

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

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

15.04.01 «Машиностроение»
(код и наименование направления подготовки)

«Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования»
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Свариваемость и технологии ремонтной сварки изделий из
алюминиевых сплавов

Обучающийся

Ш. Ш. Абдурахимов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., профессор В.В. Ельцов

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

Тольятти 2023

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| 1 Современное состояние ремонтной сварки отливок из алюминиевых сплавов. | 7 |
| 1.1 Постановка проблемы. | 7 |
| 1.2 Свойства алюминиевых сплавов. | 11 |
| 1.3 Операции базового технологического процесса ремонтной сварки и наплавки. | 14 |
| 1.4 Анализ способов сварки алюминиевых сплавов при ремонте отливок | 19 |
| 1.5 Выводы по первой главе и формулировка задач диссертационного исследования | 28 |
| 2 Повышение эффективности сварки неплавящимся электродом при ремонтной сварке алюминиевых сплавов. | 31 |
| 3 Повышение эффективности трехфазной ремонтной сварки. | 40 |
| 4 Повышение эффективности ремонтной механизированной сварки деталей из алюминиевых сплавов. | 48 |
| 5 Повышение эффективности ремонтной плазменной сварки деталей из алюминиевых сплавов. | 54 |
| Заключение | 63 |
| Список используемой литературы и используемых источников | 67 |

Введение

Благодаря своим специфическим свойствам (относительно малая плотность при сравнительно высокой прочности, высокая коррозионная стойкость, эстетичный внешний вид) в промышленности всё более широкое применение начинают получать алюминиевые сплавы. При этом особенно перспективным следует признать применение алюминиевых сплавов для изготовления габаритных деталей техники, что позволяет существенно снизить массу перемещаемых частей и затраты энергии. Кроме того, вторичное использование утилизируемых деталей из алюминия также проще, чем вторичное использование деталей из сталей, а тем более, из пластмасс. Таким образом, благодаря применению алюминиевых сплавов решаются актуальные задачи ресурсосбережения и энергосбережения [6], [43], [54].

При ремонте деталей и заготовок из алюминиевых сплавов самое широкое применение нашла дуговая сварка, выполнение которой применительно к алюминиевым сплавам встречает значительные трудности, которые не решены до настоящего времени [17], [20], [38], [39], [47]. Эти трудности проистекают из особенностей свойств алюминиевых сплавов по сравнению с другими конструкционными материалами.

Во-первых, алюминиевые сплавы имеют высокую теплопроводность, которая приводит к получению значительного уровня остаточных напряжений и деформация, что сопровождается короблением детали и появлением в ней трещин. Во-вторых, повышенный по сравнению со сталями коэффициент термического напряжения также вызывает коробление детали и появление в ней трещин. В-третьих, поверхность алюминиевых деталей покрыта окисной плёнкой, которая имеет высокую температуру плавления, превышающую температуру плавления основного металла, в результате этого при сварке шов загрязняется окисными пленами. Загрязнению металла шва окисными плёнами также способствует то, что оксид алюминия имеет более высокую плотность, чем расплавленный алюминий, поэтому не

остаётся на поверхности сварочной ванны, а тонет в ней. В-четвёртых, расплавленный алюминий активно растворяет в себе газы, которые интенсивно выходят из него при кристаллизации, что приводит к образованию пористости, которая становится серьёзной проблемой при сварке алюминиевых сплавов. В-пятых, все алюминиевые сплавы имеют провал прочности при нагреве, в результате чего форма сварного шва теряет стабильность, а также повышается вероятность получения горячих трещин.

Приведенные выше трудности приводят к тому, что прочность металла сварного шва составляет порядка 60...70 % прочности основного металла [5], [35], [39]. Особенно это актуально по отношению к ремонтной сварке деталей и отливок.

Применительно к отливкам из алюминиевых сплавов вопрос повышения качества ремонтной сварки является ещё более актуальным [3]. Ремонтная сварка отливок усложняется вследствие того, к затруднениям, связанным с металлургическими особенностями, присовокупляются напряженные состояния в теле самой отливки. Наличие таких напряженных полей приводит к тому, что кристаллизация металла сварного шва происходит при растягивающих напряжениях, что повышает вероятность образования горячих трещин.

К отливке из алюминиевого сплава предъявляются следующие требования [3]: отсутствие пор, раковин и трещин; структура металла должна быть мелкозернистой и плотной; в отливке должен быть минимальный уровень остаточных напряжений.

При выполнении отливок из алюминиевых сплавов значительная их часть (до 10 %) имеет различные дефекты. К таким дефектам относят газовые раковины, сквозные и поверхностные недоливы, трещины, зашлаковывание, спаи и рыхлоты. Эти дефекты могут быть обнаружены как после выемки отливки из формы и проведении визуального контроля, так и при выполнении механической обработки отливки.

Таким образом отливка из алюминиевого сплава признаётся качественной не только при условии соблюдения требуемого химического состава, но и при условии отсутствия дефектов.

Обнаруживаемые дефекты отливок разделяются на исправимые и неисправимые. Исправимые дефекты устраняются в основном с применением сварочных технологий.

Описанные выше особенности алюминиевых сплавов заставляют применять при их ремонтной сварке концентрированные источники энергии, обеспечивающие разрушение окисной плёнки на поверхности деталей.

Исследования в области повышения эффективности сварки алюминиевых сплавов проводятся в ведущих научных организациях мира и Российской Федерации. В первую очередь необходимо отметить работы сотрудников института электросварки им. Е. О. Патона (А. Г. Покляцкий, И. В. Довбищенко, А. Я. Ищенко, Д. М. Рабкин, М. Р. Яворская, А. Я. Ищенко, Н. В. Воропай и другие). Значительные результаты получены сотрудниками Волгоградского государственного технического университета (А. В. Савинов, И. Е. Лапин, В. А. Косович). Также следует отметить сотрудников Тольяттинского государственного университета (В. И. Столбов, В. В. Ельцов, Г. М. Короткова и В. П. Сидоров).

При этом наиболее широко распространена сварка неплавящимся электродом в среде аргона, которую ведут на переменном токе.

Следует отметить высокую оперативность и универсальность аргонодуговой сварки неплавящимся электродом, которая обладает простотой организации сварочного поста и широко распространения при ремонте деталей машин. Применение этого способа позволяет получать сварные соединения высокого качества и обладающие необходимыми эксплуатационными свойствами. Однако следует отметить недостатки аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. В качестве первого недостатка следует отметить низкую производительность процесса по сравнению с другими, получившими распространение способами сварки.

Вторым недостатком является существенная зависимость полученных при сварке результатов от квалификации самого сварщика.

Несмотря на исследования в области повышения эффективности сварки при выполнении конструкций из алюминиевых сплавов, описанные выше трудности до конца не решены. Поэтому остаются актуальными работы в этом направлении. На основании вышеизложенного следует признать актуальной целью настоящей диссертации – повышение производительности и качества ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов.

Достижение поставленной цели должно выполняться на основании изучения современных технологических решений, предложенных сварочному производству отечественными и зарубежными исследователями. С учётом настоящей специфики, характеризующей политическую и экономическую обстановку в России и за рубежом, предпочтение следует отдавать отечественным разработкам, внедрение которых в современное производство не потребует применения импортного оборудования и элементной базы [21], [26].

Объектом исследования в настоящей диссертационной работе выступают характеристики соединения при выполнении ремонтной сварки и наплавки деталей из алюминиевых сплавов.

Предметом исследования выступают технологические процессы и материалы для ремонтной сварки и наплавки деталей из алюминиевых сплавов.

1 Современное состояние ремонтной сварки отливок из алюминиевых сплавов

1.1 Постановка проблемы

Особенности получения дефектов при литье алюминиевых сплавов зависят от способа выполнения литья, содержания химических элементов в сплаве и сложностью самой отливки.

Возникающие литейные микрорыхлоты, представленные на рисунке 1, в отливках из алюминиевых сплавов является устранимым дефектом. Микрорыхлота не только является причиной нарушения герметичности, но и становится очагом для зарождения трещин, развитие которых может произойти в процессе последующей механической обработки отливки. Также трещины из-за наличия микрорыхлот могут образовываться уже в процессе эксплуатации детали.

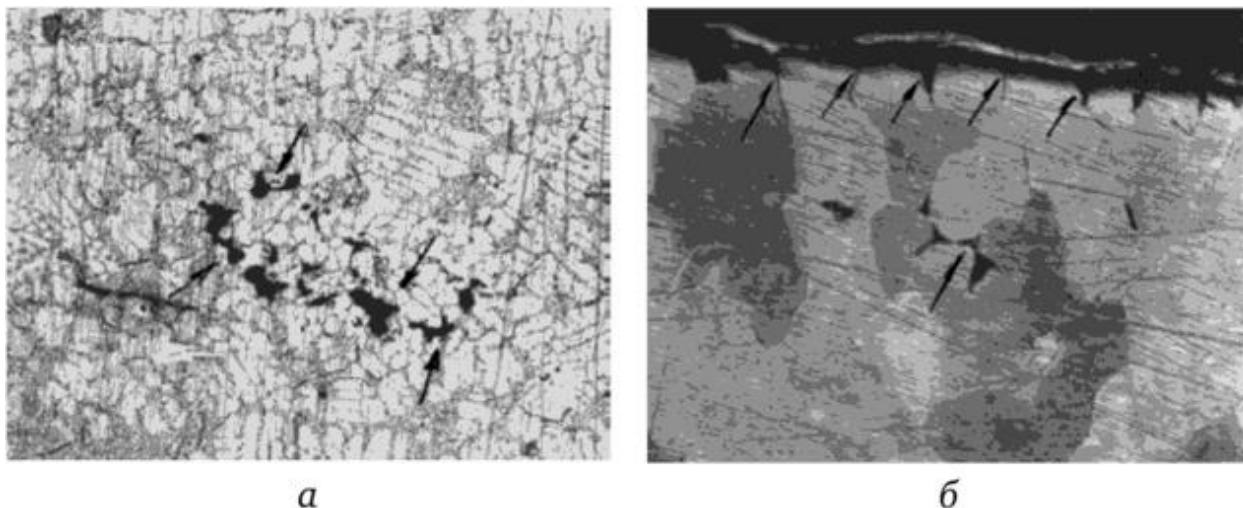


Рисунок 1 – Литейные микрорыхлоты в отливках из сплава АЛ9 (а) и растравление в зоне микрорыхлоты (б) (×80)

Пример трещины, которая возникла в отливке в процессе механической обработки, представлен на рисунке 2.

Ещё одним видом дефекта при литье алюминиевых сплавов является включение оксидных плен и пористость отливки, что показано на рисунке 3.



Рисунок 2 – Трещина возникшая после механической обработки по причине наличия в отливке литейной микрорыхлоты ($\times 80$)

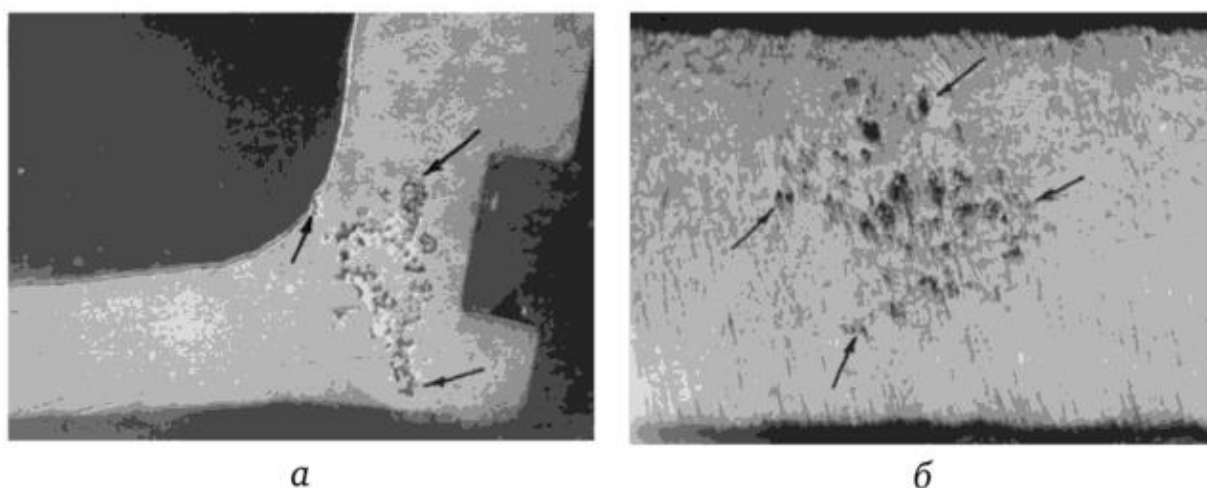


Рисунок 3 – Возникновение пористости (а) и оксидных включений (б) при выполнении отливки из алюминиевых сплавов

Наличие растягивающих напряжений, действующих на металла при кристаллизации, приводит к образованию горячих трещин. Вероятность появления горячих трещин повышается при повышении сложности отливки, особенно при наличии на ней участков с резким изменением толщины металла. При этом порядка 22 % всех дефектов приходится на плоские участки отливок [4], [7], [13], [51].

В связи с тем, что при исправлении дефектов литья применяется в основном дуговая сварка, при построении технологии ремонта следует принимать во внимание, что не все сплавы могут быть удовлетворительно сварены при использовании технологии сварки плавлением. При этом

возникает ряд проблем сварки, которые не решены до настоящего времени: малая производительность в случае сварки деталей большой толщины, получение значительного количества дефектов, невозможность обеспечения равнопрочности металла сварного шва основному металлу, высокая трудоёмкость подготовки поверхности деталей перед сваркой, повышенные требования к помещению. Помимо этого при толщине деталей более 10...15 мм зачастую может потребоваться проведение предварительного подогрева.

На рисунке 4 представлен пример отливки из алюминиевого сплава АК7ч – корпуса направляющего аппарата. Содержание химических элементов в сплаве представлено в таблице 1. Механические свойства сплава АК7ч представлены в таблице 2.



Рисунок 4 – Внешний вид (а) направляющего аппарата и возникающие дефекты литья (б)

Таблица 1 – Содержание химических элементов в сплаве АК7ч (Al-основа)

| Si | Mn | Fe | Cu | Pb | Mg | Be | Zn | Sn |
|-------|--------|-----|--------|---------|-------------|--------|--------|---------|
| 6...8 | до 0,5 | 0,5 | до 0,2 | до 0,05 | 0,25...0,45 | до 0,1 | до 0,3 | до 0,01 |

Таблица 2 – Механические свойства сплава АК7ч

| Марка | Вид термической обработки | σ_b , МПа | Δ , % | НВ |
|-------|---------------------------|------------------|--------------|----|
| АК7ч | T2 | 137 | 2 | 45 |
| | T4 | 186 | 4 | 50 |

Рассматриваемая деталь является достаточно сложной конструкцией и имеет значительные массу и габариты. Процесс получения заготовки характеризуется значительной трудоёмкостью. При этом дефекты могут быть обнаружены на различных стадиях изготовления – начиная от извлечении отливки из формы и заканчивая механической обработкой. Определение границ дефекта проводят визуально и с применением рентгеновского контроля.

