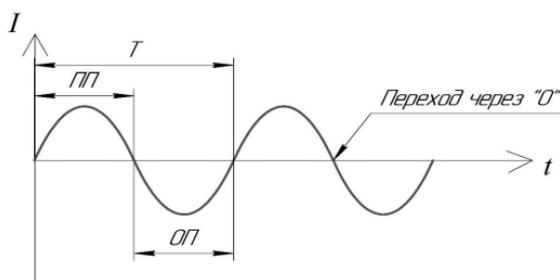


Рисунок 2 – Синусоидальная форма тока

Сварка прямоугольным переменным током похожа на сварку на переменном синусоидальном токе, отличие заключается в прямоугольной форме,

который формирует полный импульс в полупериоде, таким образом прямоугольная форма более эффективна, чем синусоидальная. Прямоугольная форма обеспечивает резкий переход от прямой полярности к обратной и наоборот, что существенно увеличивает стабильность горения дуги [24].

«Другим преимуществом прямоугольного переменного тока заключается в возможности регулировать время и силу тока на прямой или обратной полярности» [24] (рисунок 3).

При плазменной сварке плазмотроны на переменном токе с прямоугольной формой тока, могут отличаться по своей конструкции в сторону упрощения.

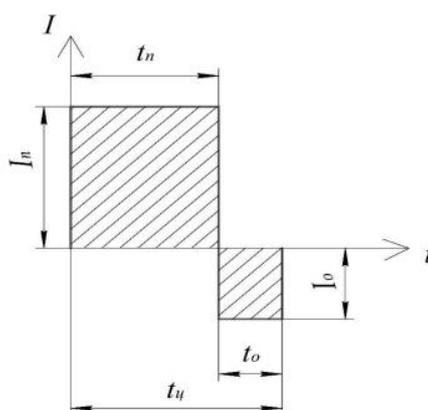


Рисунок 3 – Прямоугольная форма тока

t_n - время прямой полярности; t_o – время обратной полярности; t_u - время цикла; I_o – ток обратной полярности; I_n – ток прямой полярности.

В работе [15], было доказано, что тепловложение обратной полярности выше чем у прямой, однако стойкость электродов при сварке обратной полярности гораздо хуже нежели чем у прямой полярности [16]. «Следовательно для сварки алюминиевых сплавов может потребоваться увеличения использования обратной полярности» [16]. «Использование обратной полярности обеспечивает дополнительными преимуществами для ряда

плазменных технологий. Явление катодного распыления позволяет производить очистку поверхностей металлических заготовок, решает проблему качественной сварки алюминиевых сплавов. Ведение процесса на токе обратной полярности позволяет в широких пределах регулировать тепловое и силовое воздействие на зону обработки, что особенно важно при наплавке» [17]. Основной проблемой ведения процесса сварки сжатой дугой на токе обратной полярности, является стойкость неплавящегося электрода и тепловое состояние плазмотрона. Поэтому очень важно, детально изучить данный технологический процесс и вывести положительный эффект.

1.4 Особенность конструкций плазмотронов работающих на токе обратной полярности

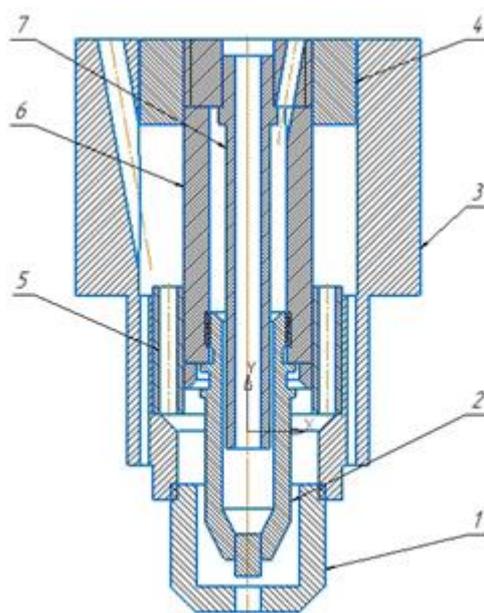
Несмотря на преимущества обратной полярности, работа плазмотрона на обратной полярности имеет свои недостатки. К недостаткам относятся усложнение структуры плазмотрона, его увеличение веса и размеров, повышенное энергопотребление при сварке, а также увеличенный износ электрода плазмотрона из-за увеличенной нагрузки.

