

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)

Технология сварочного производства и инженерия поверхностей

(направленность (профиль)/специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Исследование эффективности сварки сжатой дугой на токе обратной  
полярности»

Обучающийся

С.С.Самсонов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.Э.Советкин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультанты

к.ф-м.н., Д.А. Романов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

к.э.н., О.М. Сярова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

## **Аннотация**

Выпускная квалификационная работа выполнена на 42 листах и содержит графическую часть выполненную на 6 листах формата А1.

В выпускной работе проведено исследование эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности, с данными о потреблении алюминия и его применении в промышленности. Приводится сравнительный анализ различных методов сварки алюминиевых сплавов, а также влияние рода и формы тока на процесс сварки.

Проведен эксперимент, где для постоянного тока шаг изменения составил 10А в диапазоне 40-80 А, а для переменного тока с балансом 50/50% использовался ток 110 А. Методом калориметрирования получены результаты, свидетельствующие об эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности. Оценена эффективность использования тока обратной полярности по отношению к переменному прямоугольному току. Также выполнен анализ предлагаемых технологических решений для обеспечения безопасности труда. Поставленные в работе задачи были достигнуты.

## **Abstract**

The graduation thesis consists of 42 pages and includes a graphic section executed on 6 sheets of A1 format.

The thesis investigates the efficiency of plasma arc welding using reverse polarity, providing data on aluminum consumption and its industrial applications. A comparative analysis of various welding methods for aluminum alloys is presented, along with the impact of current type and waveform on the welding process.

An experiment was conducted where the step change for direct current was 10A in the range of 40-80A, and for alternating current with a 50/50% balance, a current of 110A was used. Calorimetry results indicated the efficiency of reverse polarity plasma arc welding. The efficiency of using reverse polarity current was evaluated in comparison to alternating rectangular current. Additionally, an analysis of proposed technological solutions to ensure labor safety was performed. The objectives set in the thesis were achieved.

## Содержание

Введение .....	5
1 Состояния вопроса .....	6
1.1 Область применения алюминиевых сплавов .....	6
1.2 Особенности сварки алюминиевых сплавов .....	8
1.3 Способы сварки алюминиевых сплавов .....	9
1.4 Особенности сварки сжатой дугой .....	13
1.5 Роль формы и рода тока на процесс сварки .....	15
1.6 Тепловая эффективность сжатых дуг .....	18
1.7 Задачи работы .....	19
2 Исследование эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности .....	20
2.1 Методика проведения эксперимента .....	20
3 Экономическое обоснование работы .....	28
3.1 Анализ затрат на проведение экспериментов .....	28
4 Экологичность и безопасность объекта исследования .....	34
4.1 Объект и его планировка .....	34
4.2 Описание процесса экспериментов .....	34
4.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	35
4.4 Уменьшения влияния опасных факторов .....	36
4.5 Обеспечение пожарной безопасности .....	36
Заключение .....	38
Список используемых источников .....	39

## Введение

В последнее время, в различных сферах промышленности растёт спрос на алюминий и алюминиевые сплавы [9]. Конструкции из алюминия и алюминиевых сплавов применяются в строительстве, машиностроении, авиастроении, судостроении [13]. Для получения конструкций из алюминия необходимо использование сварки. Основными способами сварки алюминия являются: TIG, LIG, MIG, PAW. Среди электродуговых способов самой производительной является плазменная сварка, доказательством тому служат показатели: тепловложения, скорости сварки и качества сварного шва.

Сварка сжатой дугой (PAW) находит широкое применение в различных отраслях промышленности для сварки разнообразных материалов, таких как алюминий, сталь, медь, титан и другие. Основное преимущество этого метода заключается в высокой концентрации тепла, что способствует значительному увеличению глубины плавления материалов [24].

Сварка алюминиевых сплавов сжатой дугой, обычно ведется на переменном токе, что позволяет эффективно удалять оксидную пленку за счет ее катодного распыления и одновременно снижать тепловую нагрузку на неплавящийся электрод.

Известно, что применение тока обратной полярности повышает тепловую эффективность примерно в 2 раза на 1 А. [15,16]. Разработанный водоохлаждаемый электрод диаметром 3 мм [10], позволяет повысить тепловую нагрузку с 40 до 80 А. Исследований, доказывающие повышение эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности, с применением водоохлаждаемого электрода не проводилось.

Целью работы является исследование эффективности сварки сжатой дугой на токе обратной полярности, с применением водоохлаждаемого вольфрамового электрода.

## **1 Состояния вопроса**

### **1.1 Область применения алюминиевых сплавов**

Сварные конструкции из алюминиевых сплавов ценятся за малую плотность, хорошую коррозионную стойкость, сравнительно высокую электро- и теплопроводность. Используются в различных отраслях, включая автомобильную, авиационную, судостроительную и строительную промышленности.

«В автомобильной промышленности алюминиевый сплав используют в производстве спортивных автомобилей. Из алюминиевых сплавов производятся: радиаторы системы охлаждения двигателя, колесные диски, бампера, детали подвески, блоки цилиндров двигателя, корпуса трансмиссий и, наконец, детали кузова – капоты, двери и даже вся рама»[14].

В авиационной промышленности алюминиевые сплавы используются для производства: обшивки крыла, стоек, стрингеров, балок и других элементов фюзеляжа. Для производства внешней обшивки крыла используется высокопрочный сплав В95(1950). Также используют сплавы марок: 1965-1, 1933, В-1963. Каждый сплав применяется для отдельных деталей, которые испытывают разного рода нагрузки.[19]

В судостроении использование алюминиевых сплавов обусловлено низким весом, но при этом необходимой прочностью, стойкостью к механическим ударам и вибрациям, а также, благодаря, высокой ремонтпригодности и ненужностью в дополнительном защитном покрытии. В частности в судостроении используются алюминиевые сплавы таких марок как: АМг3, АМг5, АМг6, АМц, АМг2.[3]

Рост спроса на первичный алюминий и его общее потребление показаны на рисунках 1,2.



Рисунок 1 – График роста спроса на первичный алюминий.



Рисунок 2 – График потребления алюминия в 2040 году.

Отдел аналитики Газпромбанка сообщает о следующем: спрос на алюминий растёт каждый год, а к в 2040 году прогнозируется, что общее потребление алюминия вырастет на 70%[9].

## 1.2 Особенности сварки алюминиевых сплавов

«Сварка алюминия и его сплавов имеет свои особенности, обусловленные физическими и химическими свойствами этого металла. Алюминий отличается небольшим весом, высокой электро- и теплопроводностью. На его поверхности образуется окисная пленка, которая затрудняет процесс сварки из-за высокой температуры ее плавления в 2050 °С. В то же время, температура плавления самого алюминия около 660 °С.»[1].

«Чтобы предотвратить окисление металла и обеспечить качественное сварное соединение, необходима защита от воздуха. Для этого часто используется сварка в среде аргона.»[1].

«Высокая текучесть алюминия делает управление процессом сварки сложным, а для быстрого охлаждения металла часто применяются теплоотводящие подкладки.»[1].

«Сварочные соединения алюминия и его сплавов подвержены образованию кристаллизационных трещин, особенно при наличии водорода в металле или повышенном содержании кремния.»[1].

«Перед сваркой для получения качественного соединения необходимо удалить окисную плёнку. Существуют три основных метода удаления оксидного слоя с поверхности алюминиевых изделий: механический, химический и физический. Механический метод включает использование щетки или абразивных материалов для механического удаления оксидного слоя. Химический метод осуществляется через травление специальными химическими растворами или флюсами. Физический метод включает в себя сварку деталей с использованием обратной полярности или переменного тока.»[2].



### 1.3 Способы сварки алюминиевых сплавов

«На данный момент существует множество способов сварки алюминиевых сплавов, из них: сварка автоматическая под слоем флюса, трением, контактная, плазменная, ручная дуговая покрытым электродом, ручная и механизированная в среде защитных газов. У каждого из этих способов есть свои плюсы и минусы, соответственно влияющие на качество сварного соединения.»[2].

«TIG (Tungsten Inert Gas) - ручная дуговая сварка с использованием неплавящегося электрода под защитой инертных газов. Дуга зажигается между деталью и вольфрамовым электродом, из газового сопла поступает газ, который защищает сварочную ванну и электрод. Он, в свою очередь, располагается в центре сопла и не плавится. Во время работы газ должен поступать постоянно, без перерывов, иначе могут возникнуть дефекты в структуре шва.» [5] (рисунок 3).