В производственных условиях для выявления дефектов отливок применяется следующая техника рентгенографии. Отливку подают в рентгеновскую лабораторию после того, как с неё удалили литниково-питающую систему. С применением специального приспособления отливку устанавливают в необходимое положение и помещают внутри изолированного свинцом бокса. Рентгеновскую плёнку помещают в пакет из светонепроницаемого материала и размещают внутри заготовки таким образом, чтобы этот пакет плотно прилегал к внутренней стенке. Применительно к крупногабаритным корпусным деталям следует проводить 100 % контроль качества рентгенографическими методами.

В качестве источника рентгеновских лучей применяется аппарат РУП-200, который представлен на рисунке 5. Этот аппарат позволяет выполнять просвечивание отливок из алюминиевых сплавов с толщиной стенки до 300 мм.

После того, как было выполнено просвечивание, выполняют проявку рентгеновской пленки и анализ изображения дефектов на ней. Дефекты на плёнке фиксируются в виде тёмных пятен. После обнаружения дефекта и

уточнения его границ проводят вырубку дефекта и заварку с последующим рентгеновским контролем.

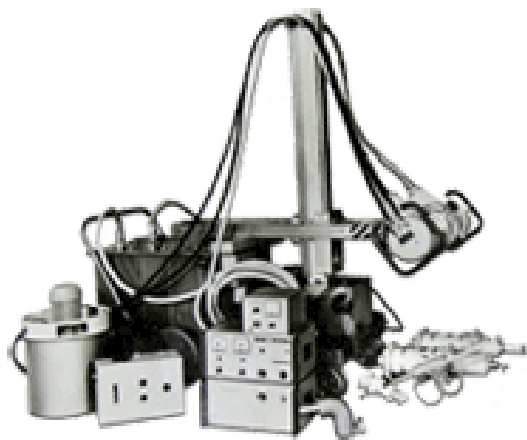


Рисунок 5 – Рентгеновский аппарат РУП-200

Следует отметить низкую экономическую эффективность применяемой технологии. Во-первых, малая производительность процесса. Во-вторых, высокая трудоёмкость. В-третьих, при выполнении ремонтной сварки отмечается значительное количество дефектов, которые требуют повторного исправления.

1.2 Свойства алюминиевых сплавов

В настоящей диссертации рассматривается вопрос ремонтной сварки отливок из алюминиевых сплавов АК7ч, АК9ч и АК12М. В таблице 1 приведён химический состав сплавов АК7ч. В таблице 3 приведено содержание химических элементов в сплавах АК9ч и АК12М.

Таблица 3 – Содержание химических элементов в алюминиевых сплавах АК9ч и АК12М

| Сплав | Si | Mn | Ni | Fe | Ti | Cu | Mg | Zn | Pb | Sn |
|-------|--------|---------|------|----|------|---------|----------|------|-------|-------|
| АК12М | 11-13 | <0,5 | <0,3 | - | <0,2 | 1,8-2,5 | <0,8 | <0,8 | <0,15 | <0,1 |
| АК9ч | 8-10,5 | 0,2-0,5 | <0,1 | <1 | - | <0,3 | 0,17-0,3 | <0,3 | <0,05 | <0,01 |

В рассматриваемых сплавах основным легирующим элементом является кремний. Этот элемент повышает текучесть расплавленного металла, что позволяет выполнять отливки сложной формы. Также за счёт повышения содержания в сплаве кремния уменьшается литейная усадка. При ремонтной сварке в процессе исправления дефектов литья кремний также играет положительную роль, так как он улучшает свариваемость сплава. Отрицательная роль кремния проявляется в снижении коррозионной стойкости изделий.

За счёт содержания в сплаве меди повышается пластичность, но коррозионная стойкость изделия снижается.

За счёт добавок магния повышается прочность сплава.

Добавки цинка в алюминиевый сплав позволяют повысить его прочность. Однако следует принимать во внимание, что цинк отрицательно сказывается на коррозионной стойкости сплава по отношению к щелочам.

За счёт добавки железа в алюминиевый сплав повышается его прочность.

За счёт высокой химической активности на поверхности алюминиевых сплавов образуется прочная плёнка из оксида алюминия. Эта плёнка предотвращает взаимодействие основного металла (чистого алюминия) с окислителями, в качестве которых обычно выступает кислород воздуха, вода, кислоты.

При сварке алюминиевых сплавов следует выделить пять трудностей, которые ограничивают применение этих материалов в промышленности и затрудняют сварку.

В качестве первой трудности следует отметить указываемую ранее плёнку на поверхности деталей, которая состоит из оксида алюминия. Температура плавления этой пленки составляет 2050 °С, в то время, как температура плавления алюминия составляет 660 °С. Таким образом, наблюдается значительная разница в температурах плавления оксидной пленки и основного металла, в результате чего при формировании сварочной

ванны не происходит расплавления пленки в металле, пленка присутствует в ванне в виде нерасплавившихся частиц. Кроме того, плотность пленки выше, чем плотность расплавленного металла, в результате чего пленка тонет в сварочной ванне и загрязняет её.

В качестве второй трудности следует указать потерю прочности алюминиевых сплавов при высоких температурах. По этой причине наблюдается провисание и провал сварочной ванны и вытекание в зазор расплавленного металла.

В качестве третьей трудности следует указать значительный по сравнению со сталями коэффициент термического расширения, что становится причиной образования повышенного уровня остаточных напряжений и деформаций. При ремонте деталей и заготовок из алюминиевых сплавов это может стать причиной коробления и появления трещин. Кроме того, при сварке алюминиевых сплавов приходится бороться с образованием кратеров.

В качестве четвертой трудности следует указать высокую растворимость газов в расплавленном алюминии. По этой причине возникает значительное количество пор, так как при кристаллизации происходит обратное выделение газов. В результате этого прочность и пластические свойства металла сварного шва могут существенно снизиться.

В качестве пятой трудности следует отметить высокую опасность получения горячих трещин. Образование горячих трещин происходит по причине того, что структура металла шва является столбчатой с выделением легкоплавкой эвтектики по границам зёрен. Применительно к ремонтной сварке отливок опасность возникновения горячих трещин при сварке усиливается, так как в отливке может присутствовать высокий уровень остаточных напряжений третьего рода (уравновешивающийся в пределах всей детали), что вызывает дополнительные растягивающие напряжения, раскрывающие трещину.

Перечисленные трудности, которые сопровождают сварку всех алюминиевых сплавов, должны быть решены и частично решаются существующими техническими и технологическими мерами. Переход на сварку с высокой концентрацией энергии, например, плазменную или лазерную, существенно снижает остроту проблемы сварки алюминиевых сплавов. На основании вышеизложенного и знаний, полученных при обучении на кафедре сварки, следует перечислить способы, применение которых возможно при ремонтной сварке отливок из алюминиевых сплавов:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами,
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения,
- аргодуговая сварка неплавящимся электродом,
- сварка трехфазной дугой,
- плазменная сварка.

Перечисленные способы сварки могут быть использованы при составлении проектной технологии ремонтной сварки отливок из алюминиевых сплавов и должны быть рассмотрены. На основании анализа преимуществ и недостатков каждого способа следует выставить экспертную оценку, сравнение поставленных оценок позволит предложить наиболее эффективный способ сварки для построения проектной технологии.

1.3 Операции базового технологического процесса ремонтной сварки и наплавки

Ремонтная сварка и наплавка выполняются на участке, который представлен на рисунке 6. Сварочный пост оснащён местной вытяжкой, источник питания и рабочим столом.

Предварительно проводят дефектовку промытых деталей, для этого после демонтажа детали проводят её обмер и внешний осмотр. Внешний

осмотр проводят невооружённым глазом, а также с применением специальных инструментов и приспособлений. По результатам дефектовки выполняют маркировку деталей. Годные детали, которые могут быть незамедлительно установлены на агрегаты, помечают зелёным маркером. Детали, которые имеют исправимые дефекты, помечают жёлтым маркером. Детали, исправление дефектов на которых невозможно или нецелесообразно, помечают красным маркером.

Перед выполнением ремонта детали в месте исправления дефекта обрабатывают раствором щелочи NaOH, который нагрет до температуры 60...70 °С. В результате такой обработки в течение 2...3 минут происходит стравливание с поверхности деталей окисной плёнки.



Рисунок 6 – Пост для ремонтной сварки и наплавки деталей

Далее остатки щёлочи и продукты реакции смывают водой и просушивают поверхность детали сжатым воздухом.

Непосредственно перед проведением ремонтной сварки место сварки зачищают при помощи металлической щётки. Щетина щетки должна быть из

нержавеющей проволоки и иметь толщину ворса не более 0,15 мм. Применение наждачного круга нежелательно по причине оставления на поверхности деталей царапин, в которые забивается грязь, что становится причиной образования пор.

После зачистки следует протереть место зачистки сухой ветошью. После такой обработки ремонтные работы должны быть проведены не позднее 6 часов. В противном случае следует повторить очистку поверхности.

В случае ремонтной заварки трещины без предварительной подготовки высока вероятность дальнейшего развития трещины в ходе сварки. Первоначально следует осмотреть трещины, выявляя расположение её концов.

Если визуально концы трещины определить сложно, можно применить нагрев при помощи газовой горелки до температуры 100...150 °С. Концы трещины следует засверлить с использованием сверла диаметром 5 мм, при этом положение центра сверла должно быть на 3...5 мм дальше конца трещины.

Разделку трещины проводят с применением молотка и зубила. Разделка должна проводиться на глубину, превышающую глубину залегания трещины не менее чем на 3 мм.

Для сварки и наплавки применяется источник переменного тока, в качестве которого взят УДГУ-351, представленный на рисунке 7. В качестве защитного газа применяется чистый аргон, который поставляется в серых баллонах.

На рисунке 8 представлен баллон с аргоном и блок подготовки газа. В качестве присадочной проволоки применяется проволока СВАК5, состав которой представлен в таблице 4.

Параметры режима приведены в таблице 5.



Рисунок 7 – Источник питания сварочной дуги переменного тока УДГУ-351



Рисунок 8 – Баллон с аргоном и блок подготовки газа

Таблица 4 – Химический состав проволоки СВАК5

| Проволока | Основные компоненты | | Примеси, не более | | | Прочие примеси | Сумма примесей |
|-----------|---------------------|-------|-------------------|-------|-----|----------------|----------------|
| | Al | Si | Fe | Zn+Sn | Cu | | |
| СВАК5 | Остальное | 4,5-6 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 1,0 |

Таблица 5 – Параметры режима ремонтной сварки

| Номер режима | Ток, А | Диаметр проволоки, мм | Диаметр вольфрамового электрода, мм | Расход аргона, л/мин |
|--------------|-----------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | 100...140 | 3 | 2 | 8...10 |
| 2 | 130...150 | 4 | 2 | 8...10 |
| 3 | 140...170 | 4 | 3 | 10...12 |

После выполнения ремонтной сварки выполняют очистку поверхности детали от брызг. Далее проводят визуальный контроль качества ремонтной сварки. Осматривают поверхность сварного шва и поверхность детали на расстоянии 20 мм от сварного шва. Косвенным признаком качественно выполненной сварки является постоянство размеров сварного шва и одинаковая чешуйчатость на всём его протяжении, цвет побежалости также должен быть равномерен по длине сварного шва [37], [42].

Внутренние дефекты выявляют при проведении ультразвукового контроля, для которого применяется дефектоскоп УД2-102, представленный на рисунке 9.



Рисунок 9 – Дефектоскоп УД2-102

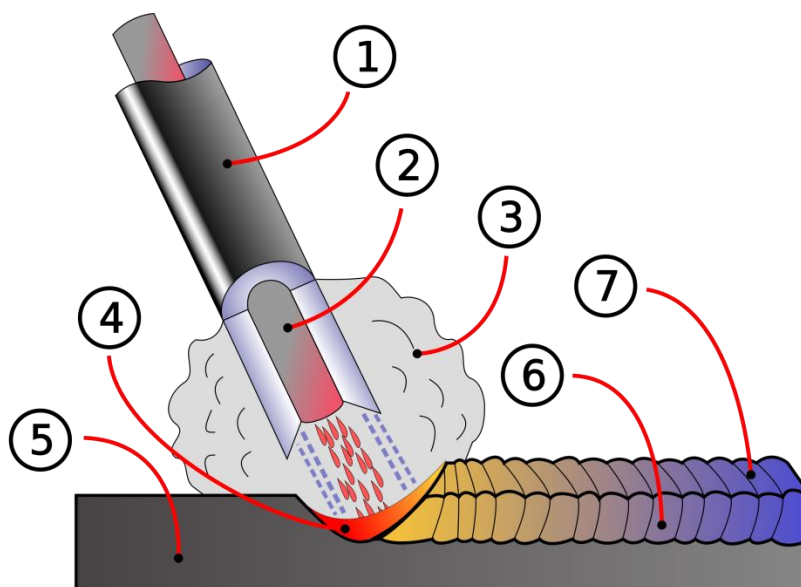
Осмотр проводят невооружённым глазом и применением лупы с 4-кратным увеличением. При помощи универсального шаблона сварщика контролируют размеры сварного шва. В случае затруднённого доступа к поверхности сварного шва может быть применён эндоскоп.

Базовая технология характеризуется высокой трудоёмкостью и малой производительностью выполнения операций процесса. Также следует указать на значительное количество повторных дефектов, которые предстоит исправлять.

1.4 Анализ способов сварки алюминиевых сплавов при ремонте отливок

Возможно выполнение сварки деталей из алюминиевого сплава покрытыми электродами. При этом для сварки применяются электроды с большим диаметром, который составляет 4 мм и больше. Это объясняется тем, что из-за высокой скорости плавления применение электродов малого диаметра крайне затруднено. Сварку необходимо выполнять в нижнем положении, так для других положений детали сложно обеспечить удержание сварочной ванны и её газовую защиту [36].

На рисунке 10 представлена схема выполнения ручной дуговой сварки, которая в случае изготовления конструкций из алюминиевых сплавов ведётся на постоянном токе обратной полярности.



1 – покрытие электрода, 2 – стержень электрода, 3 – газовая защита, 4 – сварочная ванна, 5 – основной металл, 6 – наплавленный металл, 7 – шлак

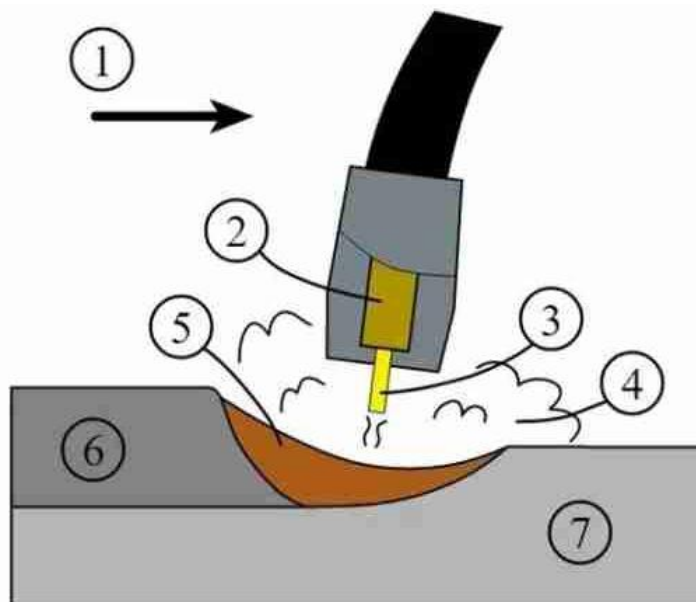
Рисунок 10 – Схема выполнения ручной дуговой сварки

При сварке алюминиевых сплавов с применением покрытых электродов используют постоянный ток обратной полярности, при этом в качестве источников питания применяют выпрямители или генераторы, которые имеют падающую вольтамперную характеристику. Сварку следует

выполнять короткой дугой при наклоне электрода порядка 60...80 градусов. Такой наклон электрода помогает улучшить визуальный контроль сварщиком за формированием сварочной ванны. Как правило, выполнять колебания электрода не следует.