«Для улучшения работы в этом режиме необходимо усложнять конструкцию плазмотронов, улучшать системы охлаждения и повышать стойкость электродов» [3]. «Экспериментально было установлено, что при сварке на обратной полярности самой нагруженной частью плазмотрона является электрод, выступающий в роли анода» [2].

При выполнении исследования была изучена уникальная конструкция горелки предназначенной для плазменной резки металлов — FY-A200H, в данной конструкции используется водоохлаждаемый электрод.

Плазмотрон (рисунок 4) состоит из сжимающего медного сопла 1; водоохлаждаемого электрода с вольфрамовой ставкой 2; корпуса горелки 3;

диэлектрической проставки 4; отверстие подачи плазмообразующего газа 5; трубка подачи жидкости 6,7.



1 – Сжимающее медное сопло; 2 – воохлаждаемый электрод; 3 – корпус горелки 4 – диэлектрическая проставка ; 5 –отверстие подачи газа; 6 – трубка подачи жидкости; 7 – трубка откачки жидкости

Рисунок 4 – Схема плазмотрона FY-A200H

Использование данной конструкции плазмотрона, в качестве сварочного возможно путем небольшой модернизации. За счет интенсивного водяного охлаждения электрода, как говорилось ранее это наиболее нагруженная часть плазмотрона, часть тепла эффективно удаляется.

Данную конструкцию плазмотрона модернизировали, путем замены электрода с гафниевой вставкой на электрод с вольфрамовой вставкой. Кроме того, увеличили размер сжимающего сопла сделав стенки несколько больше. Размер сжимающего сопла будет напрямую зависеть от протекающего тока и расхода плазмообразующего газа. Причем прямая это или обратная полярность в данном случае влиять будет не сильно.

В работе [11] было установлено, что при использовании данной конструкции плазмотрона, можно увеличить допустимый ток на электрод диаметром 3 мм с 40 А до 80 А, в таком случае тепловложение в изделие существенно увеличивается, при том же диаметре сопла.

Однако до настоящего времени для данной конструкции плазмотрона не было проведено дополнительных исследований при увеличенных токах обратной полярности, поэтому есть необходимость в дополнительных исследованиях.

Для данного исследования требуется провести эксперименты с плазмотроном FY-A200H, задачами работы являются:

- Провести исследование стабильности горения сжатой дуги на токе обратной полярности от 40А до 80А для диаметра вольфрамового водоохлаждаемого электрода 3 мм.
- Проанализировать стойкость неплавящегося водоохлаждаемого электрода в плазмотроне FY-A200H.
- Проанализировать стойкость сжимающего сопла для режимов сварки на токе обратной полярности от 40А до 80А.

2 Исследование стабильности горения сжатой дуги на токе обратной полярности с водоохлаждаемым неплавящимся электродом

2.1 Методика проведения экспериментов

«Все эксперименты для исследования горения сжатой дугой на токе обратной полярности проводились на специальном отведенном месте сварочном столе (рисунок 5)» [12].



Рисунок 5 – Сварочный стол

1 – Сварочный стол; 2 – Плазматрон FY A200H; 3 – Инвертор BRIMA TIG-200P; 4 – видеокамера на штативе

Сварочный стенд оборудован источником питания BRIMA TIG 200P AC/DC (рисунок 6), технические характеристики которого приведены в таблице 3, и доработанным сварочным плазматроном FY-A200H (рисунок 7).