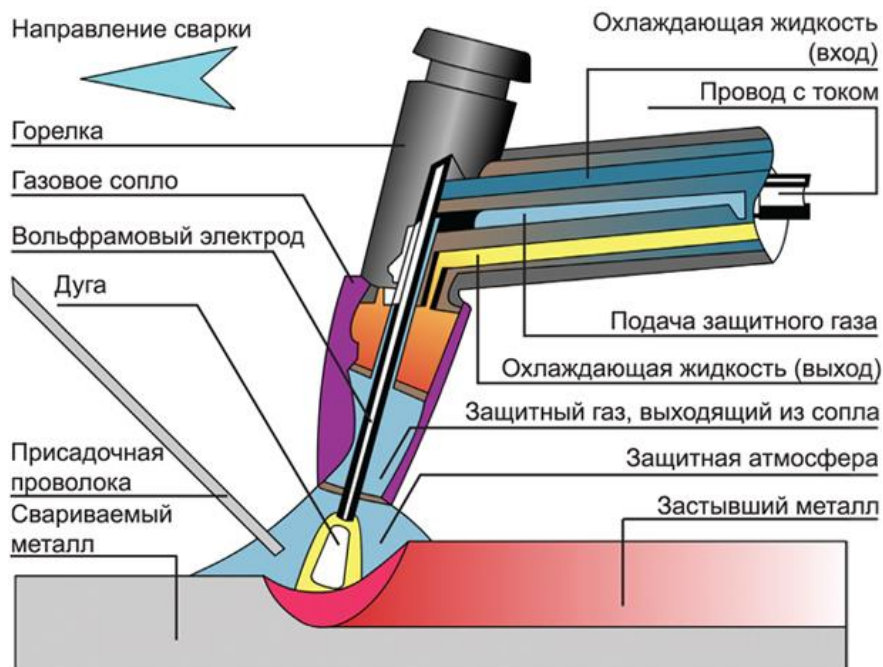


Рисунок 3 – Схема TIG-сварки

LIK (Laser Induced Kludge)сварка - это современная технология сварки, при которой используется концентрированный лазерный луч для соединения материалов, луч плавит металлические частицы на кромках, а лишние элементы испаряются. Ручной лазер показывает наибольшую производительность при малых толщинах (рисунок 4).

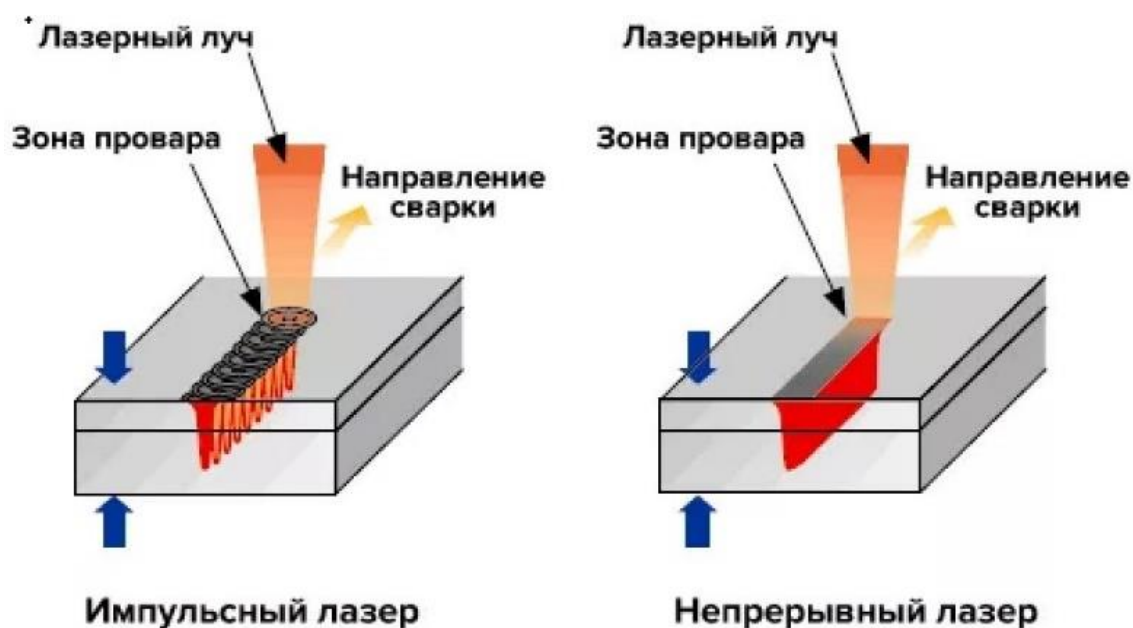


Рисунок 4 – Схема лазерной сварки

«MIG(Metal Inert Gas) сварка – механизированная сварка плавящимся электродом, где используется инертный газ для защиты металла от окружающей атмосферы и обеспечения стабильного процесса сварки»[5].MIG сварка считается одним из самых простых методов сварки для обучения, так как требует меньше навыков по сравнению с методами, такими как TIG-сварка. Она легко автоматизируется, что делает её идеальной для массового производства и позволяет улучшить точность и повторяемость сварочных операций (рисунок 5).

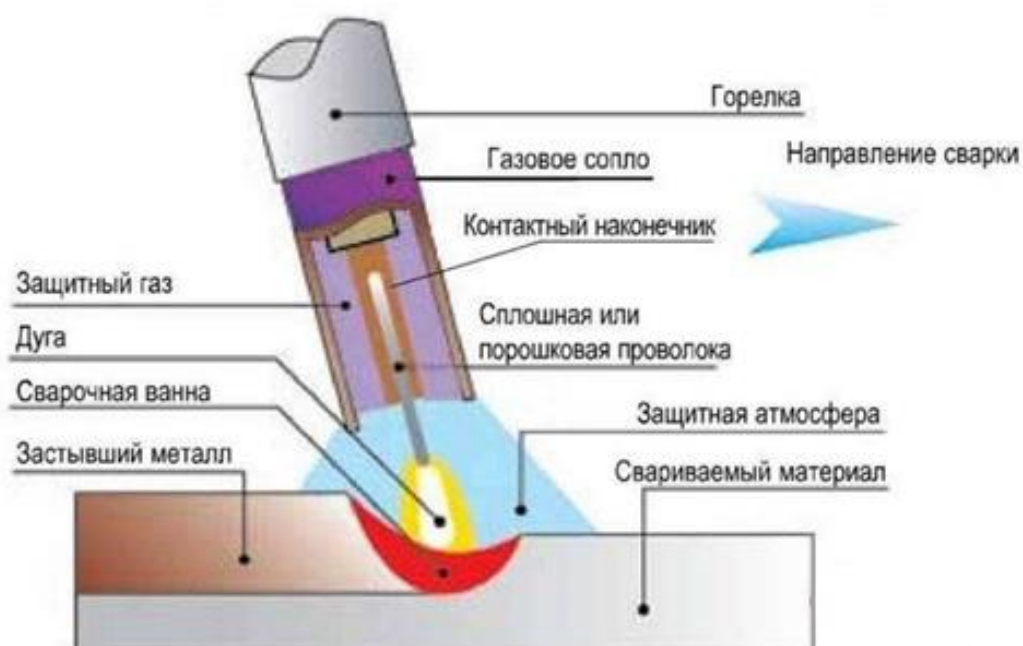


Рисунок 5 – Схема MIG-сварки

«PAW(Plasma Arc Welding)сварка – это сварка плавлением металла, нагрев которого проводится направленным потоком сжатого ионизированного газа.»[5,12] Сжатая дуга создает более высокую температуру, чем другие виды сварки. Это позволяет получать глубокое и узкое проплавление, что необходимо при сварке толстых материалов. PAW сварка позволяет точно контролировать параметры процесса, такие как сила тока, напряжение и скорость подачи. Это обеспечивает стабильное качество сварки и возможность автоматизации процесса. Благодаря высокой концентрации тепла и быстрому прохождению сварочного процесса, уменьшается зона термического влияния, что снижает тепловые искажения и улучшает качество готового изделия (рисунок 6).