Рекомендуется выполнить предварительный нагрев детали перед сваркой, температура предварительного нагрева составляет 150...200 °С. После выполнения сварки необходимо удалить шлак с поверхности детали и брызги электродного металла, усиление шва также снимают. Для этого применяются фрезы, зубило и скребки.

При сварке алюминиевых сплавов может быть применена механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения. При ремонте отливок этот способ сварки может оказаться очень эффективным, так как он проявляет свои преимущества именно при сварке больших толщин [35], [39]. На рисунке 11 представлена схема выполнения механизированной сварки в защитных газах проволокой сплошного сечения.



1 – направление сварки, 2 – контактный наконечник, 3 – электродная проволока, 4 – защитный газ, 5 – сварочная ванна, 6 – наплавленный металл, 7 – основной металл

Рисунок 11– Схема выполнения механизированной сварки в защитных газах

При механизированной сварке алюминиевых сплавов приходится считаться с опасностью заломов сварочной проволоки, которая значительно более мягкая по сравнению со стальной проволокой. Поэтому механизм подачи проволоки должен обеспечивать стабильное поступление проволоки за счёт усложнения своей конструкции. В большинстве случаев такой механизм снабжён двумя парами роликов, которые выполняют прижатие и подачу проволоки. За счёт этого вероятность сминания и залома проволоки существенно снижается. Также необходимо обеспечивать чистоту сопла горелки, через которое поступает сварочная проволока. Само сопло горелки должно обеспечивать надёжную газовую защиту, для чего диаметр составляет 18...22 мм [35].

Срок службы токоведущих медных наконечников горелок для механизированной сварки алюминиевых сплавов составляет порядка 30...40 часов, а медно-графитовых – 8...10 часов. Следует принимать во внимание что медно-графитовые наконечники, несмотря на малый срок службы, обеспечивают максимально надёжный токосъём и скольжение сварочной проволоки.

Видимая часть дуги при механизированной сварке алюминиевых сплавов составляет порядка 2...6 мм при расположении мундштука горелки на расстоянии 5...15 мм между торцом сопла и деталью. При сварке принимают технику ведения «углом вперёд», при этом угол наклона горелки составляет 75...80 градусов. При механизированной сварке используется постоянный ток обратной полярности. Источник питания для механизированной сварки алюминиевых сплавов должен иметь жесткую вольтамперную характеристику или пологопадающую вольтамперную характеристику.

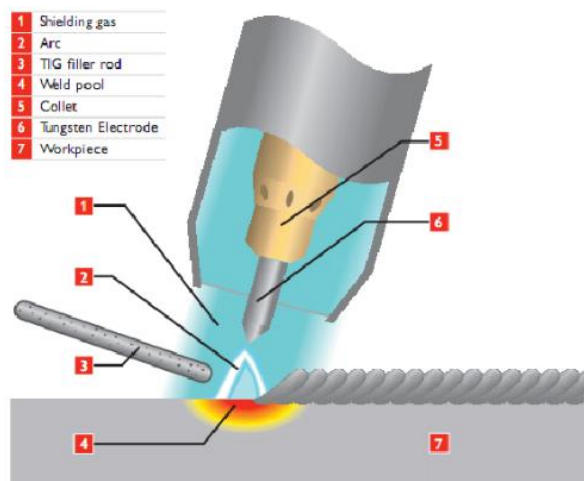
Диаметр сварочной проволоки при ремонтной сварке алюминиевых деталей составляет обычно более 2,5 мм. В противном случае возникают трудности с образованием в процессе сварки пор.

Мировые производители сварочного оборудования (Cloos, Lincoln Electric, EWM, OTC, Fronius, Lorch, Kemppu) ведут интенсивные разработки в области повышения эффективности механизированной сварки алюминиевых сплавов за счёт применения импульсного управления сварочной дугой [14]. При этом удалось существенно снизить потери на разбрызгивание, которые довели до 1 %, при этом попадающие на поверхность детали капли имеют форму мелких шариков и не прилипают. За счёт управления горением дуги появилась возможность дозированного введения энергии в дуговой промежуток, контролировать протяженность фаз горения дуги, интенсифицировать перемешивание металла в сварочной ванне. Появилась возможность получения устойчивого дугового разряда при первом касании электродом детали. Сварочная дуга горит стабильно и предсказуемо [15], [24].

При сварке неплавящимся электродом горение дуги происходит между деталью и вольфрамовым электродом. Введение в сварочную ванну присадочного металла выполняют в виде присадочной проволоки. Для того, чтобы избежать загрязнения сварного шва частицами вольфрама, для зажигания дуги используют графитовую пластину, после того, как конец вольфрамового электрода прогревается, дугу переносят на основной металл.

На рисунке 12 представлена схема выполнения ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом.

При сварке неплавящимся электродом его располагают под углом 60...80 градусов к изделию. Присадочную проволоку подают под углом 80...90 градусов к электроду. Поддерживают расстояние между соплом горелки и деталью порядка 5...10 мм. Выступающая часть вольфрамового электрода из сопла горелки должна иметь длину 2...5 мм. При сварке электрод следует перемещать равномерно и поступательно, а вводимый пруток присадочного металла не должен выходить за пределы газовой защиты. Сварку выполняют «левым» способом.



1 – защитный газ, 2 – дуга, 3 – присадочный пруток, 4 – сварочная ванна,
5 – электрододержатель, 6 – неплавящийся электрод, 7 – изделие

Рисунок 12 – Схема выполнения сварки неплавящимся электродом

Повышение скорости сварки и стабильности качества возможно при применении в качестве защитного газа вместо аргона смеси «аргон+гелий». Это несколько повышает стоимость защитного газа, но позволяет увеличить на 50...100 % производительность сварки.

Применение плазменной сварки позволяет значительно повысить качество при выполнении сварки алюминиевых сплавов за счёт уменьшения зоны термического влияния, коробления детали и устранения дефектности сварного шва [46], [57].

Горение сжатой дуги при плазменной сварке отличается высокой устойчивостью по отношению к различным возмущениям, в частности, при колебаниях длины дуги. Это особенно важно при проведении ремонтной сварки, так как в этом случае деталь может иметь сложный профиль.

Плазменную сварку деталей из алюминиевых сплавов в большинстве случаев ведут на постоянном токе обратной полярности.

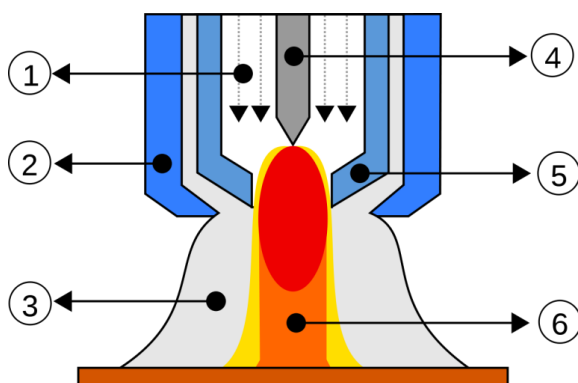
Для того, чтобы повысить стойкость вольфрамового электрода, его помещают в охлаждаемую медную обойму.

При выполнении плазменной сварки алюминиевых сплавов плазматрон следует располагать под углом 80...90 градусов к изделию, сварку следует

вести «углом вперед». Присадочную проволоку следует подавать под углом 90...100 градусов к оси плазматрона.

Если в процессе сварки получается «морщинистая» поверхность, следует уменьшить длину дуги и увеличить скорость сварки. Если при сварке наблюдается загрязнение поверхности шва, необходимо выполнить очистку плазматрона.

На рисунке 13 представлена схема выполнения плазменной сварки.



1 – плазмообразующий газ, 2 – защитное сопло, 3 – защитный газ, 4 – неплавящийся электрод, 5 – плазмообразующее сопло, 6 – сжатая дуга

Рисунок 13 – Схема плазменной сварки

Применение трёхфазной дуги позволяет выполнять ремонтную сварку на переменном токе с высокой стабильностью качества [8], [10], [22]. При трёхфазной сварке горелка снабжается двумя неплавающими электродами, к которым подводится переменный ток. Одна фаза подключается к изделию, а две фазы подключаются к сварочным электродам. В процессе сварки происходит горение нескольких дуг. Первая дуга – независимая, горит между электродами, вторая дуга и третья дуга горят попеременно между электродами и изделием. В результате наблюдается повышение стабильности горения дуги и производительности ремонтной сварки. Также существенно повышается стабильность качества за счёт улучшения механизма катодной очистки и увеличения проплавляющей способности дуги.

На рисунке 14 представлена схема выполнения сварки трёхфазной дугой.

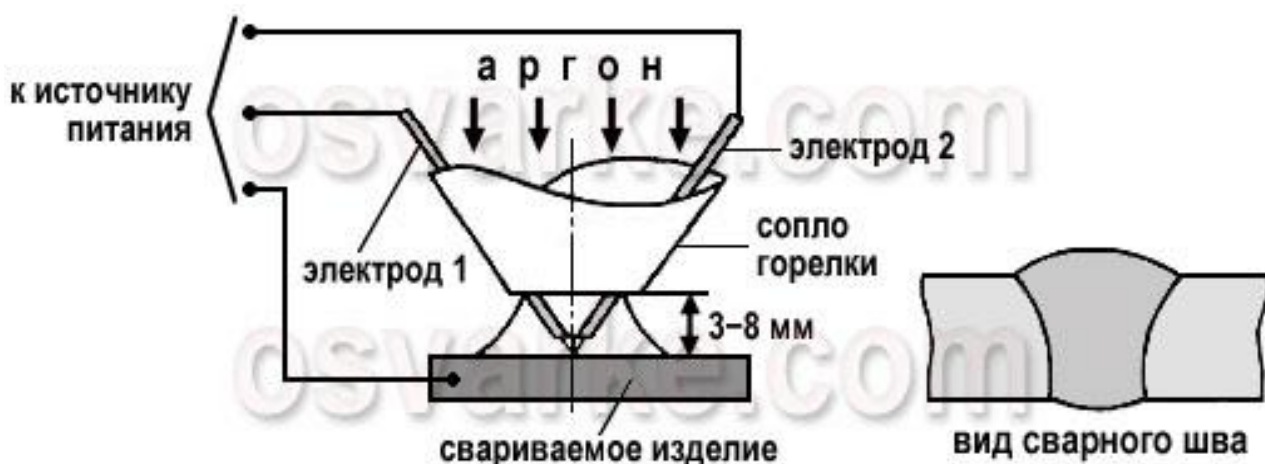


Рисунок 14 – Схема выполнения сварки трёхфазной дугой

Для того, чтобы выбрать способы сварки, которые следует применить при исправлении дефектов на алюминиевых отливках, выполним экспертную оценку каждого способа сварки.

Оценку способов сварки проведем с использованием ряда критериев [30]. В качестве критериев выберем как технологические, так и экономические.

Первым критерием является производительность работ. В зависимости от скорости выполнения основных и вспомогательных операций рассматриваемые способы сварки получили следующее количество баллов:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами, получила 1 балл согласно экспертной оценке;
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения, получила 5 баллов согласно экспертной оценке;
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, получила 2 балла согласно экспертной оценке;
- сварка трехфазной дугой, получила 4 балла согласно экспертной оценке;
- плазменная сварка, получила 3 балла согласно экспертной оценке.

Вторым критерием является качество выполнения сварных швов, от которого главным образом зависит работоспособность восстановленной

детали и возможность введения её в дальнейший технологический цикл. В зависимости от качества сварки рассматриваемые способы получили следующие баллы:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами, получила 1 балл согласно экспертной оценке;
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения, получила 2 балла согласно экспертной оценке;
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, получила 3 балла согласно экспертной оценке;
- сварка трехфазной дугой, получила 4 балла согласно экспертной оценке;
- плазменная сварка, получила 5 баллов согласно экспертной оценке.

Третьим критерием является стоимость сварочного оборудования, от которого зависит возможность и оперативность внедрения способа на конкретном предприятии. Рассматриваемые способы получили такие баллы:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами, получила 5 баллов согласно экспертной оценке;
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения, получила 4 балла согласно экспертной оценке;
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, получила 3 балла согласно экспертной оценке;
- сварка трехфазной дугой, получила 2 балла согласно экспертной оценке;
- плазменная сварка, получила 1 балл согласно экспертной оценке.

Четвёртым критерием является мобильность способа, которая позволяет оперативно перемещать оборудование по производственному участку и выполнять сварку в различных местах. Согласно экспертной оценке рассматриваемые способы сварки получили такие баллы:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами, получила 5 баллов согласно экспертной оценке;
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения, получила 4 баллов согласно экспертной оценке;
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, получила 3 балла согласно экспертной оценке;
- сварка трехфазной дугой, получила 2 балла согласно экспертной оценке;
- плазменная сварка, получила 1 балла согласно экспертной оценке.

Пятым критерием является условия труда сварщика, согласно экспертной оценке рассматриваемые способы получили такие баллы:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами, получила 1 балл согласно экспертной оценке;
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения, получила 2 балла согласно экспертной оценке;
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, получила 5 балла согласно экспертной оценке;
- сварка трехфазной дугой, получила 3 балла согласно экспертной оценке;
- плазменная сварка, получила 4 балла согласно экспертной оценке.

Шестым критерием является интегральный показатель экономичности рассматриваемого способа сварки. Согласно экспертной оценке способы получили следующие баллы:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами, получила 1 балл согласно экспертной оценке;
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения, получила 2 балла согласно экспертной оценке;
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, получила 3 балла согласно экспертной оценке;

- сварка трехфазной дугой, получила 4 балла согласно экспертной оценке;
- плазменная сварка, получила 5 баллов согласно экспертной оценке.

Таким образом, по результатам экспертной оценки рассматриваемых способов сварки получен суммарный балл:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами, получила 14 баллов согласно экспертной оценке;
- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения, получила 19 баллов согласно экспертной оценке;
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, получила 19 баллов согласно экспертной оценке;
- сварка трехфазной дугой, получила 20 баллов согласно экспертной оценке;
- плазменная сварка, получила 19 баллов согласно экспертной оценке.