Рисунок 6 - Инвертор BRIMA TIG-200

Таблица 2- Технические характеристики инвертора BRIMATIG-200

Параметры	ARC 160	ARC 200
Напряжение, В	220	220
Частота питающей сети	50/60	50/60
Потребляемая мощность, кВа	5,3	7
Максимальный входной ток сети, А	24,3	32
Рабочее напряжение на дуге, В	26,6	28
КПД, %	85	85
Вес	8	10



Рисунок 7 – Плазмотрон FY-A200H

Для исследования стабильности горения дуги использовали высокоскоростную камеру мобильного телефона iPhone 12 с разрешением 1920x1080px (рисунок 8) с частотой съёмки 1000 кадров в секунду.



Рисунок 8 – Высокоскоростная камера мобильного телефона iPhone 12

«Для данного эксперимента понадобилось использовать источник питания TIG 200; сварочный плазмотрон FY-A200H; Высокоскоростная камера мобильного телефона» [13].

2.2 Методика проведения исследования

Стабильность горения дуги оценивали с помощью скоростной видеосъемки. Съемку вели по схеме (рисунок 9).

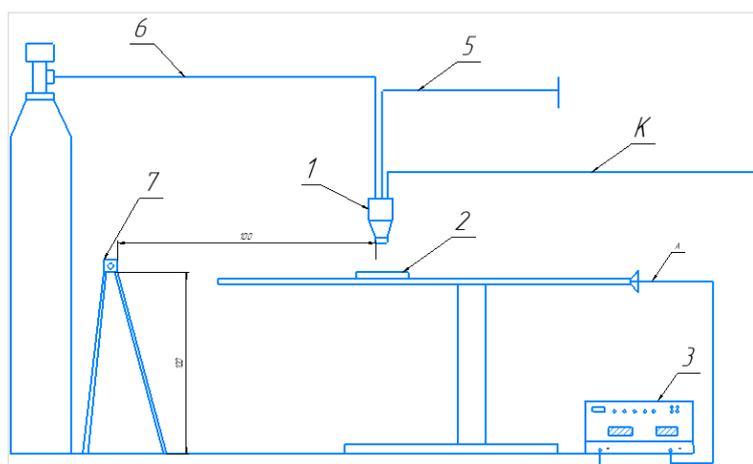


Рисунок – 9 Схема съемки видеокамеры для исследования

1 – Плазмотрон; 2 – Обрабатываемая деталь; 3 – Источник питания ; 4 – Баллон с газом; 5 – Шланг с охлаждающей жидкостью ; 6 – Шланг подачи газа; 7 – Видеокамера

Видеокамера находилась на расстоянии 1 м от плазмотрона под углом 90° и на расстоянии 1 метр от пола.

В процессе эксперимента использовали следующую методику:

В качестве плазмообразующего газа использовали Аргон, с расходом 0.7 л/мин, расход контролировали с помощью ротаметра РМ-3А. Защитный газ не использовался. Диаметр сжимающего сопла 3 мм, длина канала сопла 3 мм, длину дуги 2-2.5 мм устанавливалась по щупу. Общая длина дуги 7 мм.

Вначале проводили сварку сжатой дугой на постоянном токе с шагом 10 А в диапазоне 40-80 А.

Далее проводили сварку сжатой дугой на переменном токе с балансом 50/50% на токе 110 А,

В процессе эксперимента фиксировали изменение температуры сжимающего сопла. С помощью специально откалиброванных термопар и калориметра.

«В таблице 3 представлены результаты измерений температуры сжимающего сопла» [14].

Таблица 3 – Результаты изменений температуры сжимающего сопла

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

С помощью данных мы можем проанализировать состояние плазмотрона.

2.3 Анализ результатов

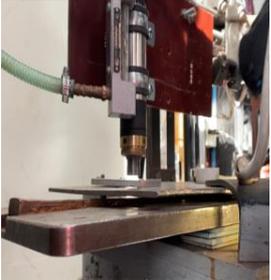
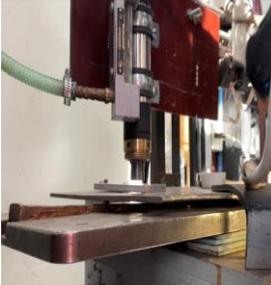
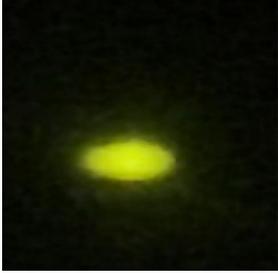
По окончании эксперимента можно отследить, что получилась качественно катодная очистка, что дуга практически не изменяла свою форму во время всех проведенных экспериментов, торец электрода во время всего эксперимента был чистым без какого-либо оплавления.