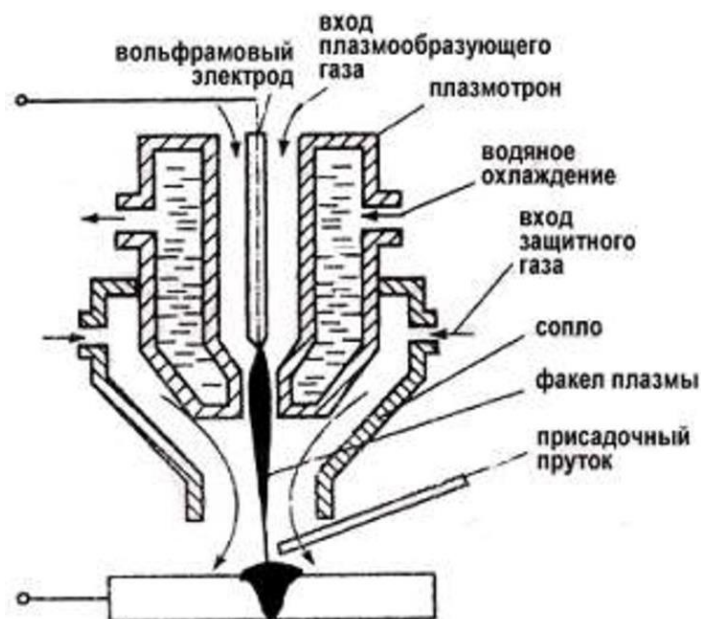


Рисунок 6 – Схема плазменной сварки

Результаты анализа способов сварки сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение способов сварки

Вид сварки	PAW	MIG	LIK	TIG
Соединяемый материал	Все свариваемые материалы	Все типы сталей, алюминий	Все свариваемые материалы	Все свариваемые материалы
Минимальная толщина деталей	От 0,25 мм	От 0,6 мм	От 0,2 мм	От 0,25 мм
Глубина проплавления за один проход	6-10 мм	3,5 мм	4 мм	1-6 мм
Скорость сварки	До 50 м/ч	До 5 м/ч	До 50 м/ч	До 15 м/ч
Загазованность процесса	Средняя	Высокая	Низкая	Высокая
Необходимость зачистки от брызг и шлака	Не требуется	Требуется	Не требуется	Не требуется
Стоимость оборудования	Средняя	Низкая	Очень высокая	Высокая
Стоимость расходников	Средняя	Средняя	Очень высокая	Высокая

Безусловно, все методы подходят для сварки алюминия, но с ростом спроса алюминия растёт и нужда в более производительных способах. Среди перечисленных методов сварки высокой концентрацией тепловложения отличаются ЛК и РАВ сварки, так же они имеют наибольший потенциал автоматизации на производстве, а следовательно производительней [24]. Они лучше удаляют оксидную плёнку и способны сваривать большие толщины за меньшее количество проходов.

Сравнивая электродуговые способы сварки по критериям: качество сварного соединения, глубине проплавления, скорости сварки и количеству тепловложения в изделие, мы увидим, что сварка сжатой дугой лидирует. Тем же самым может похвастаться лазерная сварка, но в отношении стоимости оборудования РАВ сварка гораздо дешевле, а для питания подойдёт маломощный источник. Со стороны экономической выгоды сварка сжатой дугой более предпочтительна.

#### **1.4 Особенности сварки сжатой дугой**

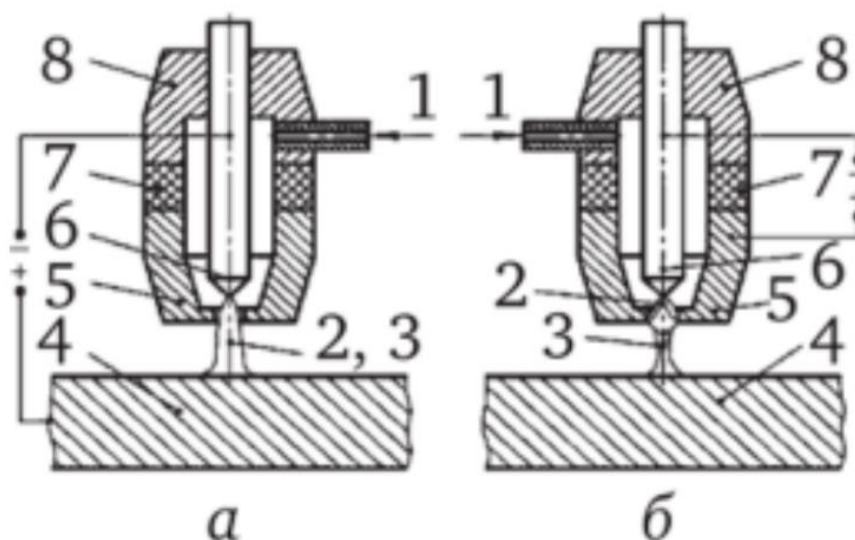
Хоть и РАВ сварка во многих аспектах лучше других способов, но имеет роковой недостаток – стойкость вольфрамового электрода. Сварку алюминия на прямой полярности не ведут по причине наличия оксидной плёнки. Температура плавления оксидной плёнки в разы больше, по этому на прямой полярности возможно расплавить только материал под плёнкой. В этом случае применяется обратная полярность. «При обратной полярности поток заряженных частиц выбивает атомы из поверхности материала и плёнка разрушается – это называется катодным распылением.» [5]. Но когда на электроде установлен минус, он получает слишком много тепла и даже вольфрамовый электрод разрушается. Во избежание этого используют переменный ток с различным балансом полярностей. Применение обратной полярности ограничено 40 А [4]. Моё исследование направлено на изучение поведения обратной полярности на токах от 40 до 80 А. Это стало

возможным с помощью [10] и специальной конструкции плазмотрона направленного на охлаждение электрода, а не сопла.

Сварка сжатой дугой на обратной полярности имеет «ряд преимуществ (высокий эффективный КПД нагрева, локальность нагрева, возможность активного управления мощностью дуги) обеспечивает повышение производительности процессов сварки в 2–3 раза; снижение затрат на механическую обработку при подготовке стыков под сварку и обработку швов после сварки в 3–5 раз; снижение расхода сварочных материалов в 3–5 раз; обеспечение возможности 100%-ной автоматизации процессов [22]» [21].

«Кроме того, мощная катодная очистка металла в процессе плазменной сварки на обратной полярности обеспечивает получение качественных сварных швов при снижении требований к подготовке металла под сварку [12, 23]» [21].

Для сварки сжатой дугой используются специальные устройства – плазмотроны. В качестве плазмообразующего газа обычно используют аргон, азот, гелий, водород, воздух и их смеси, а также воду (в плазмотронах с водяной стабилизацией). «Плазмотроны, используемые для сварки на прямой полярности, компактные и не требуют интенсивного охлаждения...»[12].



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

Рисунок 7 – Схема сварки сжатой дугой[6]

«По сравнению с переменным током, сварка на постоянном токе с обратной полярностью более проста в реализации и может использовать обычные сварочные источники питания»[7]. Однако, при этом методе выделяется более значительное количество тепла, что оказывает воздействие на неплавящийся электрод и сжимающее сопло, сокращая их срок службы.

### **1.5 Роль формы и рода тока на процесс сварки**

Форма тока, а именно переменный или постоянный, определяет способ передачи энергии на металл и формирование сварного шва. Например, постоянный ток характеризуется стабильным напряжением и током, что делает его более удобным для работы с различными материалами и позволяет лучше контролировать процесс. С другой стороны, переменный ток может обеспечить более глубокое проникновение в металл и улучшить качество сварного шва [26].

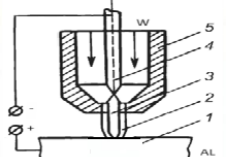
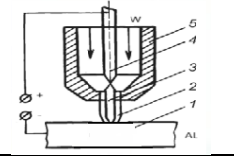
«Для переменного тока характерна частота. Электроны, которые движутся с определенной частотой, также могут менять и свое направление.»[7].

«Для постоянного тока характерно упорядоченное перемещение электронов, без колебания частот и напряжения. Заряженные частицы перемещаются от минуса к плюсу, что позволяет выигрышно использовать данное свойство постоянного тока в сварке»[7].

Полярность представляет собой ориентацию движения заряженных частиц. Изменение клемм на сварочном аппарате позволяет изменить полярность и, таким образом, настроить режим сварки.

В таблице 2 приведены схемы для сварки на прямой и обратной полярности, как на постоянном, так и на переменном токе

Таблица 2 - Схема включения плазмотронов

	Постоянный	Переменный
<p>Прямая</p> 	Низколегированные стали и легированные стали с высоким проплавлением	Алюминиевые сплавы, деформируемые и литые с высоким проплавлением
<p>Обратная</p> 	Сварка с повышенной скоростью алюминиевых сплавов	Алюминиевые сплавы, деформируемые и литые с высоким проплавлением

Кроме того, существуют и другие, достаточно видимые отличия, а именно: имеется вероятность обрыва тока в момент перехода через ноль; стабильность горения сварочной дуги ниже, чем при использовании постоянного тока; расход электродов при сварке на переменном токе выше.

Переменный ток с синусоидальной формой волны обеспечивает эффективное чередование положительной и отрицательной полярности, что способствует лучшему пробиванию оксидных пленок на поверхности металлов, таких как алюминий, и улучшает качество сварного шва (рисунок 8).