На основании вышеизложенного следует заключить что применительно к случаю ремонтной заварки дефектов литья на деталях из алюминиевых сплавов одинаково эффективными будут четыре способа сварки:

- механизированная сварка в защитных газах проволокой сплошного сечения,
- аргонодуговая сварка неплавящимся электродом,
- сварка трехфазной дугой,
- плазменная сварка.

1.5 Выводы по первой главе и формулировка задач диссертационного исследования

В настоящем диссертационном исследовании поставлена цель – повышение производительности и качества ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов.

При анализе базовой технологии ремонтной сварки, которая выполняется с применением ручной аргодуговой сварки неплавящимся электродом, сформулированы недостатки, устранение которых позволит достигнуть поставленной цели. В качестве первого недостатка следует отметить низкую производительность процесса по сравнению с другими, получившими распространение способами сварки. Вторым недостатком является существенная зависимость полученных при сварке результатов от квалификации самого сварщика.

При анализе свойств применяемого сплава сформулированы затруднения, сопровождающие ремонтную сварку.

Во-первых, алюминиевые сплавы имеют высокую теплопроводность, которая приводит к получению значительного уровня остаточных напряжений и деформация, что сопровождается короблением детали и появлением в ней трещин.

Во-вторых, повышенный по сравнению со сталями коэффициент термического напряжения также вызывает коробление детали и появление в ней трещин.

В-третьих, поверхность алюминиевых деталей покрыта окисной плёнкой, которая имеет высокую температуру плавления, превышающую температуру плавления основного металла, в результате этого при сварке шов загрязняется окисными пленами. Загрязнению металла шва окисными плёнами также способствует то, что оксид алюминия имеет более высокую плотность, чем расплавленный алюминий, поэтому не остаётся на поверхности сварочной ванны, а тонет в ней.

В-четвёртых, расплавленный алюминий активно растворяет в себе газы, которые интенсивно выходят из него при кристаллизации, что приводит к образованию пористости, которая становится серьёзной проблемой при сварке алюминиевых сплавов.

В-пятых, все алюминиевые сплавы имеют провал прочности при нагреве, в результате чего форма сварного шва теряет стабильность, а также повышается вероятность получения горячих трещин.

Таким образом, проведённый анализ позволяет сформулировать задачи диссертационного исследования.

В ходе выполнения первой задачи будет исследована возможность повышения эффективности ремонтной аргодуговой сварки неплавящимся электродом.

В ходе выполнения второй задачи будет исследована возможность повышения эффективности ремонтной механизированной сварки в защитных газах проволокой сплошного сечения.

В ходе выполнения третьей задачи будет исследована возможность повышения эффективности ремонтной сварки трехфазной дугой.

В ходе выполнения четвертой задачи будет исследована возможность повышения эффективности ремонтной плазменной сварки.

Фронтальное решение поставленных задач (предстоит рассмотреть сразу четыре способа сварки) должно основываться на результатах достижений исследователей-сварщиков в области повышения эффективности сварочных процессов.

Недостаточное оснащение лабораторной базы заставляет применять литературный обзор источников научно-технической информации по направлению диссертационного исследования. При этом следует рассмотреть как достижения отечественных инженеров, так и иностранных.

2. Повышение эффективности сварки неплавящимся электродом при ремонтной сварке алюминиевых сплавов

При сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в швах часто встречаются включения оксидной пленки [27], [25], [28]. Кроме того, литийсодержащие сплавы отличаются повышенной склонностью к порообразованию [2], [18].

Методы сварки, основанные на интенсификации перемешивания металла, способствуют его дегазации, измельчению оксидных включений в донной части сварочной ванны и выносу их на поверхность под непосредственное воздействие дуги [19], [29], [41], [44], [45]. Эффективное перемешивание расплавленного металла по всему объему сварочной ванны обеспечивается при сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой. При этом пульсирующее силовое воздействие дуги возникает в результате изменения амплитудных значений тока прямой и обратной полярности (асимметричный ток) или больших перепадов амплитуды в период импульса и паузы (модулированный ток) [34], [56]. Поскольку давление дуги пропорционально квадрату амплитудного значения тока и практически мгновенно «реагирует» на его изменения, то периодическое повышение тока способствует увеличению глубины погружения дуги в расплавленный металл и его перемешиванию, обеспечивая разрушение оксидных плен и всплытие пузырьков газа [52].

В рамках работы [33] проведено экспериментальное определение параметров асимметричного и модулированного токов, при которых достигается наиболее эффективное разрушение оксидной пленки и удаление пузырьков газа из расплавленного металла сварочной ванны. Выполняли сварку неплавящимся электродом в аргоне стационарной и пульсирующей дугой асимметричным и модулированным токами от источников питания BRIMA TIG 2500P, ИСВУ-315, AURORA PRO, которые представлены на

рисунке 15. Проплавы швов формировались на основе из нержавеющей стали с канавкой полусферической формы.



Рисунок 15 – Источники питания для аргодуговой сварки: BRIMA TIG 2500P (а), ИСВУ-315 (б), AURORA PRO (в)

В качестве присадок при сварке образцов сплава АМгб использовали стандартную проволоку СвАМгб, для сплава 1420 – СвАМгбЗ, а для сплава 1460 – Св1201. Свариваемые листы и присадочные материалы подвергали химическому травлению по общепринятой технологии. Для оценки влияния параметров тока на образование включений оксидной пленки в швах сплава АМгб стыковые соединения листов толщиной 6 мм собирали с гарантированным зазором $b=1,2$ мм [33]. Стыки листов сплавов 1420 и 1460 толщиной 6 мм собирали без зазора, поскольку характерные для литийсодержащих сплавов протяженные нитевидные оксидные включения образуются в швах и при обычных условиях сборки. Непосредственно перед сваркой кромки свариваемых листов зачищали механическим способом с трех сторон на глубину не менее 0,1 мм. Протяженность дефектов измеряли на продольных изломах швов. Относительную протяженность включений оксидной пленки в швах $I_{o.п.}$ определяли как суммарную длину дефектов в расчете на 1 погонный метр шва. Поскольку в конструкциях ответственного назначения длина отдельных дефектов ограничивается, то в каждом варианте измеряли и максимальную протяженность отдельных оксидных включений в швах I_{max} .

Для оценки пористости швов при сварке сплавов 1420 и 1460 зачищали только лицевые и боковые поверхности свариваемых кромок. С нижних поверхностный слой не снимали, чтобы исследовать поведение пузырьков газа, образующихся в нижней части сварочной ванны. Пористость сварных соединений оценивали по рентгеновским снимкам: подсчитывали количество пор различного диаметра в расчете на 100 мм шва, а затем вычисляли их общий объем, считая поры сферическими.

Проведенный анализ продольных изломов швов сплава АМгб показал, что относительная протяженность включений зависит от амплитудных значений и времени протекания тока при прямой $\tau_{пр}$ и обратной $\tau_{об}$ полярностях, как показано в таблице 6. Увеличение $\tau_{об}$ и уменьшение $\tau_{пр}$ способствуют активизации процессов катодного разрушения оксидной пленки во время сварки и сокращению протяженности дефектов в швах. Амплитудная асимметрия сварочного тока вызывает интенсивные колебания расплавленного металла при изменении полярности за счет резких перепадов давления дуги. В период прохождения тока прямой полярности силовое воздействие дуги обеспечивает увеличение крутизны фронта проплавления и глубины погружения дуги в кратер сварочной ванны. В результате этого происходит дробление оксидной пленки в донной части, а ее отдельные неразрушенные частицы выносятся потоками расплавленного металла на поверхность и попадают под непосредственное воздействие дуги. Поэтому применение асимметричного тока $I_{пр} = 2I_{об}$ и $2\tau_{пр} = \tau_{об}$ позволяет уменьшить в 3 раза протяженность включений оксидной пленки шва и в 3...4 раза максимальную длину отдельных дефектов в швах сплава АМгб.

Кроме того, применение тока с преобладанием $\tau_{об}$ улучшает катодную очистку поступающей в сварочную ванну присадочной проволоки. А поскольку именно недостаточное разрушение оксидной пленки на поверхности присадки является одной из основных причин образования протяженных нитевидных оксидных включений в швах при сварке

неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов, то интенсивная катодная очистка присадочной проволоки способствует повышению качества швов. Так, при сварке пульсирующей дугой асимметричным током ($I_{пр} = 2I_{об}$ и $2\tau_{пр} = \tau_{об}$) по сравнению со сваркой обычным синусоидальным током вероятность получения бездефектных швов сплавов 1420 и 1460 повышается в 3 раза.

Таблица 6 – Влияние параметров асимметрии разнополярного тока прямоугольной формы на относительную протяжённость включений окисной плёны в швах сплава АМг6

| $I_{пр}, А$ | $I_{об}, А$ | $\tau_{пр}, мс$ | $\tau_{об}, мс$ | $f, Гц$ | $l_{о.п.}, мм/м$ | $l_{max}, мм$ |
|-------------|-------------|-----------------|-----------------|---------|------------------|---------------|
| 290 | 290 | 4,6 | 4,6 | 109 | 78 | 9 |
| | | 8,0 | 8,0 | 63 | 86 | 10 |
| | | 10,4 | 10,4 | 48 | 102 | 12 |
| | | 8,0 | 12,8 | 48 | 73 | 9 |
| | | 4,6 | 8,0 | 79 | 65 | 9 |
| | | 6,1 | 12,8 | 53 | 64 | 8 |
| | | 4,6 | 10,4 | 67 | 59 | 8 |
| 440 | 220 | 4,6 | 4,6 | 109 | 58 | 7 |
| | | 8,0 | 8,0 | 63 | 67 | 9 |
| | | 10,4 | 10,4 | 48 | 79 | 9 |
| | | 8,0 | 12,8 | 48 | 47 | 6 |
| | | 4,6 | 8,0 | 79 | 40 | 6 |
| | | 6,1 | 12,8 | 53 | 38 | 5 |
| | | 4,6 | 10,4 | 67 | 31 | 5 |
| 300* | 300 | 10,0 | 10,0 | 50 | 125 | 21 |

* Сварка стационарной дугой

Использование асимметричного по амплитуде тока улучшает условия дегазации расплавленного металла за счет его колебаний, возникающих вследствие резких изменений силового воздействия дуги при смене полярности. В результате в сварных соединениях литийсодержащих сплавов 1420 и 1460 поры остаются только в зонах сплавления швов с основным металлом. При этом по сравнению с симметричным током объём пустот снижается на 60...70 %, как показано в таблице 7.

Интенсифицировать колебания расплавленного металла и его перемешивание по всему объёму сварочной ванны удастся при сварке

пульсирующей дугой модулированным током. При частоте модуляции $f_m = 1...4$ Гц вследствие резких колебаний жидкого металла происходит механическое разрушение протяженных включений оксидной пленки, что приводит к уменьшению I_{max} . При этом относительная протяженность оксидной пленки в швах $I_{o.п.}$ существенно зависит от соотношения длительности импульсов τ_n и пауз τ_p сварочного тока, как показано в таблице 8.

Таблица 7 – Пористость сварных соединений сплава 1420, полученных при сварке симметричным и асимметричным током

| $I_{пр}$, А | $I_{об}$, А | $\tau_{пр}$, мс | $\tau_{об}$, мс | Количество пор на 100 мм шва, шт., диаметром, мм | | | Суммарное количество пор, шт. | Объём пор на 100 мм шва, мм ² | Расположение пор |
|--------------|--------------|------------------|------------------|--|-----------|-----------|-------------------------------|--|------------------|
| | | | | 0,1...0,3 | 0,4...0,6 | 0,7...1,0 | | | |
| 260* | 260 | 10,4 | 10,4 | 255 | 38 | 27 | 320 | 12,2 | Ш+ЗС |
| 360** | 180 | 10,4 | 10,4 | 212 | 26 | 19 | 257 | 8,7 | ЗС |
| 170** | 340 | 10,4 | 10,4 | 219 | 19 | 15 | 253 | 7,0 | ЗС |
| 260*** | 260 | 11,4 | 6,0 | 221 | 29 | 21 | 271 | 9,6 | Ш+ЗС |
| 250*** | 250 | 7,0 | 14,0 | 208 | 17 | 18 | 243 | 7,8 | Ш+ЗС |

* симметричный ток

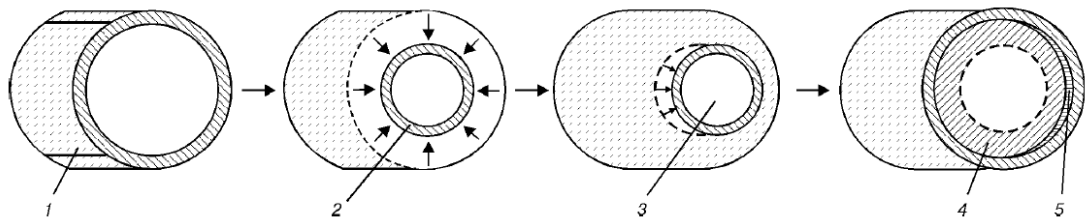
** асимметричный по амплитуде ток

*** асимметричный по длительности ток

Ш – сварной шов, ЗС – зона сплавления, Ш+ЗС – сварной шов и зона сплавления

Это обусловлено различными условиями окисления расплавленного металла и катодного разрушения им оксидной пленки в моменты импульсов и пауз сварочного тока. Во время паузы эффективность катодной очистки существенно снижается вследствие уменьшения уровня тока, а процесс окисления металла, расплавленного предыдущим импульсом тока, активизируется. Поэтому следующий импульс тока с низкой частотой модуляции и большой длительностью паузы не обеспечивает полного катодного разрушения образовавшейся оксидной пленки, как показано на рисунке 16. Увеличение τ_n и уменьшение τ_p модулированного тока при одной и той же частоте модуляции способствуют улучшению катодной

очистки и снижению интенсивности окисления расплавленного дугой металла. Относительная протяженность включений оксидной пленки в швах сплава АМгб, полученных при сварке модулированным током с $f_m = 1 \dots 4$ Гц и длительности импульсов тока, равной 70... 80 % длительности цикла, на 20...25 % меньше, чем при сварке симметричным синусоидальным током. При $f_m > 4$ Гц эффективность динамического воздействия дуги на расплавленный металл снижается.