В таблице 4 представлены сводные данные о дуге и характеристиках сжимающего сопла и неплавящегося электрода.

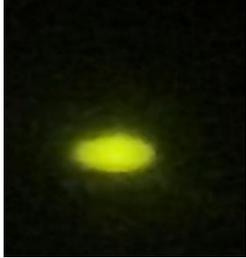
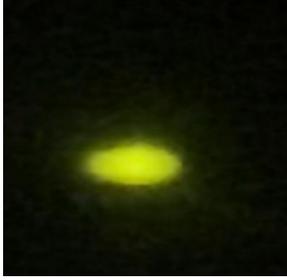
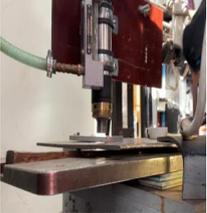
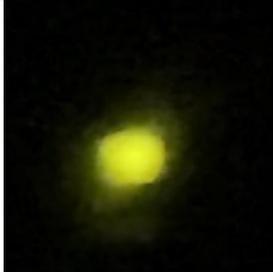
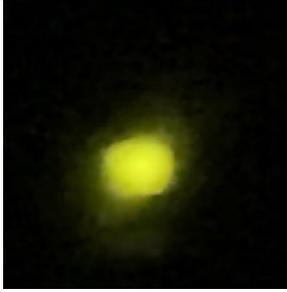
Таблица 4 – Результаты проведенных исследований

Плазматрон после сварки	Сжатая дуга в начале сварки	Состояние плазматрона в конце сварки	Параметры сварки
			Баланс полярности:0/1 00 Сила сварочного тока:40А Время сварки 5 с.
			Баланс полярности:0/1 00 Сила сварочного тока:50А Время сварки 3,4 с

Продолжение таблицы 4

Плазмотрон после сварки	Сжатая дуга в начале сварки	Состояние плазмотрона в конце сварки	Параметры сварки
			Баланс полярности:0/1 00 Сила сварочного тока:60А Время сварки 5,8 с
			Баланс полярности:0/1 00 Сила сварочного тока:70А Время сварки 6 с
			Баланс полярности:0/1 00 Сила сварочного тока:80А Время сварки 5,6 с

Продолжение таблицы 4

Плазмотрон после сварки	Сжатая дуга в начале сварки	Состояние плазмотрона в конце сварки	Параметры сварки
			Баланс полярности:50/ 50 Сила сварочного тока:110А Время сварки 5,2 с
			Баланс полярности:50/ 50 Сила сварочного тока:110А Время сварки 4,8 с

Заключение по разделу

Полученный результат может свидетельствовать о том, что тепловое состояние плазмотрона и стабильность горения сжатой дуги на токе обратной полярности выше. Температура сжимающего сопла существенно ниже, нет перехода тока через ноль а, следовательно исключается возможность прерывания процесса. Из эксперимента отметим, что водоохлаждаемый электрод эффективно отводит тепло и не требует дополнительных доработок, при многочисленных экспериментах он никак не разрушился, а паянный шов не протекал. Сжимающее сопло меньше разогревалось, а следовательно снижалась общая температура плазмотрона.

В результате экспериментов удалось доказать, что сварка сжатой дугой на токе обратной полярности более стабильна за счёт своих сварочных способностей, чем переменный ток. Обратная полярность обладает не только качеством катодной очистки, но и увеличенным тепловложением в изделие, что при решении вопроса стойкости электрода носит положительный характер. Все результаты были проанализированы. Закончив все эксперименты можно было отметить что вольфрамовый неплавящийся электрод до момента сварки и после проведения сварки никак не изменился.