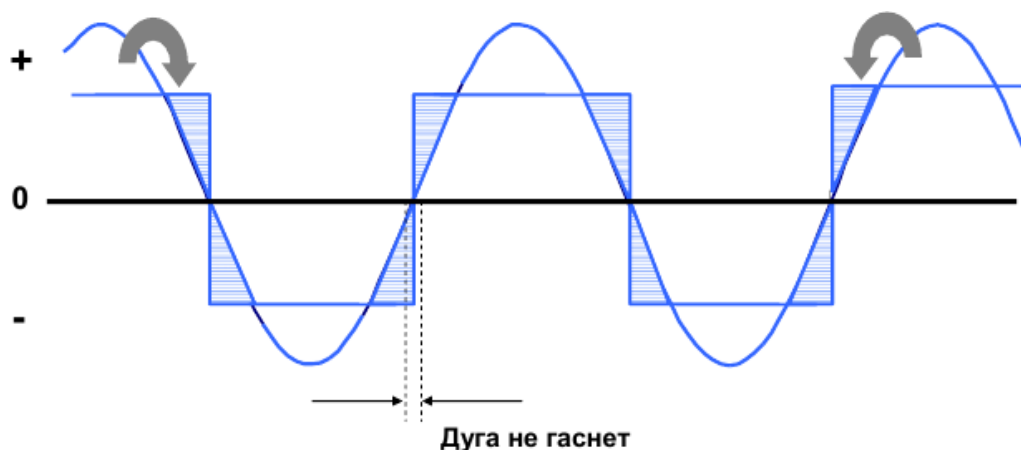


Рисунок 8 – График сварки сжатой дугой на переменном токе с синусоидой

Недостатком сварки на переменном токе с синусоидальной формой тока является возможность возникновения аварийного режим. При



аварийном режиме сварочная дуга горит сначала на сопло потом на изделие, тем самым приводя сопло в негодность[25]. Также недостатком является нестабильность дуги при переходе через нуль. Чтобы дуга не прерывалась, используют дополнительное оборудование: осцилляторы и стабилизаторы.

Сварка на прямоугольном токе — это метод сварки, использующий для питания сварочной дуги ток с прямоугольной формой волны. Главное отличие прямоугольной формы тока это резкий переход через нуль, это обеспечивает стабильность сварочной дуги[18].

Прямоугольный ток характеризуется постоянной амплитудой в течение каждого полупериода, что отличает его от синусоидального тока, амплитуда которого изменяется по синусоидальному закону.

Для сварки на прямоугольном токе требуется специализированное сварочное оборудование, способное генерировать и поддерживать стабильный прямоугольный ток.

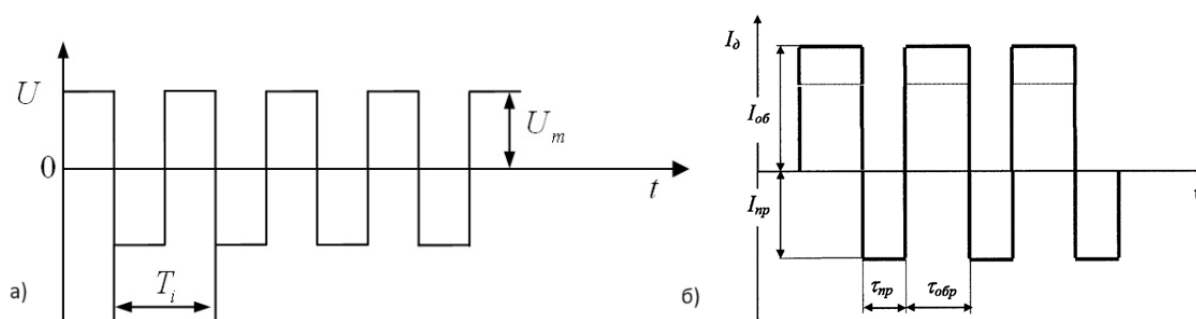


Рисунок 9 – Варианты настройки параметров импульса при сварке на прямоугольном переменном токе

Этот метод сварки отличается от других тем, что не требует использования осциллятора для стабилизации дуги, обеспечивает беспроблемный переход между полярностями, сохраняя стабильность дуги,

что способствует более эффективному процессу сварки[27]. Также плюсом является «возможность изменения прямоугольных импульсов тока для регулировки времени и интенсивности тока на прямой или обратной полярности.» [15]. Плазмотроны, предназначенные для сварки переменным током с разнополярными прямоугольными импульсами тока, могут иметь существенные отличия в конструкции[28]. «При сварке алюминиевых сплавов необходимо использование обратной полярности, что приводит к увеличению теплового воздействия на электрод и сопло плазмотрона. Применение регулируемых прямоугольных импульсов позволяет управлять долей обратной полярности, обеспечивая эффективное удаление оксидной пленки и снижение тепловой нагрузки на плазмотрон.» [15].

### **1.6 Тепловая эффективность сжатых дуг**

«Известно, что тепловая эффективность сжатой дуги на токе обратной полярности выше примерно в 2 раза на 1 А [16,17]. Это означает, что мощность вкладываемая в изделие током обратной полярностью в 40 А, равна мощности вкладываемой в изделие прямой полярностью в 80 А. Авторами [10] разработан водоохлаждаемый электрод позволяющий увеличить тепловую нагрузку с 40 А до 80 А для диаметра электрода 3 мм. Однако, исследований доказывающие повышение эффективности при плазменной сварки на токе обратной полярности с водоохлаждаемым электродом не производилось.»[20].

В настоящее время известно допустимая плотность тока на выпускаемые неплавящиеся электроды (таблица 3).

Таблица 3 – допустимая плотность тока на вольфрамовый электрод[4]

Род тока	Диаметры W электрода					Полярность
	1-2 мм	3 мм	4 мм	5 мм	6 мм	
-	1-2 мм	3 мм	4 мм	5 мм	6 мм	-
-	Допустимая плотность тока $j_w$ А/мм <sup>2</sup>					-
I~	25,6 - 28,8	17,1 – 21,1	13,8 - 19	10,2 – 13,8	8,9 – 12,45	-
I=	12,8	3–4	2.4–3,6	2,3–3,6	2,1 – 3,5	W <sup>+</sup> – Al <sup>-</sup>
		11				W <sub>охл</sub>
I=	19,2	19,7 -32, 5	22,2 – 25,6	9,4 – 11,8	12, 9 - 15	W <sup>-</sup> Al <sup>+</sup>

Из приведённых в таблице 3 данных следует, что допустимая плотность тока при сварке диаметром 3 мм составляет 3-4 А/мм<sup>2</sup>, тогда как охлаждаемый вольфрамовый электрод допускает плотность тока до 11 А/мм<sup>2</sup>.

Применение водоохлаждаемого электрода позволяет повысить плотность тока до 11 А/мм<sup>2</sup>, что расширяет технологические возможности способа сварки.

Анализируя способы сварки сжатой дугой, можно сделать вывод о том, что сварка сжатой дугой на токе обратной полярности представляет собой эффективный метод соединения металлических деталей, который требует детального изучения.

### 1.7 Задачи работы

Исследование эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности включает в себя следующие задачи.

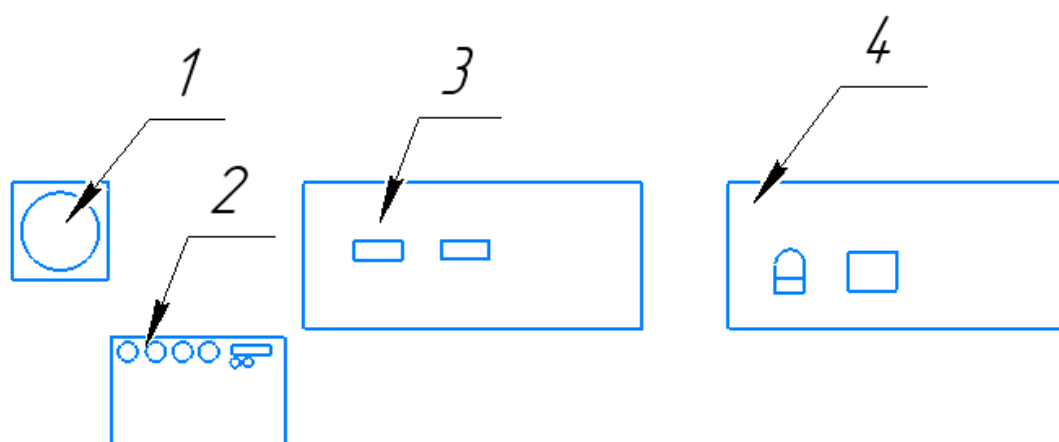
1. Провести эксперименты по оценке эффективной мощности сжатой дуги обратной полярности, при работе плазмотрона с водоохлаждаемым электродом.

2. Провести оценку эффективности использования тока обратной полярности по отношению к переменному прямоугольному току.

## 2 Исследование эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности

### 2.1 Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводился в лаборатории Тольяттинского государственного университета на кафедре «сварка, обработка металлов давлением». В лаборатории находится стенд плазменной сварки, он используется для тестов прототипа (рисунок 10).



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

Рисунок 10 – схема размещения оборудования на сварочном стенде

В работе [10] предложен электрод позволяющий увеличить планку допустимых токов. На основе этого изобретения был разработан специальный плазмотрон на основе FY-A200H(рисунок 11, 12,13,14).