1 – окисленная поверхность переплавленного металла шва, 2 – зона катодной очистки, 3 – поверхность расплавленного металла шва, 4 – шов, 5 – стык впереди сварочной ванны

Рисунок 16 – Схема катодного разрушения оксидной пленки при сварке модулированным током

Таблица 8 – Влияние параметров модуляции разнополярного тока прямоугольной формы на относительную протяжённость включений оксидной пленки в швах сплава АМгб

| I_n, A | I_p, A | $\tau_n, мс$ | $\tau_p, мс$ | $\frac{\tau_p}{\tau_n + \tau_p}, \%$ | $f_m, Гц$ | $l_{o.p.}, мм/м$ | $l_{max}, мм$ |
|----------|----------|--------------|--------------|--------------------------------------|-----------|------------------|---------------|
| 445 | 135 | 62,5 | 62,5 | 50 | 8 | 126 | 20 |
| 365 | 110 | 87,5 | 37,5 | 70 | 8 | 116 | 18 |
| 445 | 135 | 125,0 | 125,0 | 50 | 4 | 119 | 16 |
| 365 | 110 | 175,0 | 75,0 | 70 | 4 | 103 | 12 |
| 340 | 100 | 200,0 | 50,0 | 80 | 4 | 85 | 8 |
| 445 | 135 | 250,0 | 250,0 | 50 | 2 | 137 | 9 |
| 365 | 110 | 350,0 | 150,0 | 70 | 2 | 107 | 8 |
| 340 | 100 | 400,0 | 100,0 | 80 | 2 | 82 | 7 |
| 445 | 135 | 500,0 | 500,0 | 50 | 1 | 194 | 11 |
| 365 | 110 | 700,0 | 300,0 | 70 | 1 | 95 | 8 |
| 340 | 100 | 800,0 | 200,0 | 80 | 1 | 90 | 8 |

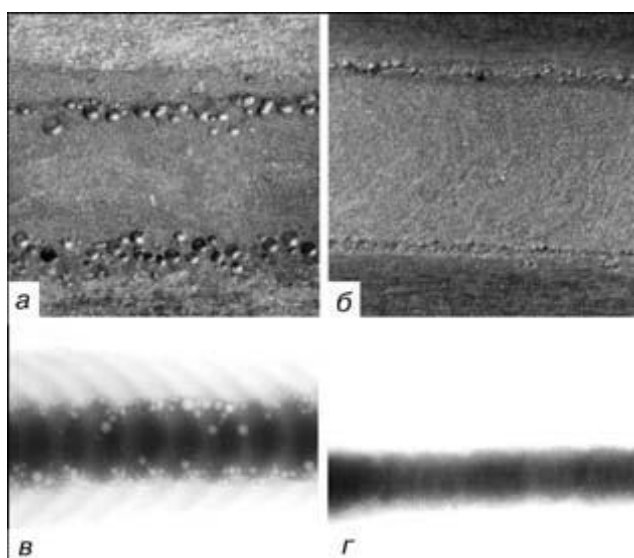
Частота модуляции тока существенно влияет и на процессы дегазации расплавляемого дугой металла, что демонстрируется данными из таблицы 4. При значительной длительности импульсов и пауз модулированного тока

($f_m = 1...2$ Гц) в корневой части швов и зонах его сплавления с основным металлом наблюдается большое количество пор диаметром до 1 мм их суммарный объем составляет 10,6... 16,7 мм³, как показано на рисунке 17-а и рисунке 17-в. Повышение частоты модуляции до 5 Гц создает благоприятные условия для интенсивного всплытия пузырьков газа на поверхность сварочной ванны. В результате в металле шва поры полностью отсутствуют, а в зоне сплавления их диаметр не превышает 0,3 мм при суммарном объеме пустот 1,2... 1,5 мм³, как показано на рисунке 17-б и рисунке 17-г.

При дальнейшем повышении частоты модуляции количество и диаметр пор в зоне сплавления увеличиваются. Пытающиеся всплыть пузырьки газа не успевают достигнуть поверхности сварочной ванны и остаются в кристаллизующемся металле, как показано на рисунке 18.

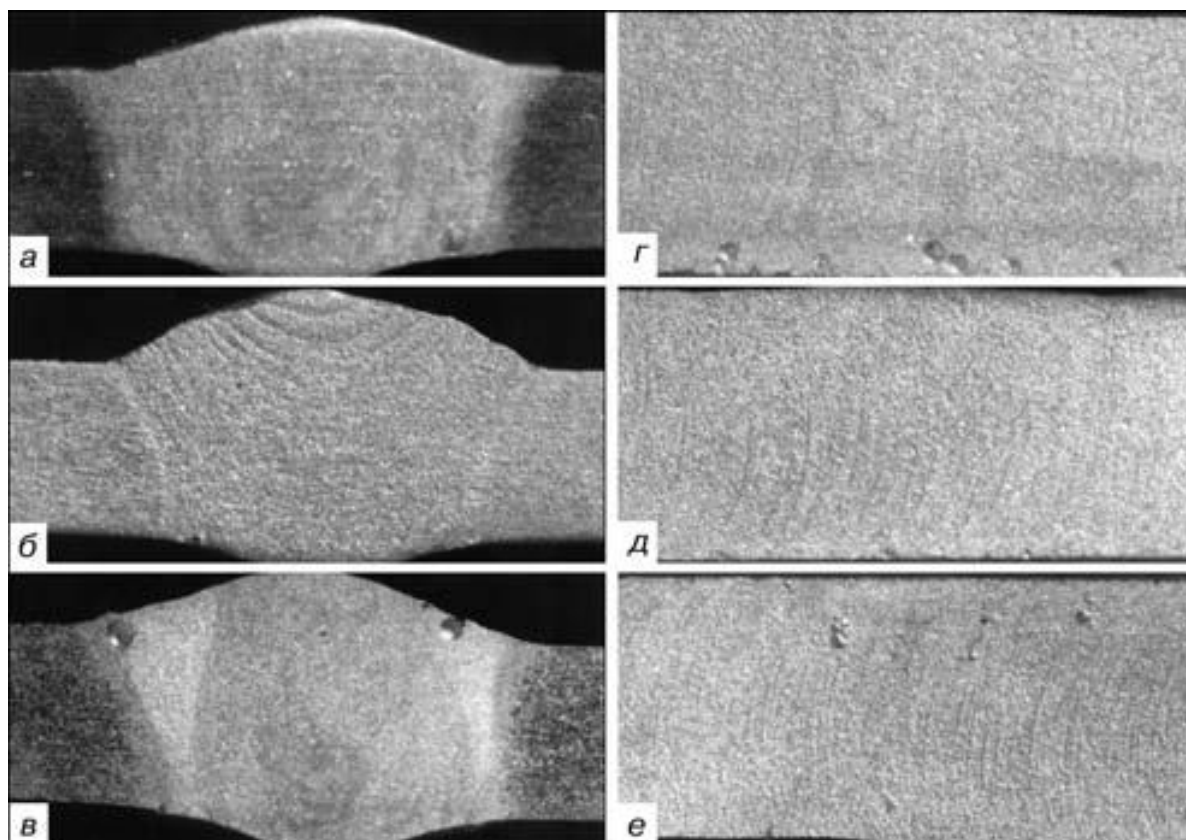
На основании результатов проведенных исследований сделаны следующие выводы.

При сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой алюминиевых сплавов по сравнению со стационарной дугой сокращается протяженность оксидной пленки в швах и пористость сварных соединений.



а, в – сварка пульсирующей дугой с $f_m = 1$ Гц;
б, г – сварка пульсирующей дугой с $f_m = 5$ Гц

Рисунок 17 – Макрошлифы корня шва со снятым проплавом (а, б – увеличение $\times 2$) и рентгенограмма швов сплава 1420 (в, г)



а, г – сварка стационарной дугой; б, д – сварка пульсирующей дугой $f_m = 5$ Гц; в, е – сварка пульсирующей дугой $f_m = 10$ Гц

Рисунок 18 – Поры на макрошлифах поперечных с увеличением $\times 3$ (а, б, в) и продольных с увеличением $\times 4$ (г, д, е) при сварке сплава 1420

Применение асимметричного тока ($I_{пр} = 2I_{об}$ и $2\tau_{пр} = \tau_{об}$) способствует интенсификации перемешивания расплавленного металла и активизации процессов катодного разрушения оксидной пленки. Это позволяет в 3 раза уменьшить относительную протяженность включений оксидной пленки в швах сплава АМгб и вероятность образования протяженных нитевидных включений в швах литийсодержащих сплавов 1420 и 1460.

Резкие изменения силового воздействия дуги во время импульсов и пауз модулированного тока с $f_m = 5$ Гц обеспечивают также наиболее благоприятные условия для удаления газовых пузырьков из расплава сварочной ванны. При этом по сравнению со сваркой стационарной дугой обычным синусоидальным током суммарный объем пустот в сварных соединениях сплавов 1120 и 1160 уменьшается в 7... 10 раз.

Выводы по второй главе

В ходе выполнения второй главы настоящей выпускной квалификационной работы проводились литературные и натурные исследования в области повышения эффективности ремонтной сварки и наплавки деталей машин из алюминиевых сплавов с применением аргонодуговой сварки неплавящимся электродом.

Исследования проводились с использованием промышленных сварочных источников: BRIMA TIG 2500P, ИСВУ-315, AURORA PRO. В качестве образцов для проведения экспериментальной сварки выступали пластины толщиной 6 мм из сплава АМг6, сплава 1420 и сплава 1460. Выполняли сварку встык с гарантированным зазором, что повышало содержание включений в сварной шов.

Сварку вели стационарной дугой (на переменном токе), импульсной дугой с одинаковой формой импульса и импульсной дугой с различной формой импульсов на прямой полярности и обратной полярности.

Установлено, что применение импульсной дуги с различной формой импульсов на прямой и обратной полярностях позволяет существенно расширить технологические возможности сварки неплавящимся электродом. При этом амплитуда импульса тока на прямой полярности должна быть в два раза больше амплитуды импульса тока на обратной полярности, а продолжительность импульса тока на прямой полярности должна быть в два раза меньше продолжительности импульса тока обратной полярности. В этом случае удаётся в несколько раз уменьшить количество пор и включений в металле сварного шва.

Также установлено, что сварка модулированным током с частотой порядка 5...10 Гц обеспечивает улучшение дегазации сварного шва. По сравнению со сваркой стационарной дугой на переменном токе количество пор при сварке сплавов 1120 и 1160 уменьшается в 7... 10 раз.

3 Повышение эффективности трехфазной ремонтной сварки

На рисунке 19 представлена схема подключения источника питания при ремонтной сварке и наплавке трёхфазной дугой. Такая схема позволяет выполнять регулирование тепловложения за счёт того, что часть протекающего сварочного тока перераспределяется на сварочную проволоку. Таким образом, сварочный ток проходит через изделие и через присадочную проволоку. Это достигается за счёт того, что средняя фаза источника питания подключается сама сварочная проволока, а не изделие. При такой схеме подключения удастся прогреть проволоку перед выполнением процесса сварки и наплавки, что усиливает протекание процессов катодного распыления.

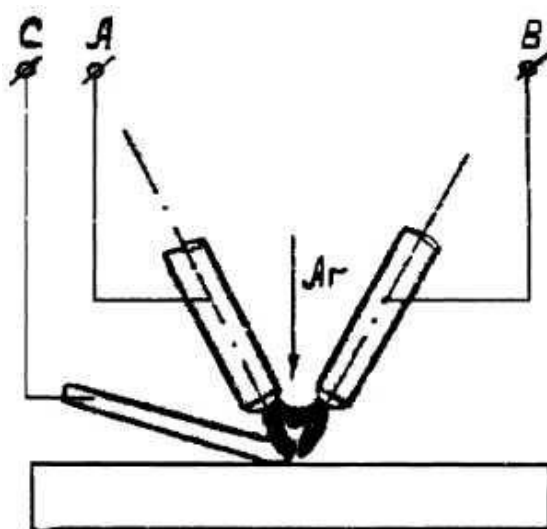


Рисунок 19 – Схема питания трёхфазной дуги с регулируемым тепловложением

Представленная схема подключения позволяет сваривать детали из алюминиевых сплавов в широком диапазоне толщин, при этом происходит автоматическое регулирование вложения тепла, что позволяет избежать образования прожогов. Также при таком способе сварки наблюдается пониженный уровень остаточных напряжений и деформаций в конструкции,

количество наплавленного металла и производительность повышается по сравнению с традиционными способами сварки и наплавки.

При применении сварки и наплавки трёхфазной дуги следует учитывать некоторые особенности процесса. Например, возбуждение дуги следует выполнять не на детали вблизи дефекта, как при традиционном способе сварки, а вне детали. Для зажигания трехфазной дуги необходимо коснуться углём электродов горелки, в результате чего загорится и будет продолжать гореть дежурная дуга между электродами.

При поднесении горящего факела к дефектному месту дуга между электродами выполняет функцию предварительного подогрева поверхности детали. При этом расстояние между горелкой и деталью может изменяться в широком диапазоне без риска обрыва дуги, что позволяет выбирать оптимальный режим прогрева детали, избежать получения прожогов, подрезов и непроваров.

Также возможность изменения в широком диапазоне расстояния между горелкой и деталью позволяет выполнять сварку и наплавку по сложной траектории и в различных пространственных положениях, что особенно важно при выполнении ремонтных работ.

С использованием источника научно-технической информации [9], [12], [40] назначим параметры режима ремонтной сварки: сила тока составляет 150...180 А, диаметр присадочной проволоки составляет 3 мм, диаметр неплавящихся электродов составляет 3 мм, скорость сварки поддерживают 8...12 метров в час, расход аргона составляет 7...8 литров в минуту.

В качестве присадочной проволоки предложим к использованию разработку авторов [32].

Состав проволоки представлен в таблице 9. Основными химическими элементами в проволоке являются алюминий, кремний, хром и цирконий. Примесями являются железо, цинк, медь и олово. Содержание основных элементов задаётся, в примесей – ограничивается.

Таблица 9 – Состав предлагаемой сварочной проволоки [32]

| Al | Si | Cr | Zr | Fe | Zn+Sn | Cu |
|-----------|---------|-----------|-----------|------|-------|------|
| Остальное | 4,5...6 | 0,8...1,2 | 0,7...1,2 | <0,6 | <0,1 | <0,2 |

Предлагаемая проволока позволяет уменьшить размер кристаллитов при сварке и наплавке деталей из алюминиевых сплавов. Получение крупных зёрен нежелательно, так как в этом случае возможно образование холодных и горячих трещин, а также снижение эксплуатационных свойств наплавленного металла. За счёт введения в проволоку хрома и циркония удастся повысить коррозионную стойкость наплавленного металла, которая при сварке традиционной проволокой снижается из-за повышенного содержания в проволоке кремния. Введение в состав проволоки циркония позволяет также снизить размеры зёрен металла сварного шва.