Целью данной исследовательской работы было показать состояние электрода перед сваркой и после сварки. Эксперименты проводились на постоянном токе обратной полярности от 40 А до 80 А и было так же проведено 2 опыта на переменном токе обратной полярности 110А.

3 Экологичность и безопасность объекта исследования

На кафедре «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы» Тольяттинского государственного университета, осуществились опыты по исследованию стабильности горения дуги на токе обратной полярности с применением водоохлаждаемого вольфрамового электрода.

3.1 Описание процесса эксперимента

В пояснительной записке отображается исследование технологического процесса сварки сжатой дугой на токе обратной полярности разделенный на несколько этапов первый этап включает в себя разметку алюминиевых пластин с помощью промышленного маркера по металлу, второй этап заключается в нарубке алюминиевых пластин АМг-6 размером 120 мм на 25 мм в количестве 2 штук с помощью механического устройства для рубки металлов, третий этап – удаление неровности и заусенцев с поверхности алюминиевых пластин при помощи шлифования абразивным инструментом, четвертый этап технологического процесса включает в себя очистку поверхности металлических заготовок при помощи мыльного раствора и мягкой губки. По выполнению всех этапов подготовки производится сварка алюминиевых пластин при помощи сварки сжатой дугой на токе обратной полярности, с условием выполнения требований безопасности, а именно соблюдения безопасного расстояния с использованием дистанционного пульта включения источника питания для защиты от сварочной дуги в оптическом диапазоне, ультрафиолетовом, видимом, инфракрасным излучением. После проведения сварки необходимо дождаться полного остывания образцов, затем потребуются произвести визуально-измерительный контроль качества для оценки глубины сварного соединения.

3.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

При выполнении технологического процесса необходимо выявить все риски и опасности получения вреда для организма работника выполняющего операцию по подготовке и сварки алюминиевых сплавов, которые могут нанести травму и негативное воздействие на человека. При проведении этапов подготовки и сварки на работника могут воздействовать вредные факторы, такие как высокая температура, ультрафиолетовое излучение, и вредные газы, острые и режущие инструменты необходимые для выполнения подготовительных работ, которые могут нанести вред работнику выполняющего операцию сварки. Для полного анализа опасных и вредных факторов необходимо изучить все операции сварочного процесса для исключения производственного травматизма.

3.3 Снижение влияния травмоопасных факторов

Для снижения получения травм, разработал таблицу 5 по повышению безопасности на рабочем месте для проведения исследований. Провел анализ опасных и вредоносных факторов воздействующих на работника при выполнении сварочного процесса.

Таблица 5- Меры по снижению получения травм на рабочем месте

Операции для выполнения сварки	Вредоносные факторы	Мероприятия необходимые для уменьшения получения вредоносных факторов
Подготовительный этап	Острые и режущие инструменты	Выдача необходимого оборудования для выполнения подготовительного этапа и выдача спецодежды

Продолжение таблицы 5

Операции для выполнения сварки	Операции для выполнения сварки	Мероприятия необходимые для уменьшения получения вредоносных факторов
		необходимой при сварке, проведение инструктажей по защите работников
Обработка алюминиевых образцов	Острые и режущие инструменты, попадание на работника опасных искр при выполнении сварки	Выдача всего необходимого оборудования и спецодежды для выполнения обработки
Сварка алюминиевых образцов	Первым опасным фактором является ультрафиолетовое излучение которое влияет на организм человека и способствует ухудшению состояния человека, высокая температура плавления металла, вредоносные газы	Выдача полного комплекта СИЗ что включает в себя: маску сварщика, перчатки, полное проветривание помещения где выполняется сварочный процесс

В данной таблице учтены все риски получения травм на сварочном производстве

Заключение по разделу

Был разработан план для безопасных проведений исследований в рабочей зоне при сварке сжатой дугой на токе обратной полярности.

4. Экономическое обоснование исследовательской работы

Для расчета экономического обоснования работы потребуется высчитать по формулам затраты для проведения данной исследовательской работы (таблица 6).