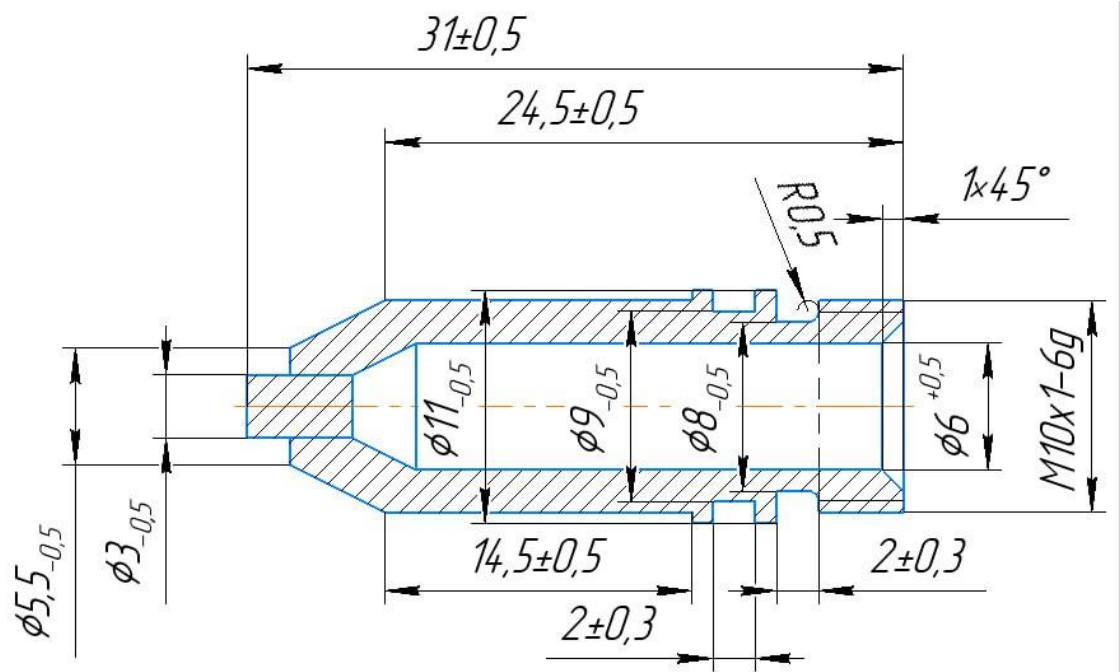
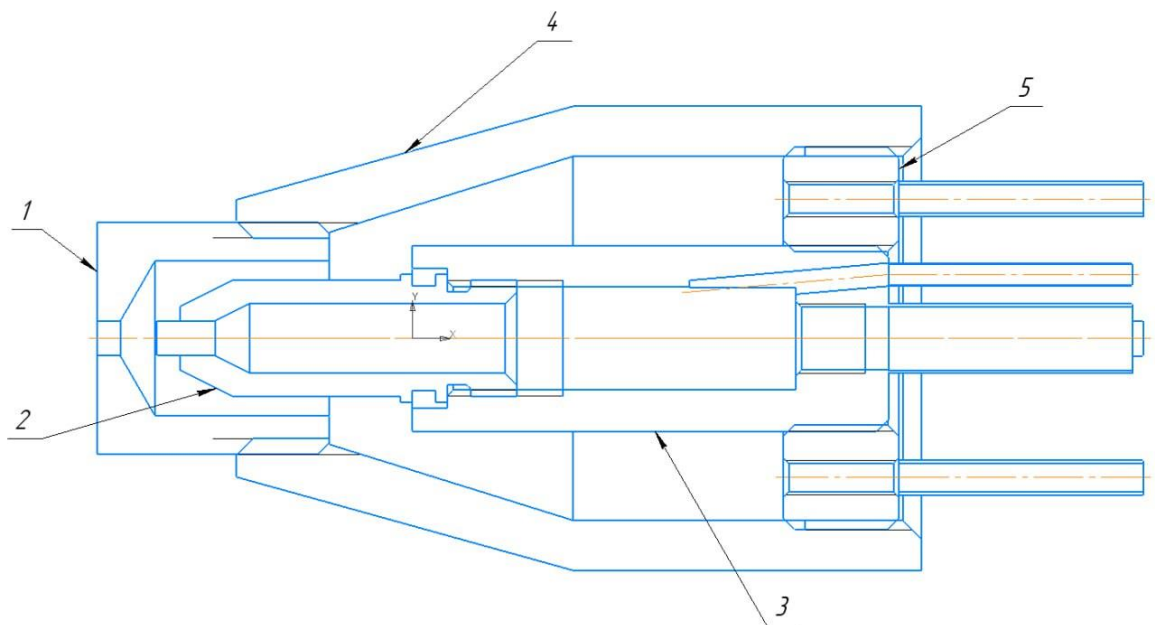


Рисунок 11 – чертёж водохлаждаемого электрода



1–сопло; 2–электрод ;3 – контур системы подачи газа; 4 –корпус плазмотрона; 5 – контур системы охлаждения

Рисунок 12 – чертёж плазмотрона

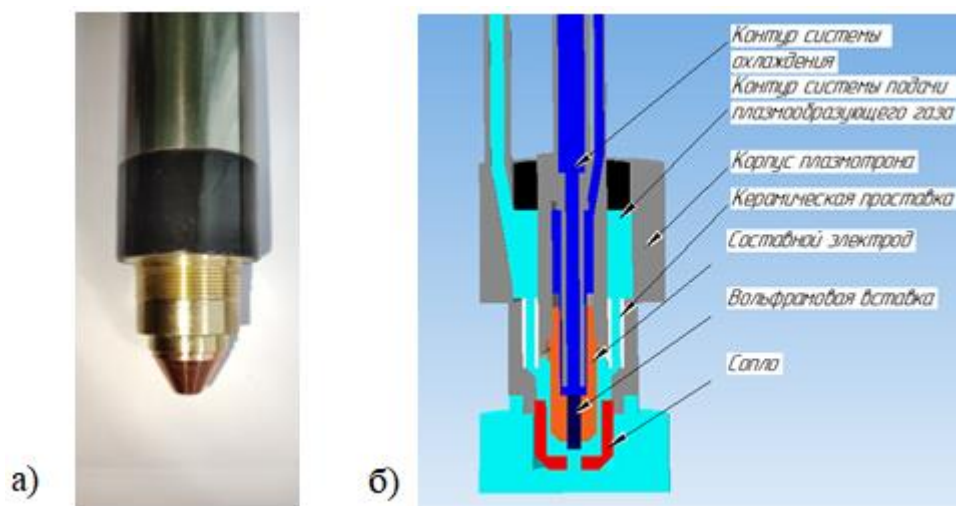
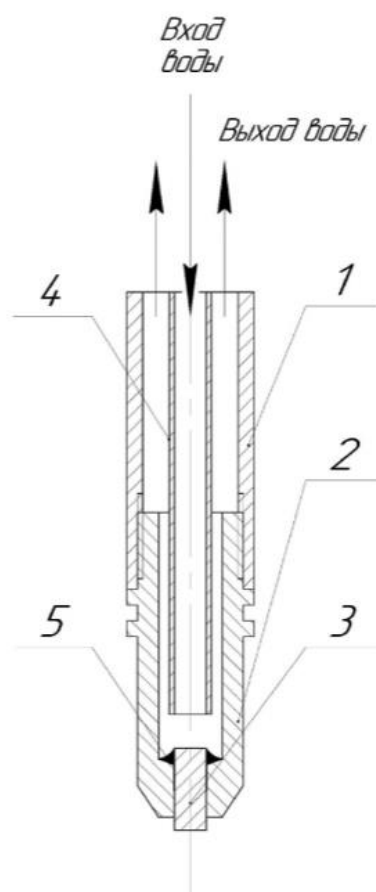


Рисунок 13 – а) модернизированный плазматрон в сборе, б) 3Д модель модернизированного плазматрона



1 – цанга; 2 – медный наконечник; 3 – вольфрамовая вставка; 4 – водоохлаждаемая трубка; 5 – паяное соединение

Рисунок 14 – Водоохлаждаемый электрод [10]

Перед проведением эксперимента необходимо провести подготовительные работы.