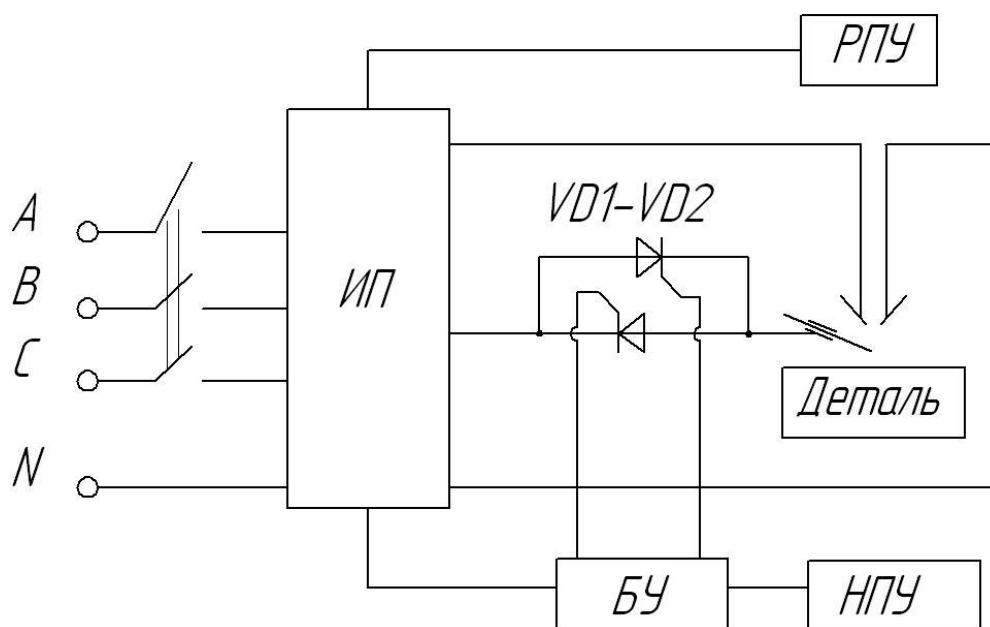
Для питания сварочной дуги предлагается к использованию представленный на рисунке 20 источник УДГТ-315, который был разработан сотрудниками кафедры сварки Тольяттинского государственного университета [9], [11], [40].



Рисунок 20 – Источник питания трёхфазной дуги

Такой источник обладает круто падающей вольтамперной характеристикой, задаваемой трансформатором с увеличенным потоком рассеяния. Регулирование сварочного тока может осуществляться в широком диапазоне, составляющем 135...550 А, и осуществляется путём изменения расстояния между первичной и вторичной обмотками сварочного трансформатора. В цепь изделия включается дополнительная конденсаторная батарея, которая позволяет подавить постоянную составляющую сварочного тока.

Расширение технологических возможностей источника питания выполнено за счёт его дополнительного комплектования тиристорным регулятором тока. Установка силовых тиристоров VD1-VD2 показана на рисунке 21. На функциональной схеме видно, что силовые тиристоры включаются в цепь сварочной проволоки, что позволяет выполнять регулирование протекающего через неё тока. Регулирование величины тока, протекающего через проволоку, осуществляется с пульта управления.



ИП – источник питания, БУ – блок управления, РПУ – ручной пульт управления, НПУ – ножной пульт управления, VD1-VD2 – тиристорный регулятор тока

Рисунок 21 – Функциональная схема сварочного поста

Для того, чтобы сделать более удобным управление и настройку источника питания (обозначен на схеме как ИП), в схему сварочного поста включен ручной пульт дистанционного управления (обозначен на схеме как РПУ) и ножной пульт дистанционного управления (обозначен на схеме как НПУ). Ручной пульт управления РПУ позволяет выполнять настройку источника питания, которая заключается в задании величины сварочного тока и его контроле при помощи цифровой индикации. Ножной пульт управления позволяет корректировать процесс в ходе выполнения ремонтной сварки и наплавки. При его помощи становится возможным дистанционное зажигание и гашение сварочной дуги, что может быть проведено при занятых руках сварщика.

Для заварки дефекта предлагается к использованию горелка РГТ-6, которая также была разработана коллективом кафедры сварки Тольяттинского государственного университета и позволяет выполнять ремонтную сварку и наплавку током до 350 А в любом пространственном положении. Горелка позволяет подсвечивать дефектный участок и выполнять его предварительный подогрев, обеспечивая при этом надёжную защиту металла от воздействия воздуха.

Результат проведённой ремонтной сварки и наплавки в случае восстановления деталей машин из алюминиевых сплавов в значительной степени зависит от качества и правильности выполнения подготовительных операций. Перед тем, как приступать к ремонтной сварке и наплавке следует выполнить очистку поверхности деталей и сварочной проволоки. При подготовке проволоки следует удалить с её поверхности консервационное покрытие, окисную плёнку, жир, влагу и другие загрязнения.

Покрывающие поверхность деталей из алюминиевых сплавов и поверхность проволоки окисная плёнка существенно снижает качество ремонтной сварки. Попадание в сварной шов частиц плёнки вызывает усиление порообразования и снижает прочность сварного шва. Практически сразу после удаления с поверхности окисная плёнка начинает снова

образовываться, и восстановление её первоначальной толщины происходит всего за несколько дней. Однако, если удалить застарелую окисную плёнку с поверхности деталей, вновь образующаяся плёнка будет меньшей толщины, чем первоначальная и в течение нескольких часов не будет оказывать существенное отрицательное влияние на качество сварки и наплавки. Удаление такой окисной плёнки при сварке происходит в результате процесса катодного распыления.

Перед выполнением ремонта детали в месте исправления дефекта обрабатывают раствором щелочи NaOH, который нагрет до температуры 60...70 °С. В результате такой обработки в течение 2...3 минут происходит стравливание с поверхности деталей окисной плёнки. Далее остатки щёлочи и продукты реакции смывают водой и просушивают поверхность детали сжатым воздухом.

Применительно к сварочной проволоке механическую очистку не проводят, ограничиваясь химической чисткой.

Перед выполнением ремонтной сварки от бухты проволоки отмеряют и отрезают необходимое количество проволоки, которую нарезают на прутки. Далее нарезанные прутки обрабатывают 10 % щелочным раствором NaOH при температуре раствора 60...70 °С. Обработку проводят в течение 5...10 минут, после чего промывают прутки в проточной воде и просушивают сжатым воздухом.

Непосредственно перед проведением ремонтной сварки место сварки зачищают при помощи металлической щётки. Щетина щетки должна быть из нержавеющей проволоки и иметь толщину ворса не более 0,15 мм. Применение наждачного круга нежелательно по причине оставления на поверхности деталей царапин, в которые забивается грязь, что становится причиной образования пор.

После зачистки следует протереть место зачистки сухой ветошью. После такой обработки ремонтные работы должны быть проведены не позднее 6 часов.

Первоначально следует осмотреть трещины, выявляя расположение её концов. Если визуально концы трещины определить сложно, можно применить нагрев при помощи газовой горелки до температуры 100...150 °С.

Концы трещины следует засверлить с использованием сверла диаметром 5 мм, при этом положение центра сверла должно быть на 3...5 мм дальше конца трещины.

Разделку трещины проводят с применением молотка и зубила. Разделка должна проводиться на глубину, превышающую глубину залегания трещины не менее чем на 3 мм.

При ремонтной сварке применяется присадочная проволока диаметром 3 мм и неплавящийся электрод диаметром 3 мм. Ток сварки принимается равным 150...180 А. Скорость сварки составляет 8...12 метров в час.

Для выполнения заварки дефекта следует:

- замкнуть присадочную проволоку на детали;
- развести сварочную ванну;
- произвести перемещение присадочной проволоки в сварочную ванну;
- наплавить валик.

Для регулирования количества наплавляемого металла следует чередовать переключения в процессе работы присадочной проволоки между сварочной горелкой и деталью.

Применение ремонтной сварки трёхфазной дугой позволяет существенно повысить производительность работ. Также следует отметить высокую пространственную стабильность горения дуги, что становится полезным при исправлении дефектов на деталях со сложной геометрией. Высокая стабильность процесса катодной очистки обеспечивает гарантированное удаление окисной плёнки с поверхности детали.

Выводы по третьей главе

В ходе выполнения третьей главы настоящей выпускной квалификационной работы проведены исследования в области повышения ремонтной сварки и наплавки деталей из алюминиевых сплавов с применением трёхфазной дуги.

На основании литературных исследований предложена схема, которая позволяет регулировать тепловложение за счёт того, что часть протекающего сварочного тока перераспределяется на сварочную проволоку. Таким образом, сварочный ток проходит через изделие и через присадочную проволоку. Это достигается за счёт того, что средняя фаза источника питания подключается сама сварочная проволока, а не изделие. При такой схеме подключения удастся прогреть проволоку перед выполнением процесса сварки и наплавки, что усиливает протекание процессов катодного распыления.

В качестве присадочной проволоки предложена к использованию разработка отечественных авторов. Основными химическими элементами в проволоке являются алюминий, кремний, хром и цирконий. Примесями являются железо, цинк, медь и олово. Содержание основных элементов задаётся, а примесей – ограничивается.

В качестве оборудования для проведения трехфазной сварки предлагается к использованию разработанные на кафедре сварки Тольяттинского государственного университета горелка и источники питания трёхфазной дуги.

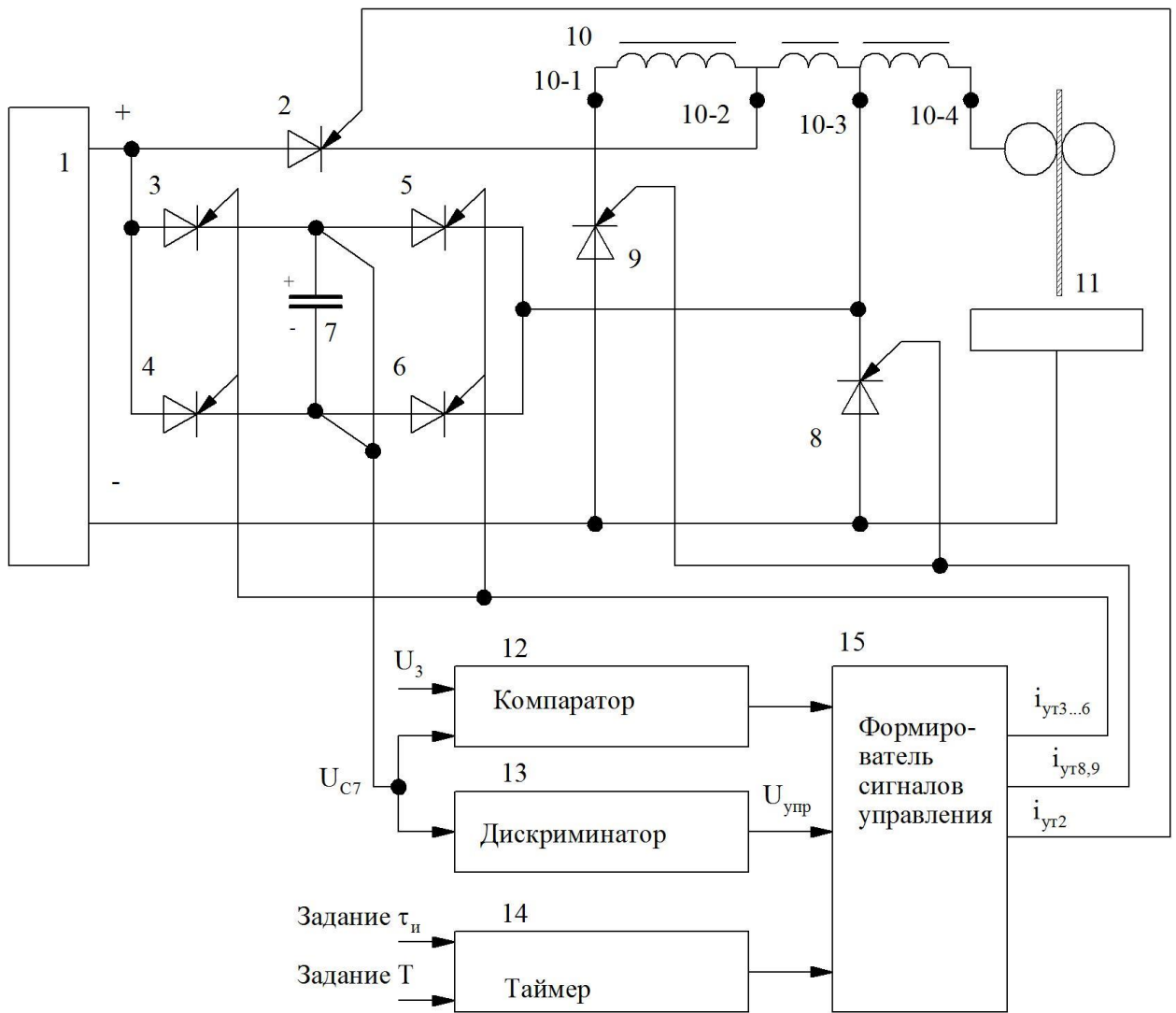
Составлена технологическая карта проектного процесса ремонтной сварки деталей машин из алюминиевых сплавов с применением трёхфазной дуги.

4 Повышение эффективности ремонтной механизированной сварки деталей из алюминиевых сплавов

Мировые производители сварочного оборудования (Cloos, Lincoln Electric, EWM, OTC, Fronius, Lorch, Kemppu) ведут интенсивные разработки в области повышения эффективности механизированной сварки алюминиевых сплавов за счёт применения импульсного управления сварочной дугой [14]. При этом удалось существенно снизить потери на разбрызгивание, которые довели до 1 %, при этом попадающие на поверхность детали капли имеют форму мелких шариков и не прилипают. За счёт управления горением дуги появилась возможность дозированного введения энергии в дуговой промежуток, контролировать протяженность фаз горения дуги, интенсифицировать перемешивание металла в сварочной ванне. Появилась возможность получения устойчивого дугового разряда при первом касании электродом детали. Сварочная дуга горит стабильно и предсказуемо [16], [24].

Для повышения эффективности импульсной сварки применим разработку отечественных исследователей [1], функциональная схема которой представлена на рисунке 22.

Предлагаемый источник питания содержит силовую часть и блок управления. В силовую часть включен источник питания с жёсткой вольтамперной характеристикой (показан на схеме позицией 1), силовой тиристор (показан на схеме позицией 2) и тиристорный мост, который содержит четыре тиристора (показаны на схеме позициями 3, 4, 5 и 6). В функциональную схему также включен конденсатор (показан на схеме позицией 7) и управляющие тиристоры (показаны на схеме позициями 8 и 9). В схему установлен индуктивный накопитель энергии (показан позицией 10), который имеет четыре отвода (показаны на схеме позициями 10-1, 10-2, 10-3 и 10-4). Выход сварочного источника 1 соединён с дуговым промежутком (обозначен на схеме позицией 11).



1 - источник постоянного тока; 2 - силовой тиристор; 3, 4, 5 и 6 - тиристорный мост; 7 - конденсатор; 8, 9 - управляющие тиристоры; 10 - индуктивный накопитель энергии; 11 - дуговой промежуток; 12 - компаратор; 13 - дискриминатор; 14 - таймер; 15 - формирователь импульсов

Рисунок 22 – Функциональная схема работы импульсного источника питания

Блок управления включает в себя компаратор, дискриминатор, таймер и формирователь импульсов (показаны на схеме позициями 12, 13, 14 и 15).

Таймер 14 служит для выработки временных сигналов для управления тиристорами 2, 3, 4 и 5. Компаратор 12 сравнивает измеренное значение напряжения U_{C7} на конденсаторе 7 с заданным значением, вырабатывает сигналы для управления работой тиристоров 8 и 9. Дискриминатор 13 постоянно определяет полярность заряда конденсатора 7. В зависимости от поступивших сигналов от таймера 14 и дискриминатора 13 формирователь

импульсов 15 подаёт сигнал на открытие пары тиристоров 3 и 6 или пары тиристоров 4 и 5.

На рисунке 23 представлена диаграмма работы предлагаемого источника импульсного питания сварочной дуги.