Таблица 6 – «Исходные данные для расчета экономической эффективности» [6].

Показатели	Условное обозначение	Единица измерения	Исследование
Цена основного материала	C_m	р/кг	250
Коэффициент премиальных доплат	$K_{пр}$	руб	1,4
Норма отчислений на социальные нужды	$H_{соц}$	%	30
Дневная ставка участника НИР	C_m	руб	400
Суммарная стоимость предоставляемого оборудования университетом	$C_{об}$	руб	110000
Норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию	H_a	%	24
Коэффициент полезного действия	$K_{пд}$	%	0,85
Норма отчислений на ремонт оборудования	$C_{э-э}$	%	35
Затраты на электроэнергию	$C_э$	руб	4
Мощность оборудования	$M_{об}$	кВт	6

«Производиться расчет экономической эффективности с учетом

производственных затрат. Поскольку работа является научно – исследовательской, производственные затраты будут текущими. Формула для расчета взяты из методических указаний» [6].

«Расчет текущих затрат производится по следующей формуле» [6].

$$Z_{\text{тек}} = 3М + ФЗП + O_{\text{с.н}} + Z_{\text{э-э}} + Z_{\text{об}} + Z_{\text{пр}} + НР \quad (1)$$

где «3М – затраты на основные и вспомогательные материалы» [6].

«ФЗП – фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная плата и научно– технического персонала)» [6].

« $O_{\text{с.н}}$ - отчисления на социальные нужды» [6];

« $Z_{\text{э-э}}$ - затраты на электроэнергию для выполнения исследований» [6];

« $Z_{\text{об}}$ - затраты, связанные с эксплуатацией оборудования» [6];

« $Z_{\text{пр}}$ - прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов или макетов (связанны со спецификой исследования)» [8];

«НР - накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и охрану труда)» [6];

«Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле» [6]:

$$3М = 3М_{\text{осн}} + 3М_{\text{всп}} \quad (2)$$

« $3М_{\text{осн}}$ – затраты на основной материал» [6].

« $3М_{\text{всп}}$ - затраты на вспомогательный материал» [6].

«Затраты на основной материал рассчитываются по формуле» [6]:

$$3М_{\text{осн}} = Нр + Цм + U, \quad (3)$$

где « N_p - норма расхода основного материала на один образец для испытаний» [6];

« C_m - оптовая цена 1 кг основного материала» [6];

« U - количество образцов, шт.» [6];

«Затраты на вспомогательный материал укрупнено принимаем равными 20% от затрат на основной материал» [6].

$$ЗМ_{всп} = 0.2 \cdot ЗМ_{осн} \quad (4)$$

«Изучив информацию, взятую из интернета, берем оптовую цену за 1 кг алюминиевого сплава АМг–6 равную 350 рублей» [6].

$$ЗМ_{осн} = 0,1 \cdot 350 \cdot 10 = 350 \text{ руб}$$

$$ЗМ_{всп} = 0,2 \cdot 350 = 70 \text{ руб.}$$

$$ЗМ = 350 + 70 = 420 \text{ руб.}$$

«Затраты на заработную плату научно–технического персонала» [6].

$$\Phi ЗП = ЗП_{осн} + ЗП_{доп} \quad (5)$$

« $ЗП_{осн}$ - основная заработная плата научно–технического персонала» [8];

« $ЗП_{доп}$ - дополнительная заработная плата научно–технического персонала» [8].