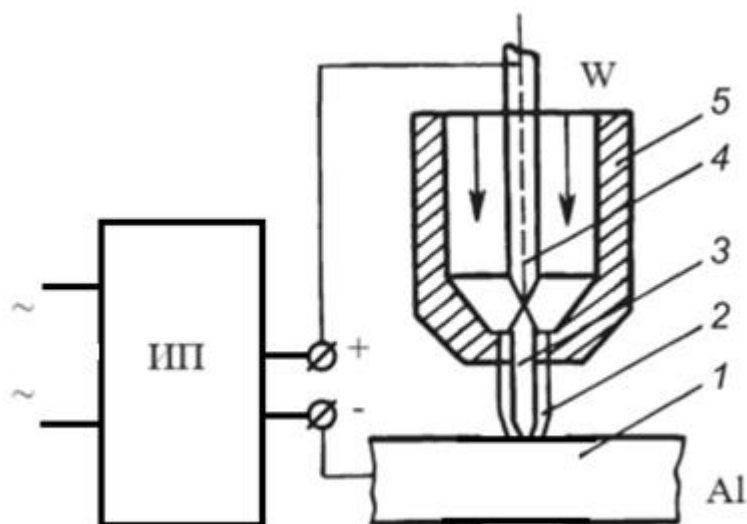
Образцы из себя представляют пластины размером 120 на 30 мм толщиной 5 мм из алюминиевого сплава АМг-6. Необходимо проверить, чтобы на пластинах не было органических загрязнений и неровностей. Загрязнения удаляются ацетоном и ветошью, а неровности и шероховатости - абразивным инструментом.

После этого нужно выставить правильное расстояние между образцом и электродом с точностью до 1 мм. От этого зависит длина дуги и её стабильность.

На источнике питания (рисунок 16) нужно установить режим сварки. Сварку на постоянном токе производили с шагом 10А в диапазоне 40-80 А. На переменном токе с балансом 50/50% использовали ток 110 А.

Во время эксперимента, засекается время сварки секундомером, оно нужно для определения эффективной мощности.

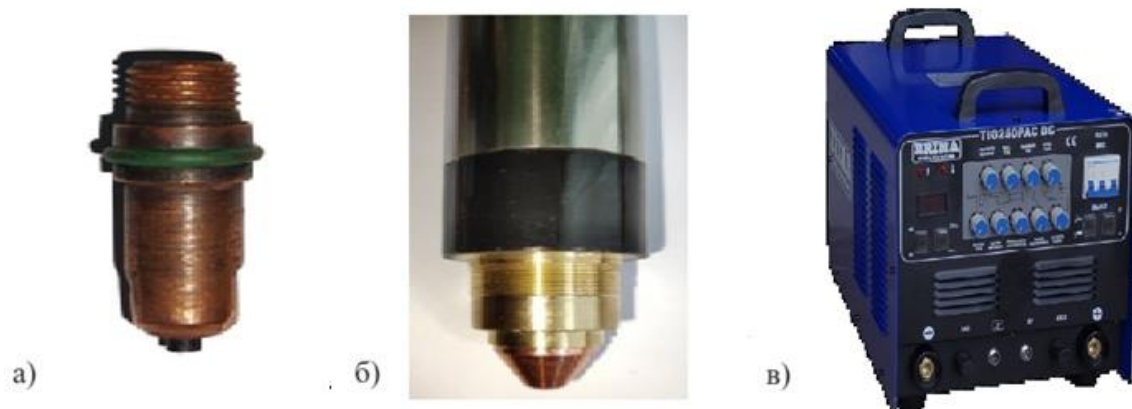
Для сварки алюминиевых сплавов точками сжатой дугой обратной полярности собирался специальный сварочный пост (рисунок 15)



1 – алюминиевый сплав; 2 – защитный газ; 3 – сжатая дуга; 4 – охлаждаемый вольфрамовый электрод; 5 – сопло; w–вольфрамовый электрод; ИП – источник питания постоянного тока

Рисунок 15–Сварочный пост для сварки сжатой дугой обратной полярности

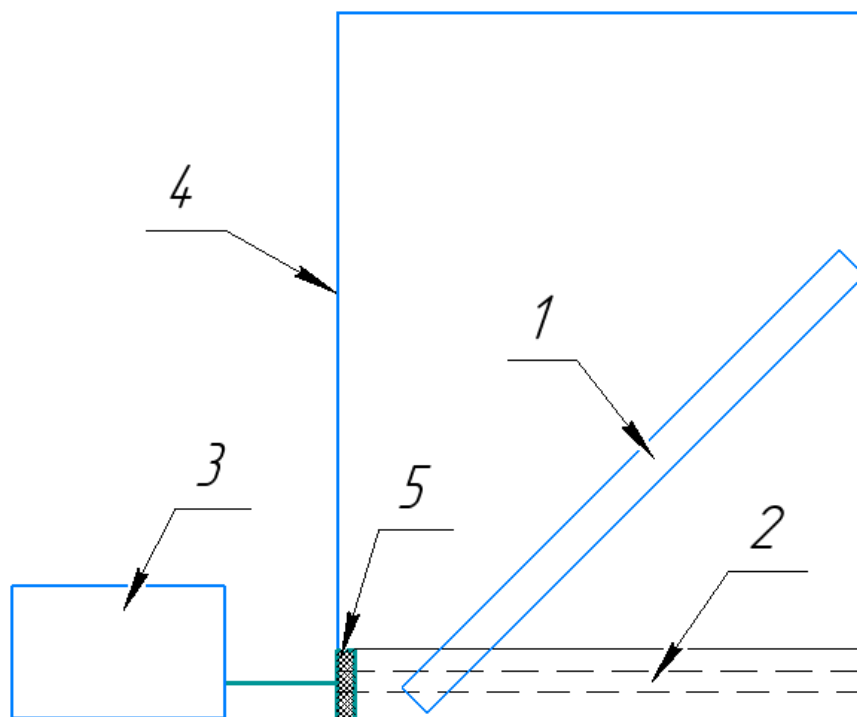
В состав сварочного поста входит источник питания BRIMA TIG 250P AC/DC, в качестве инструмента для сварки используем плазмотрон модернизированный FY-A200H с водоохлаждаемым электродом [10]. Комплект оборудования представлен на рисунке 16



а) водоохлаждаемый электрод; б) плазмотрон; в) источник питания

Рисунок 16 – Комплект оборудования

Оценку эффективности тепловложения производили методом калориметрирования по методике, описанной в работе [11].



1 - сварочный образец; 2 - вода; 3 - откалиброванная термопара; 4 – корпус; 5 – датчик термопары

Рисунок 17 – Схема сварочного калориметра[11]



Принцип калориметрирования заключается в том, чтобы определить количество теплоты, поглощаемое водой от нагретой в процессе сварки пластины.

«Для этого в калориметре (рисунок 17), устанавливается термопара, которая измеряет температуру жидкости. При опускания пластины в калориметр вода нагревается, зная объем воды и ее изменение температуры, можно определить количество тепловой энергии переданной пластиной в воду по формуле» [11].

$$Q_w = M_w \cdot c_w (T_{wk} - T_{w0}). \quad (1)$$

«где  $M_w$  - масса воды в калориметре, г,

$c_w$  - удельная теплоемкость воды, Дж/(г·°C),

$T_{w0}$  - температура воды перед помещением сварочного образца в сосуд калориметра, °C,

$T_{wk1}$  - температура воды после выравнивания температуры в сосуде калориметра с учетом поправки на теплоотдачу от калориметра в окружающую среду за время выравнивания температуры воды, °C.»[11].

Сразу после зажигания дуги стартует отсчет времени. По завершении сварки образец помещается в калориметр. Регистрируется максимальная температура воды в калориметре. Образец извлекается и взвешивается вместе с калориметром. Все полученные данные записываются. Эксперименты производили с шагом 10 А в диапазоне 40-80 А. На переменном токе с балансом 50/50% использовали ток 110 А, в.

В таблице 4, представлены значения изменения эффективной мощности дуги при сварке сжатой дугой током обратной полярности. В таблице 5 представлены результаты эффективной мощности сжатой дуги на переменном токе с балансом полярностей 50/50, для тока 110 А.»[20]

Таблица 4 – «Изменение эффективной мощности дуги при сварке сжатой дугой обратной полярностью от водоохлаждаемого электрода» [20]

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

Таблица 5 – «Изменение эффективной мощности дуги при сварке сжатой дугой на переменном токе 110 А»[20]

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

Таким образом, «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 сварки ввиду возможного образования аварийного режима сварки и выхода сжимающего сопла из строя, это в свою очередь приводит к снижению производительности процесса или изменению плотности распределения теплового потока по причине вынужденного увеличения диаметра сжимающего сопла.

Что же касается теплового состояния плазмотрона, можно сделать вывод, что система охлаждения электрода, проще и компактней, чем система охлаждения сжимающего сопла. Учитывая хорошую сходимость математических расчетов с экспериментом, методика предложенная в работе [18] может быть использована для проектирования плазмотронов без водоохлаждаемого сжимающего сопла.» [20].

## **Выводы по использованию сварки на обратной полярности сжатой дугой точками**

В результате проведённых исследований по определению эффективности сварки сжатой дугой на обратной полярности установили, что в качестве источника питания рекомендуется использовать инверторы, пульсация которых менее 0,2%. В качестве инструмента сварки рекомендован плазматрон типа FY-A200H, который доработан для использования водоохлаждаемого вольфрамового электрода, с помощью которого плотность тока увеличена для  $d_w$  до 11 А/мм<sup>2</sup>.