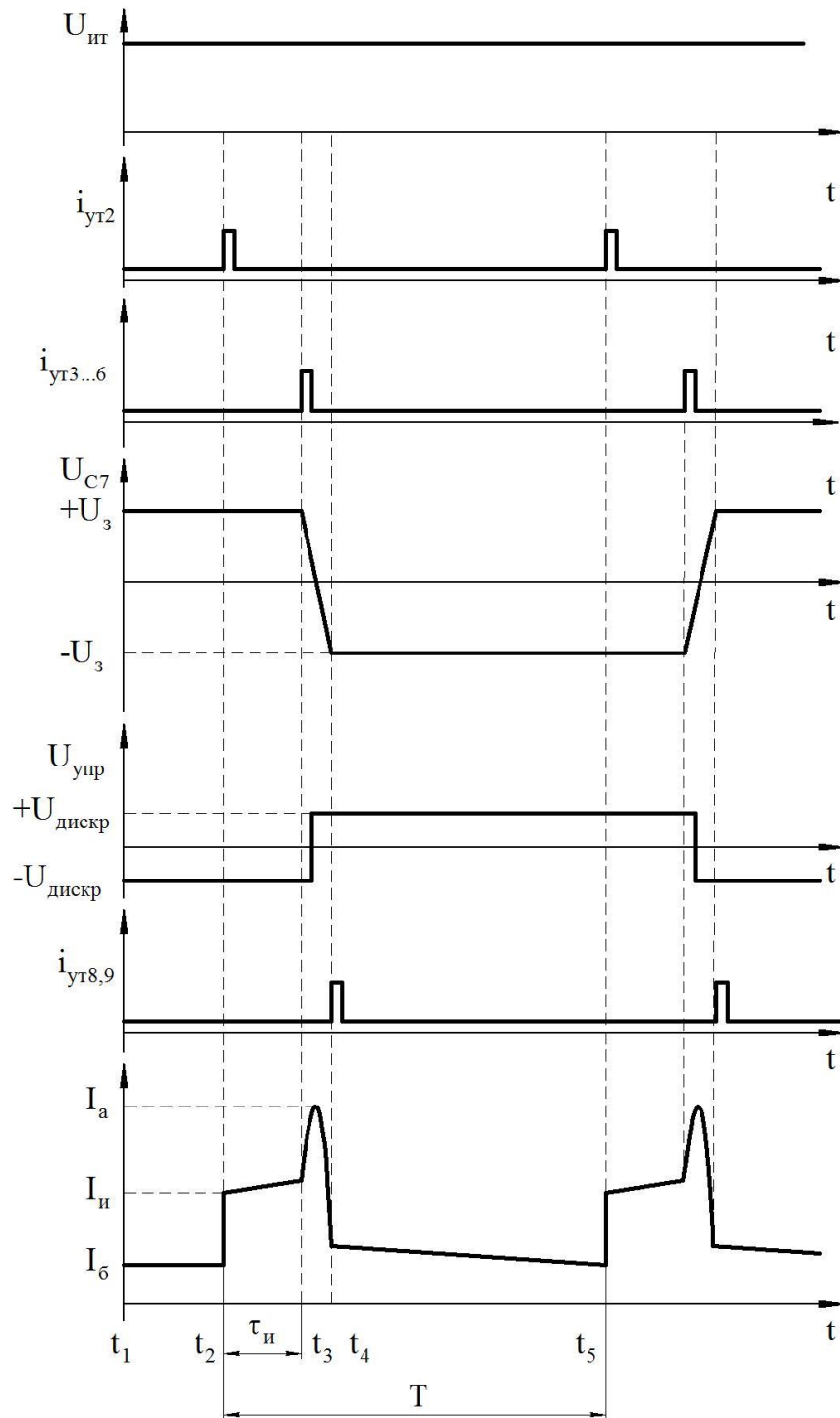


Рисунок 23 – Осциллограммы сигналов в предлагаемом источнике импульсного питания

Импульс сварочного тока имеет характеристики I_a – амплитуда импульса тока, $I_{п}$ – ток паузы, $I_{и}$ – ток предимпульса. Управляющие сигналы, которые поступают от формирователя импульсов управления: $i_{ут2}$ – импульс управления тиристором 2, $i_{ут3...6}$ – импульс управления тиристорами 3...6, $i_{ут8,9}$ – импульс управления тиристорами 8 и 9. От дискриминатора на формирователь импульсов поступает сигнал $U_{упр}$. Таймер задаёт временные параметры импульса: длительность импульса $\tau_{и}$ и период следования импульса T .

В таблице 10 и таблице 11 представлены параметры режима ремонтной сварки проволокой диаметром 1,6 мм.

Таблица 10 – Параметры режима импульсно-дуговой ремонтной сварки (постоянный ток обратной полярности)

| Диаметр проволоки | Сила тока | Напряжение | Вылет проволоки | Скорость сварки | Расход аргона |
|-------------------|-----------|------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1,6 мм | 60...80 А | 17...18 В | 10...12 мм | 35...40 м/ч | 8...9 л/мин |

Таблица 11 – Параметры импульсного питания сварочной дуги

| Параметр | Значение |
|--|-------------|
| Ток импульса $I_{и}$ | 500...600 А |
| Ток нормально горящей дуги $I_{г}$ | 60...80 А |
| Ток паузы $I_{п}$ | 20...30 А |
| Время импульса $t_{и}$ | 2...3 мс |
| Время горения нормально горящей дуги $t_{г}$ | 14...17 мс |
| Время паузы $t_{п}$ | 1...3 мс |

Сварку следует начинать с проплавления кратера, далее заполняют кратер расплавленным металлом. После этого перемещают горелку, смещая кратер, заполняя его расплавленным алюминием. Форма кратера при сварке должна быть похожа на каплю, которая сужается по направлению движения горелки. Видимая часть дуги при механизированной сварке алюминиевых сплавов составляет порядка 2...6 мм при расположении мундштука горелки на расстоянии 5...15 мм между торцом сопла и деталью. При сварке принимают технику ведения «углом вперёд», при этом угол наклона горелки

составляет 75...80 градусов. При механизированной сварке используется постоянный ток обратной полярности. Источник питания для механизированной сварки алюминиевых сплавов должен иметь жесткую вольтамперную характеристику или пологопадающую вольтамперную характеристику.

Поскольку проектная технология предусматривает применение формирователя импульсов, то в качестве источника питания может быть использован стандартный выпрямитель ВДУ-506, который представлен на рисунке 24-а. Для подачи проволоки применяется механизм ПДГ 312-5, представленный на рисунке 24-б.



Рисунок 24 – Выпрямитель ВДУ-506 (а) и механизм подачи ПДГ 312-5 (б)

В процессе сварки следует выдерживать заданное расстояние между электродом и деталью, в противном случае нарушается газовая защита. При завершении сварки следует заполнить кратер расплавленным металлом. После выключения сварочного тока следует обдуть аргоном кратер до его охлаждения.

После сварки зачищают усиление сварного шва, чтобы высота над уровнем основного металла не превышала 1 мм. Далее следует выполнить контроль качества сварного шва. Проводят визуальный контроль и ультразвуковой контроль сварного шва. Визуальный контроль проводят на 100 % сварных швов. Ультразвуковой контроль проводят на участках, вызывающих подозрение по результатам визуального контроля.

Выводы по четвёртой главе

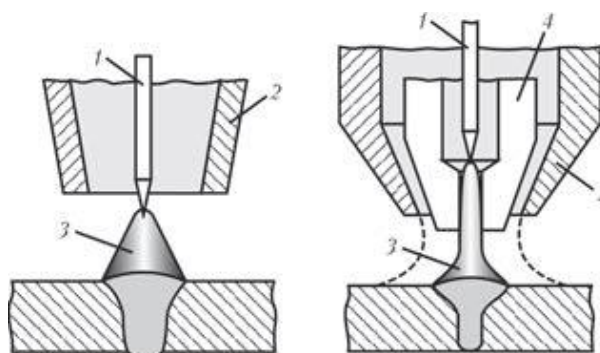
На основании проведённых литературных исследований следует признать, что потенциал механизированной сварки применительно к случаю ремонта изделий из алюминиевых сплавов до конца не раскрыт. Перевод процесса горения дуги из стационарного в импульсный позволяет расширить технологические возможности механизированной сварки в защитном газе проволокой сплошного сечения. Такой перевод в импульсный режим горения дуги возможен при импульсной подаче сварочной проволоки (для этого требуется оснащение сварочного аппарата специализированным шаговым устройством подачи) или управлением электрическими параметрами горения дуги (для этого требуется оснастить источник питания дополнительным формирующим импульсы устройством).

Для повышения эффективности механизированной ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов предложено применить импульсное питание сварочной дуги, для обеспечения которого применяется разработка отечественных инженеров. При этом удалось существенно снизить потери на разбрызгивание, которые довели до 1 %, при этом попадающие на поверхность детали капли имеют форму мелких шариков и не прилипают. За счёт управления горением дуги появилась возможность дозированного введения энергии в дуговой промежуток, контролировать протяженность фаз горения дуги, интенсифицировать перемешивание металла в сварочной ванне. Сварочная дуга горит стабильно и предсказуемо.

При этом в качестве источника питания сварочной дуги может быть использован стандартный выпрямитель сварочного тока, который за счёт оснащения дополнительным устройством импульсного управления позволяет формировать необходимую последовательность управляющих сигналов и осциллограммы тока и напряжения.

5 Повышение эффективности ремонтной плазменной сварки деталей из алюминиевых сплавов

Применение сжатой дуги для сварки деталей из алюминиевых сплавов началось с 50-х годов прошлого века. Предложено вести сварку сжатой дугой как прямого, так и косвенного действия. В случае применения дуги прямого действия разряд горит между неплавящимся электродом и деталью. При применении дуги косвенного действия разряд горит между неплавящимся электродом и соплом горелки. Сварка сжатой дугой может считаться продолжением развития аргонодуговой сварки неплавящимся электродом [50]. При этом в конструкцию горелки было введено дополнительное внутренне сопло, которое имеет водяное охлаждение и малый диаметр, составляющий порядка 1...5 мм. При этом газ выдувается через отверстие внутреннего сопла и формирует вокруг горячей дуги слой электрической и тепловой изоляции, что не позволяет дуге свободно расширяться. Такой газ называется «плазмообразующий». Газ, который выходит из внешнего сопла, имеющего большой диаметр, выполняет функцию защиты зоны сварки от воздействия атмосферы. Такой газ называется «защитный». Основные отличия плазменной сварки от традиционной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом представлены на рисунке 25.



1 – неплавящийся вольфрамовый электрод, 2 – сопло защитного газа, 3 – сварочная дуга, 4 – плазмообразующее сопло

Рисунок 25 – Схема процесса аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (а) и плазменной сварки (б)

По сравнению со свободной дугой, которая наблюдается при традиционной механизированной сварке и сварке неплавящимся электродом сжатая дуга, которая возникает при плазменной сварке, обладает более широкими технологическими возможностями. Такая дуга характеризуется большей пространственной стабильностью, проплавлением и возможностью исправления глубоко залегающих дефектов, меньшим тепловым действием на деталь. Это обеспечивается за счёт положительных особенностей сжатой дуги, к которым относят: высокую температуру дуги, составляющую порядка 18...25 тысяч градусов; цилиндрическую форму сжатой дуги, в то время, как при традиционных способах сварки форма дуги коническая; высокое давление сжатой дуги, которое превышает давление дуги при традиционных способах сварки в 6...10 раз; стабильное горение сжатой дуги при малых токах, составляющих порядка 1...30 А.

Также следует отметить, что сжатая дуга позволяет устранить разбрызгивание металла, что существенно улучшает внешний вид изделия и уменьшает трудоёмкость проведения сварки. Также производительность работ существенно повышается за счёт упрощения требований к подготовке и разделке деталей перед сваркой. Трудоёмкость подготовительных работ при плазменной сварке снижается в 2...3 раза по сравнению с традиционными способами сварки, а трудоёмкость послесварочной обработки – в 3...5 раз. При этом наблюдается снижение расхода сварочных материалов на 200...400 %.

Плазменную сварку деталей из алюминиевых сплавов можно вести на переменном токе, постоянном токе обратной полярности [49].

Первые опыты по сварке сжатой дугой алюминиевых сплавов проводились с использованием переменного синусоидального тока промышленной частотой 50 Гц. В этом случае за счёт механизма катодной очистки происходит разрушение окисной пленки на поверхности алюминиевых деталей в период, когда дуга горит на обратной полярности (на электроде положительный потенциал, на изделии отрицательный потенциал).

При использовании переменного тока приблизительно 70 % тепла выделяется на неплавящемся электроде. Этот способ сварки не подучил широкого распространения и в настоящий момент в научной литературе не удалось найти современных источников научно-технической информации по вопросу плазменной сварки на переменном токе.

При плазменной сварке алюминиевых сплавов может быть применена сжатая дуга, горящая на обратной полярности. Первые сведения о плазменной сварке алюминиевых сплавов на постоянном токе обратной полярности поступили в 1965 году [48]. При плазменной сварке на обратной полярности катодом является изделие, а в качестве анода выступает электродный узел плазматрона. По сравнению с плазменной сваркой на переменном токе сварку на постоянном токе обратной полярности легче организовать, так как в этом случае источником питания может служить стандартный сварочный выпрямитель. Существенным недостатком, ограничивающим применение плазменной сварки на обратной полярности, является высокое тепловое воздействие на сварочный электрод, в результате которого наблюдается ускоренное разрушение электрода. Так как приходится интенсифицировать охлаждение электрода, конструкция плазматрона для сварки на обратной полярности существенно усложняется, а габариты увеличиваются. Также следует принимать во внимание, что из-за различной эмиссионной способности окисных пленок на детали возможно блуждание дуги, которое усиливается при сварке на малом токе.

В настоящий момент исследовательские работы в области плазменной сварки на постоянном токе обратной полярности ведутся ОАО «Центр судостроения и судоремонта», в результате предложен сварочный полуавтомат ППН-200, который предназначен для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов на постоянном токе обратной полярности. На мировом рынке оборудования для плазменной сварки на обратной полярности представлены такие бренды, как EWM HIGHTEC WELDING AUTOMATION

GmbH (Tetrix 552 RC Plasma CW), L-TEC Schweißtechnik GmbH (Plasmaweld 402), Thermal Arc (Ultima150).

Следует принимать во внимание, что плазменная сварка на постоянном токе обратной полярности алюминиевых сплавов имеет высокую склонность к образованию водородной пористости в металле сварного шва, что показано в работе [55].

Дальнейшим продолжением развития сварки на переменном токе является сварка с чередованием полярностей на электроде и плазмообразующем сопле. Такая сварка позволяет снизить тепловую нагрузку на неплавящийся электрод плазматрона, при этом функция катодной очистки сохраняется. В полупериод прямой полярности горение дуги происходит между изделием и неплавящимся электродом. В полупериод обратной полярности дуга горит между медным соплом плазматрона и изделием. При таком способе, предложенном сотрудниками ИЭС им. Е.О. Патона, удаётся получить требуемую величину проплавления основного металла, качество катодной очистки. При этом повышается стойкость неплавящегося электрода.