«Основная заработная плата вычисляется по формуле» [6]:

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

« $\sum T_{раб}$ - суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях)» [6];

« C_d - дневная ставка каждого участника НИР, руб.» [6];

« $K_{пр}$ - коэффициент премиальных доплат =1,4» [6];

«И- количество исполнителей на каждом этапе, чел» [6].

$$ЗПЛ_{осн} = 5 \cdot 400 \cdot 1,4 \cdot 1 = 2800 \text{ руб.}$$

«Дополнительная заработная плата определяется по формуле» [6]:

$$\begin{aligned} ЗПЛ_{доп} &= 0,1 \cdot ЗПЛ_{осн} \\ ЗПЛ_{доп} &= 0,1 \cdot 2800 = 280 \text{ руб.} \\ ФЗП &= 2800 + 280 = 3080 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (7)$$

«Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле:» [6].

$$O_{с.н} = \frac{N_{соц} \cdot ФЗП}{100} \quad (8)$$

«Где $N_{соц}$ - норма отчислений на социальные нужды=30%» [6];

$$O_{с.н} = \frac{30 \cdot 2800}{100} = 855 \text{ руб}$$

«Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний» [6];

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

«где $M_{об}$ - мощность оборудования (5,9 кВт);» [6];

« $t_{об}$ - время проведения испытаний, час» [6];

« η – коэффициент полезного действия оборудования (0,85)» [6];

« $Ц_{э-э}$ - цена 1 кВт·часа электроэнергии = 4,5 руб» [6];

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

«Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:» [6];

$$З_{об} = А_{об} + Р_{т,р} \quad (10)$$

«Где $A_{об}$ – амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования» [6];

« $P_{т,р}$ – расходы на текущий ремонт оборудования» [6];

«Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле» [6];

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

«Где N_a – норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 %» [6];

« $\Sigma Ц_{об}$ – суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб» [6];

« $\Phi_{эф}$ – эффективный фонд времени работы оборудования» (можно принять равным 1903 часа)» [6];

« $t_{исп}$ – время проведения испытаний, час» [6].

«Стоимость оборудования приведена в таблице 7» [6].

Таблица 7 – «Наименование и цены предоставленного оборудования» [6].

Наименование используемого оборудования	Цена (руб.)
Сварочный пост	65000
Регистратор полученных сварных данных	9000

$$A_{об} = 72800 \cdot \frac{24 \cdot 0,4}{1903 \cdot 100} = 3,7 \text{ руб.}$$

«Расходы на текущий ремонт оборудования:(принимаем равной 35%)» [6];

$$P_{т.р} = \sum Ц_{об} \cdot \frac{N_{т.р} \cdot K_3}{\Phi_{эф} \cdot 100} \quad (12)$$

«где $N_{т.р}$ – норма отчислений на текущий ремонт оборудования (принимаемой равной 35%)» [6].

« K_3 -коэффициент загрузки оборудования» [6];

$$K_3 = \frac{\text{поб. расчет}}{\text{поб. прин}} \quad (13)$$

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

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

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

«Расходы на прочие затраты, включая аренду помещений и покупку образцов, составляют 5% от общей суммы заработной платы научно-технического персонала» [6];

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

$$З_{пр} = 0,05 \cdot \Phi_{ЗП}$$

$$З_{пр} = 0,05 \cdot 1848 = 92 \text{ руб.}$$

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

$$НР = 0,55 \cdot \Phi_{ЗП}$$

$$НР = 0,55 \cdot 1848 = 1016 \text{ руб.}$$

Все оборудование находилось в Тольяттинском государственном Университете, что означает что нам не пришлось закупать нужное оборудование для выполнения исследования.

Провели экономическую оценку для проведения исследования, данные приведены в таблице 8.

Таблица 8 «Список затрат на проведения исследования» [6].

Наименование затрат на исследовательскую работу	Сумма, руб.
Фонд заработной платы сотрудников по сварки	3080
Затраты на материал (алюминий)	350
Отчисления на социальные нужды	855
Затраты на электрическую энергию	11
Затраты на оборудование	19,3
Накладные расходы	1694
Общие затраты на проведение исследования	6163,3

Заключение по разделу

Исследованы все полученные затраты на проведение исследования по горению сжатой дуги на токе обратной полярности.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе было проведено исследование теплового состояния плазмотрона на токе обратной полярности, которые можно будет использовать в более современных конструкций плазмотронов.