Эксперименты по определению эффективности сжатой дуги показали, что величина эффективной мощности при сварке на токе от 40 до 80 достигает 1530 Вт, что значительно больше, чем при сварке сжатой дугой на переменном токе.

### 3 Экономическая обоснование работы

#### 3.1 Анализ затрат на проведение экспериментов

Чтобы рассчитать экономическую выгоду, нужно ввести исходные данные. Эти данные представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатель	Условные обозначения	Единица измерения	Проект
Цена основного материала	$C_m$	р/кг	250
Дневная ставка участника НИР	$C_m$	Р	600
Коэффициент премиальных доплат	$K_{пр}$	-	1,4
Норма отчисления на социальные нужды	$H_{соц}$	%	30
Суммарная стоимость проектного оборудования	$C_{об}$	Р	80300
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	9,18
Норма отчислений на текущий ремонт оборудования	$H_{т,р}$	%	15,6

Произведем расчет экономической эффективности с учетом текущих затрат.

«Расчет текущих затрат производится по следующей формуле»[8]:

$$Z_{\text{тек}} = 3M + \Phi 3П + O_{\text{с.н}} + Z_{\text{э-э}} + Z_{\text{об}} + Z_{\text{пр}} + НР, \quad (1)$$

Где «3M – фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная платно научно-технического персонала)» [8];

« $O_{\text{с.н}}$  - отчисления на социальные нужды» [8];

« $Z_{\text{э-э}}$  - затраты на электроэнергию для выполнения исследований» [8];

« $Z_{\text{об}}$  - затраты, связанные с эксплуатацией оборудования» [8];

« $Z_{\text{пр}}$  - 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)» [8];

«Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле» [8]:

$$3M = 3M_{\text{осн}} + 3M_{\text{всп}}, \quad (2)$$

« $3M_{\text{осн}}$  - затраты на основной материал» [8];

« $3M_{\text{всп}}$  - затраты на вспомогательный материал» [8].

«Затраты на основной материал рассчитываются по формуле» [8]:

$$3M_{\text{осн}} = Н_p \cdot Ц_m \cdot U, \quad (3)$$

где « $Н_p$  - норма расхода основного материала на один образец для испытаний» [8];

« $Ц_m$  - оптовая цена 1 кг основного материала» [8];

« $U$  - количество образцов, шт.» [8];

«Затраты на вспомогательный материал укрупнено принимаем равными 20% от затрат на основной материал» [8]:

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

Оптовая цена на алюминиевый сплав АМг-6 за 1 килограмм составляет 250 рублей. Данные получены из интернета.

$$ЗМ_{осн} = 0,1 \cdot 250 \cdot 10 = 250 \text{ руб}$$

$$ЗМ_{всп} = 0,2 \cdot 250 = 50 \text{ руб.}$$

$$ЗМ = 250 + 50 = 300 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату научно– технического персонала:

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

«ЗПЛ<sub>осн</sub> - основная заработная плата научно– технического персонала»[8];

«ЗПЛ<sub>доп</sub> - дополнительная заработная плата научно– технического персонала» [8].

«Основная заработная плата вычисляется по формуле» [8]:

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

« $\sum T_{раб}$  - суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях)» [8];

« $C_d$  - дневная ставка каждого участника НИР, руб.» [8];

« $K_{пр}$  - коэффициент премиальных доплат (можно принять =1,4)» [8];

«И- количество исполнителей на каждом этапе, чел» [8].

$$ЗПЛ_{осн} = 2 \cdot 600 \cdot 1,4 \cdot 1 = 1680 \text{ руб.}$$

«Дополнительная заработная плата определяется по формуле» [8]:

$$ЗПЛ_{доп} = 0,1 \cdot ЗПЛ_{осн}$$

$$ЗПЛ_{доп} = 0.1 \cdot 1680 = 168 \text{ руб.}$$

$$\PhiЗП = 1680 + 168 = 1848 \text{ руб.}$$

«Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле» [8]:

$$O_{\text{с.н}} = \frac{N_{\text{соц}} \cdot \PhiЗП}{100}, \quad (7)$$

где « $N_{\text{соц}}$  – норма отчислений на социальные нужды = 30%» [8]

$$O_{\text{с.н}} = \frac{30 \cdot 1848}{100} = 554,4 \text{ руб.}$$

«Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний» [8]:

$$З_{\text{э-э}} = \frac{M_{\text{об}} \cdot t_{\text{исп}}}{\eta} \cdot Ц_{\text{э-э}}, \quad (8)$$

где « $M_{\text{об}}$  - мощность оборудования (6 кВт)» [8];

« $t_{\text{исп}}$  - время проведения испытаний, час» [8];

« $\eta$  - коэффициент полезного действия оборудования (0,85)» [8];

« $Ц_{\text{э-э}}$  - цена 1 кВт·часа электроэнергии = 9,18 руб.» [8].

$$З_{\text{э-э}} = \frac{6 \cdot 0,4}{0,85} \cdot 9,18 = 26 \text{ руб.}$$

Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:

$$З_{\text{об}} = A_{\text{об}} + P_{\text{т.р}}, \quad (9)$$

где « $A_{\text{об}}$  - амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования» [8];

« $P_{\text{т.р}}$  - расходы на текущий ремонт оборудования» [8];

Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле:

$$A_{\text{об}} = \sum Ц_{\text{об}} \cdot \frac{N_{\text{а}} \cdot t_{\text{исп}}}{\Phi_{\text{эф}} \cdot 100}, \quad (10)$$

где « $N_{\text{а}}$  - норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 %» [8];

« $\sum C_{об}$  - суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб.» [8];

« $\Phi_{эф}$  - эффективный фонд времени работы оборудования (можно принять равным 1903 часа)» [8];

« $t_{исп}$  - время проведения испытаний, час.» [8].

Стоимость используемого оборудования приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Наименование и цены оборудования

Наименование оборудования	Цена, руб.
Сварочный пост	72800
Конструкция проектного плазмотрона	7500

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

«Расходы на текущий ремонт оборудования» [8]:

$$P_{т.р} = \sum C_{об} \cdot \frac{N_{т.р} \cdot K_3}{\Phi_{эф} \cdot 100} \quad (11)$$

«где  $N_{т.р}$  – норма отчислений на текущий ремонт оборудования

(принимая равной 35%)» [8];

« $K_3$  - коэффициент загрузки оборудования» [8].

$$K_3 = \frac{n_{об.расчет.}}{n_{об.прин.}} \quad (12)$$

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

$$P_{т.р} = \frac{80300 \cdot 35 \cdot 1}{100 \cdot 1903} = 14,8 \text{ руб.}$$

$$Z_{об} = 14,8 + 3,7 = 18,5 \text{ руб.}$$



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

$$Z_{\text{пр}} = 0,05 \cdot \text{ФЗП}$$

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

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

$$\text{НР} = 0,55 \cdot \text{ФЗП}$$

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

Для проведения опытов не нужно приобретать дополнительное оборудование, так как, на кафедре есть всё необходимое.

### **Заключение по экономическому разделу**

Результаты расчета экономической эффективности для эксперимента приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Список затрат на проведение исследования

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Затраты на материал	300
Фонд заработной платы	1848
Отчисления на социальные нужды	554,4
Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний	26
Затраты на оборудование	18,5
Прочие затраты	92
Накладные расходы	1016
Общие затраты на проведение работы	3854,9

Небольшой размер общих затрат подтверждают, что сварка сжатой дугой довольно экономный метод сварки.

## **4 Экологичность и безопасность объекта исследования**

Объектом исследования является сварка сжатой дугой алюминиевых сплавов неплавящимся водоохлаждаемым электродом в среде защитного газа аргона.

### **4.1 Объект и его планировка**

Исследование было проведено в лаборатории кафедры "Сварка, обработка металлов давлением и смежные процессы" Тольяттинского государственного университета с целью подтверждения эффективности использования электрода с системой водяного охлаждения.

### **4.2 Описание процесса экспериментов**

Сварку вели на постоянном токе обратной полярности на плазмотроне с геометрическими размерами сопла,  $d_{сп}$  длина канала сопла, расстояние до изделия, общая длина дуги принцип изменения тока сварки. Технологический процесс исследования начинается с подготовки заготовок из АМг-6 толщиной 3 мм размерами 120 на 30 мм. Перед сваркой необходимо обработать образец абразивным инструментом и обезжирить поверхность с применением ацетона и ваты. Готовый образец фиксируется на сварочном столе. На источнике питания устанавливаются требуемые параметры тока. У сопла плазмотрона закреплена термопара для получения температурных данных о состоянии сопла в процессе сварки. Измеряется температура воды в калориметре. Затем взвешивается калориметр и образец. Во время сварки, за 5 секунд до зажигания дуги, начинается видеофиксация процесса. Наблюдение ведется за дугой и термопарой. Сразу после зажигания дуги стартует отсчет времени. По завершении сварки образец помещается в калориметр. Регистрируется максимальная температура воды в калориметре. Образец извлекается и взвешивается вместе с калориметром. Все полученные данные записываются. Для проведения следующего

эксперимента необходимо изменить параметры тока. После получения всех экспериментальных данных опыт считается завершённым.