На основании проведенных исследований эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности с использованием водоохлаждаемого вольфрамового электрода, можно сделать следующие выводы:

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

Мы проводили все эксперименты в Тольяттинском государственном университете в количестве 6 опытов, начиная от 40А заканчивая на 80А, а так же провели два опыта с переменным током 110А. Все эксперименты были засняты на высокоскоростную камеру с разрешением экрана 1920x1080.

Проведенные эксперименты доказали эффективность применения водоохлаждаемого вольфрамового электрода при сварке сжатой дугой на токе обратной полярности.

Развитием данного исследования будет внедрение модернизированных плазмотронов на предприятиях, чтобы получать сведения о повышении стабильности сварки сжатой дугой.

В дальнейшем будут проводится исследования стального неплавящегося электрода для сварки алюминиевых сплавов.

Список используемой литературы

1. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях – учебное пособие, Екатеринбург РГППУ. 2014. С. 144.
2. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Особенности формирования швов при сварке плазменной (сжатой) дугой обратной полярности // Свароч. пр-во.– 1971. – № 9. – С. 25–26
3. 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.
4. Гринюк А. А. и др. Основные тенденции развития плазменно– дуговой сварки алюминиевых сплавов //Автоматическая сварка. – 2015. – №. 11. – С. 39–50.
5. Дедюх Р.И. Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом (обзор) //Сварочное производство. – 2014. – №. 5. – С. 34– 39.
6. 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
7. Лахтин Ю.М., Авиационное материаловедение, Оборонгиз // 1941. – 234 с.
8. Моторин К.В., Сварка точками 3 – х фазной сжатой дугой / К. В. Моторин, Г. М. Короткова // Сварка. Реновация. триботехника : тезисы докладов VIII Уральской научно– практической конференции, Нижний Тагил, 02–03 февраля 2017 года / ответственные редакторы В. А. Коротков, В. Ф. Пегашкин; Министерство образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО
9. 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

10. Овчинников В.В. Научно-технические технологии сварки в производстве объектов транспорта из алюминиевых сплавов // *Научно-технические технологии в машиностроении*. - 2016. - №5. - С. 3-9.

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

12. Патент № 2757877 С1 Российская Федерация, МПК В23К 31/12, В23К 9/32, G01К 17/06. Сварочный калориметр: № 2021102994: заявл. 08.02.2021: опубл. 22.10.2021 / В. П. Сидоров, Д. Э. Советкин, А. В. Мельзитдинова

13. Патент № 144587 РФ МПК В23К 10/00 Плазмотрон электродуговой с дугой косвенного действия / Картелев Д.В., Корнилаев Р.В. 2014.

14. Резник Г.Ю., *Законы диалектики в автомобильном секторе // Металлы мира*. 2003. № 5

15. 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. С. 5–12.

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

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

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

19. Фриндляндер И.Н., под редакцией Е.Хетча. – Аллюминий. Свойства и физическое металловедение: справочник., – М.: Металлургия, 1989. – 328 с.
20. Щицын В. Ю., Язовских В. М. Влияние полярности на тепловложение в сопло плазматрона // Сварочное производство. 2002. № 1. С. 17–19.
21. Щицын Ю. Д., Гилев И. А., Беленин Д. С. Плазменная сварка алюминиевых сплавов при работе двухдугового плазматрона на токе обратной полярности // Вестник ПНИПУ. 2015. № 3. С. 61-70.
22. Frolov V.V. Arc welding of aluminum: a reference textbook // Kharkov – 2003 p 6-10.
23. Rubinchik Y.L. Mechanized welding of hull structures made of aluminum alloys. – L.: Shipbuilding, 1974. – p. 136.
24. Sidorov V.P. The influence of the balance of polarities on the effective arc power during spot plasma welding of aluminum alloys / V.P. Sidorov, D.E. Sovetkin // Bulletin of the Russian State Unitary Enterprise. – 2019. – No. 4. – pp. 26-33.
25. Shchitsyn Yu. D., Kosolapov O. A. Influence of polarity on thermal loads of a plasma torch // Welding production. 1997. No. 3. pp. 23-25.
26. 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.