### 4.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

В процессе исследования неизбежно могут возникнуть опасные факторы, способные вызвать травмы и негативно сказаться на здоровье участников, проведением научной работы.

Проведем анализ и опишем вредные факторы, выявленные в ходе нашего исследования в таблице 9.

Таблица 9 – Анализ опасных и вредных факторов

Операции	Источник опасности	Факторы
Обработка образцов	напильник, ацетон	Опасность повреждения рук при работе, горючие вещества
Сварка образцов	Ацетон, баллон с защитным и плазмообразующим газом (Аргон), плазматрон FУ-А200Н	Искры; Брызги; Задымление; Излучение;

В процессе выполнения подготовительных и сварочных работ, присутствуют следующие неблагоприятные и токсичные факторы:

- Вредные вещества, содержащиеся в сварочном аэрозоле, включая твердые частицы и газообразные компоненты;
- Интенсивное оптическое излучение от сварочной дуги, включая ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения;
- Высокое напряжение и высокая температура;
- Искры, брызги расплавленного металла и шлака;
- электромагнитные поля;

#### 4.4. Уменьшения влияния опасных факторов

После анализа различных потенциально опасных факторов в таблице 9 необходимо предоставить план действий по их снижению. Результаты запишем в таблицу 10.

Таблица 10 – Уменьшения опасных факторов

Операции	Факторы	Мероприятия
Обработка образцов (шлифовка)	Опасность повреждения рук при работе, горючие вещества	Спецодежда; Инструктаж работников; Размещение плакатов по технике безопасности.
Сварка сжатой дугой алюминиевых сплавов	Искры; Брызги; Задымление; Излучение.	Размещение плакатов по технике безопасности; Организация сварочного места для эксперимента; Вытяжка воздуха; Спецодежда.

В процессе работы было выявлено, что при сварке сжатой дугой может произойти возгорание. Необходимо определить по предотвращению пожара (таблица 11).

#### 4.5 Обеспечение пожарной безопасности

На объекте выявлен риск появления пожара, возможные меры по обеспечению пожарной безопасности представлены в таблице 11.

Таблица 11 — Меры по обеспечению пожарной безопасности

Первичные средства пожаротушения	Пожарное оборудование	Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре	Пожарные сигнализация, связь и оповещение.
Пожарный ящик с песком, огнетушитель	Щит пожарный, шкаф пожарный с рукавом	Огнестойкий защитный костюм; Кожаный фартук; Кожаные рукавицы; Гетры; Защитная обувь;	Кнопка пожарной сигнализации

Из-за малых масштабов стенда данных мер по пожарной безопасности должно хватить, чтобы минимизировать потенциальный ущерб. Для предотвращения пожаров необходимо проводить регулярные инструктажи по пожарной безопасности для участников, обучать их использованию огнетушителей и других средств пожаротушения. Кроме того, необходимо регулярно проводить технические проверки и обслуживание огнетушителей, пожарных тревожных систем и другого оборудования.

### **Заключение по разделу**

Анализируя возможные опасности, связанные с подготовкой и сваркой было выявлено, что это может привести к рискам для здоровья работников. Приняты меры для обеспечения безопасности во время эксперимента, соблюдение которых поможет избежать травм и ущерба здоровью. Планируемые методы не требуют значительных финансовых вложений, так как все необходимое оборудование уже имеется их не нужно будет покупать.

## Заключение

В выпускной квалификационной работе был проведён анализ актуальности темы, темпа роста алюминиевой промышленности и способов его сварки. Исследованы возможные риски и затраты при проведении эксперимента.

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

Исследования показали, что применение водоохлаждаемого электрода позволяет значительно повысить плотность тока до 11 А/мм<sup>2</sup>. Это предоставляет возможность улучшить эффективность сварочного процесса.

Эффективность сварки сжатой дугой на токе обратной полярности была исследована, при значениях тока в диапазоне от 40 до 80 А. Выявлено, что использование обратной полярности позволяет достигать значительно большей эффективной мощности, чем при сварке на переменном токе. Например, при токе 40 А эффективная мощность составила 1530 Вт.

Для повышения эффективности сварки на токе обратной полярности рекомендуется использовать инверторы с пульсацией менее 0,2%. Также использование специализированного оборудования, такого как плазматрон типа FY-A200H, адаптированного для работы с водоохлаждаемым вольфрамовым электродом.

Таким образом, результаты исследования подтверждают высокую эффективность и перспективность применения сварки сжатой дугой на токе обратной полярности с водоохлаждаемым электродом для сварки алюминиевых сплавов в различных промышленных отраслях.

Данная работа не до конца раскрыла потенциал применения водоохлаждаемого электрода, но уже есть доказательства эффективности. Развитием проекта будет внедрение модернизированных плазмотронов на предприятия и тестирование их, при реальных производственных нагрузках.

## Список используемых источников

1. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: справочник / под ред. Дж. Е. Хетча, И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1989. – 328 с.
2. Бабичев Б.И. (ред.) Свариваемые алюминиевые сплавы (Свойства и применение). Ленинград: Судпромгиз, 1959. (Ответственные лица: Байков Дмитрий Иванович, Ю.С. Золоторевский, В.Л. Руссо, Т.К. Ряжская). 236 с.
3. Байков Д. И., Золоторевский Ю. С., Руссо В. Л., Ряжская Т. К. Свариваемые алюминиевые сплавы (свойства и применение). - Ленинград: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1959. - 236 с.
4. ГОСТ ISO 6848-2020. Межгосударственный стандарт: Дуговая сварка и резка электроды неплавящиеся вольфрамовые. Классификация: Arcweldingandcutting. Nonconsumabletungstenelectrodes. Classification: дата введения 2020-12-01 / Саморегулируемая организация Ассоциация "Национальное агентство контроля сварки" (СРО Ассоциация "НАКС") – Изд. официальное .- М.: Стандартинформ, 2020 – 10 с.
5. Дриц А. М., Овчинников В. В. Сварка алюминиевых сплавов. - 2-е изд., перераб. и доп. изд. - Москва: ИД "Руда и Металлы", 2020. - 476 с
6. Дуговая резка. плазменно-дуговая резка. часть 1 // Любые сварочные работы URL: <http://www.любые-сварочные-работы.рф/> (дата обращения: 08.05.2024).
7. Короткова, Г.М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов : монография / Г.М. Короткова. – Тольятти : ТГУ, 2009. – 335 с.
8. 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.

9. Мировой рынок сырья: алюминий // Газпромбанк инвестиции. URL: <https://gazprombank.investments/blog/economics/aluminum/> (дата обращения: 11.03.2024).

10. 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.

11. 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.

12.Плазменная сварка алюминиевых сплавов повышенных толщин / Ю.Д. Щицын, И.Л. Синани, Д.С. Белинин, П.С. Кучев, В.Ю. Щицын // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 27–31.

13. Рубинчик Ю.Л. Механизированная сварка корпусных конструкций из алюминиевых сплавов. – Л.: Судостроение, 1974.

14. Рудина С.Е. Алюминий в автомобилестроении: перспективы использования и основные преимущества // НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ОБЩЕСТВО - НТО-II-2022. - Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2022. - С. 188-191.

15. 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.

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

17. Сидоров В. П. и др. Эффективная мощность сварочной дуги



обратной полярности при наплавке алюминия плавящимся электродом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2020 – №. 4 – С. 34-42. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-34-42.

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

19. Современные алюминиевые сплавы, применяемые в аэрокосмическом комплексе // Актуальные исследования. 2022. №16 (95). С. 6-9. URL:<https://apni.ru/article/4000-sovremennie-alyuminievie-splavi-primenyaemie/> (дата обращения: 28.03.2024).

20. УДК 336.71.078.3 оценка эффективности плазмотрона при сварке на токе обратной полярности Е.С. Момсин, С.С. Самсонов, И.И. Кочкаров Научный руководитель Д.Э. Советкин.

21. Щицын Ю.Д., И.А. Гилев, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин, А.М. Баженов Плазменная сварка алюминиевых сплавов при работе двухдугового плазмотрона на токе обратной полярности.

22. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2009 – № 2 – С. 42–45.

23. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004 – Ч. 1 – 73 с.

24. Grinyuk A. A. et al. Main tendencies in development of plasma– arc welding of aluminium alloys //The Paton Welding J. – 2015. – Т. 11. – С. 31– 41. 53.

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

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

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

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