Дальнейшее развитие плазменная сварка получила в способе питания разнополярными импульсами тока. Сварка разнополярным ассиметричным током получил название Variable Polarity Plasma Arc Welding (VPPA) и предложен авторами в 1978 году [53]. При сварке происходит формирование дополнительного импульса при переходе от прямой полярности к обратной. Это позволило получить надежное возбуждение дуги при смене полярности. При этом импульсы тока имеют несимметричную форму, преобладает импульс прямой полярности, а длительность импульса обратной полярности принимается минимальной для обеспечения процесса катодной очистки. Длительности импульсов тока при прямой и обратной полярности относятся как 3:1, амплитуда импульса обратной полярности на 30...40 А выше амплитуды импульса прямой полярности. На рисунке 26 представлено соотношение импульсов прямой и обратной полярности при сварке.

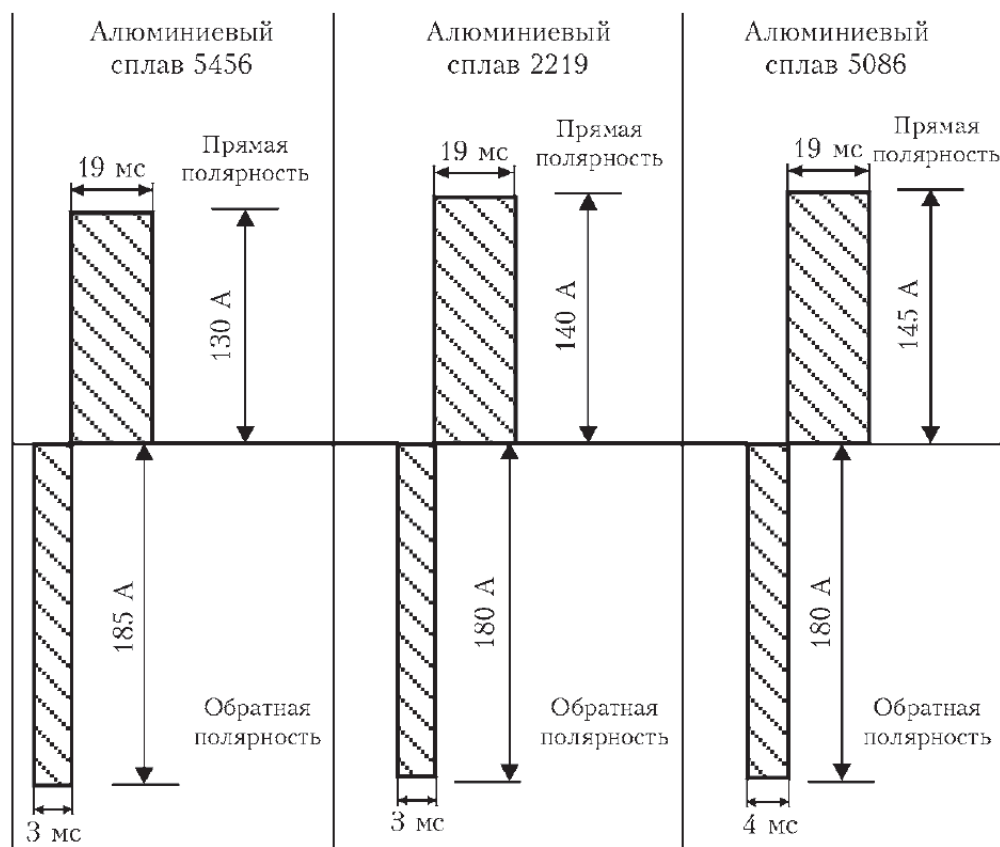


Рисунок 26 – Отношение амплитуды и длительности импульсов прямой и обратной полярности при сварке разнополярными импульсами

Начиная с начала 2000-х годов исследования в области плазменной сварки алюминиевых сплавов разнополярным током интенсифицировались. Разработку вели такие фирмы, как «Merke» (Германия), «EWM» (Германия), «SBI» (Австрия), «Castolin» (Швейцария) и «Migatronik Automation» (Дания). Также исследования велись в ИЭС им. Е.О. Патона (Украина).

В настоящем диссертационном исследовании предлагается применить гибридную плазменную сварку, схема выполнения которой представлена на рисунке 27. При таком способе сварки формирование сварочной ванны происходит за счёт горения двух дуг. Первая дуга горит между изделием и неплавящимся электродом, это сжатая дуга. Вторая дуга горит между изделием и сварочной проволокой. Таким образом, в данной технологии сочетается плазменная сварка и механизированная сварка в защитных газах. В схеме присутствует два источника питания. Первый

источник обеспечивает питание сжатой дуги (показан на схеме позицией 1). Второй источник обеспечивает питание дуги между проволокой и изделием (показан на схеме позицией 2). В конструкцию плазматрона входит неплавящийся электрод (показан на схеме позицией 3), стабилизирующее сопло (показано на схеме позицией 4) и защитное сопло (показано на схеме позицией 5). Также через плазматрон поступает плавящаяся проволока (показана на схеме позицией 6), подвод тока к которой происходит через токоподвод (показан на схеме позицией 7). При работе такой конструкции происходит горение двух дуг. Первая дуга – плазменная (показана на схеме позицией 8), вторая дуга – между проволокой и деталью (показана на схеме позицией 9). Само изделие показано на схеме позицией 10.

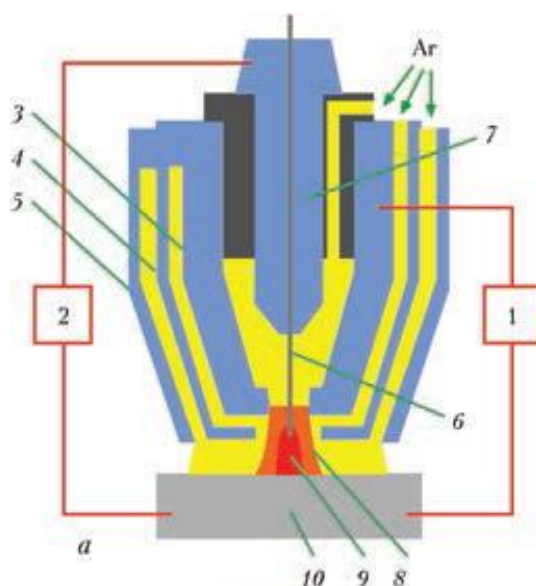
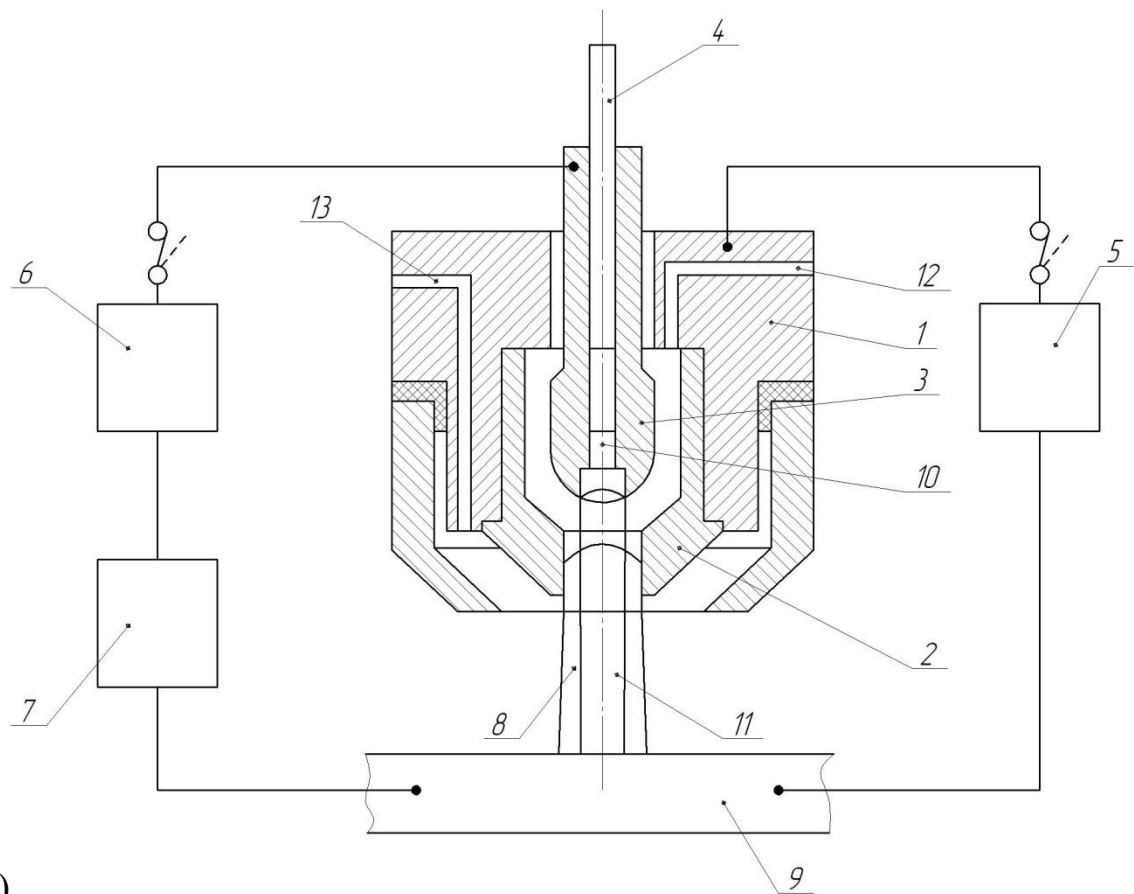
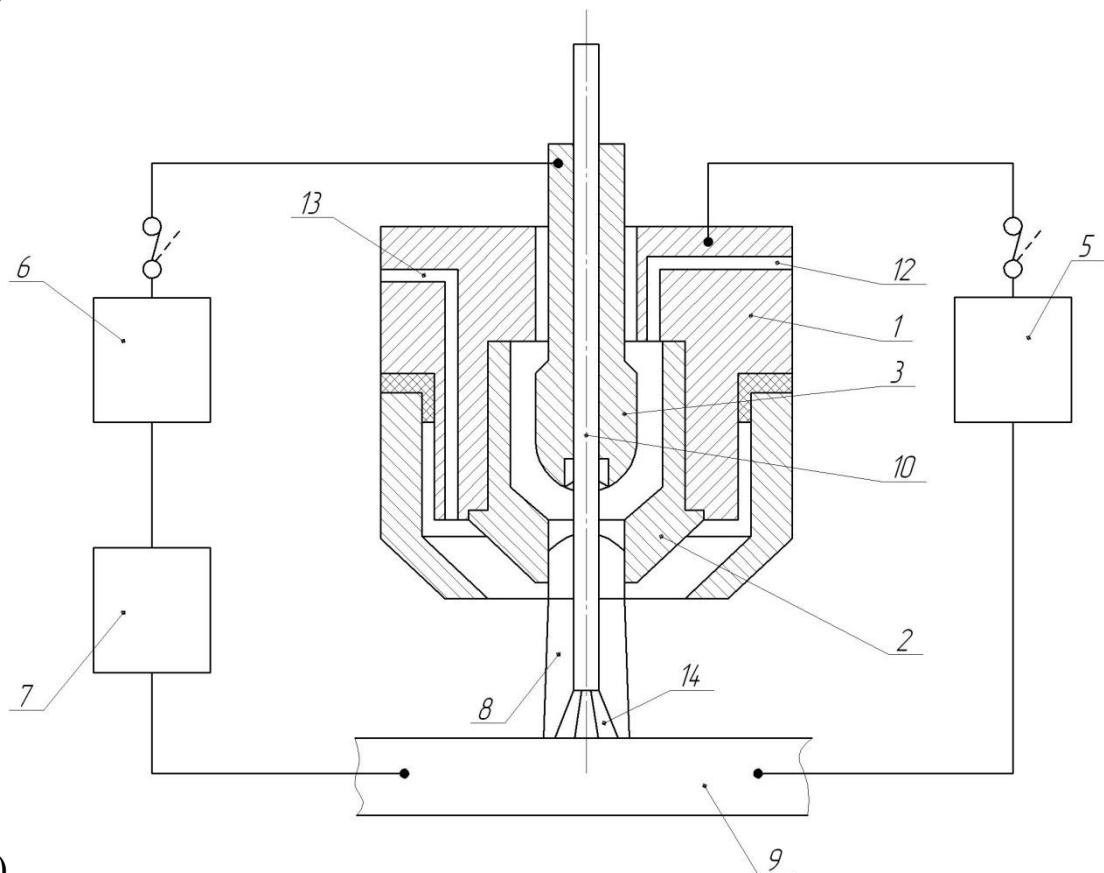


Рисунок 27 – Схема выполнения гибридной сварки

При таком горении двух дуг обеспечивается несколько положительных эффектов. Первый эффект заключается в существенном снижении разбрызгивания электродного металла. Второй эффект проявляется в повышении глубины проплавления и производительности сварки. Такой способ позволяет без предварительной подготовки выполнять ремонтную заварку дефектов на толстостенных отливках. На рисунке 28 представлена предлагаемая схема плазматрона для гибридной сварки [31].



а)



б)

Рисунок 28 – Работа предлагаемого плазматрона:
а) возбуждение дуги, б) сварка

Схема предусматривает установку в корпусе 1 кольцевого неплавящегося электрода 2. Сжатая дуга (обозначена на схеме позицией 8) горит между изделием 9 и кольцевым электродом 2. В схеме плазматрона также предусмотрено наличие дополнительного неплавящегося электрода (обозначен на схеме позицией 3), который является пусковым. В пусковом электроде выполнено сквозное отверстие (обозначено на схеме позицией 10). Сам пусковой электрод 3 помещается внутри кольцевого электрода 2. Между пусковым электродом 3 и изделием 9 горит вторая сжатая дуга (обозначена на схеме позицией 11).

Через сквозное отверстие 10 в пусковом электроде 3 подают сварочную проволоку (обозначена на схеме позицией 4). В корпусе плазматрона 1 имеются каналы для водяного охлаждения. Через каналы корпуса 12 и 13 поступает защитный и плазмообразующий газы.

В схеме питания плазматрона предусмотрено два источника питания. Первый источник питания (обозначен на схеме позицией 5) подключен к изделию 9 и неплавящемуся электроду 2. Второй источник питания (обозначен на схеме позицией 6) через осциллятор 7 подключен к изделию 9 и пусковому электроду 3.

Возбуждение дуги 11 между пусковым электродом 3 и деталью 9 выполняют с применением осциллятора 7 от источника питания 6. Сварочная дуга 8 между деталью 9 и кольцевым электродом 2 загорается после включения источника питания 5. После этого включают подачу сварочной проволоки 4. При выходе конца проволоки 4 из отверстия 10 между проволочным электродом 4 и деталью 9 загорается дуга 14, при этом дуга 11 между деталью 9 и пусковым электродом 3 гаснет.

Питание сварочной дуги выполняется от источника постоянного тока на обратной полярности. Преимуществами процесса является простота конструкции плазматрона, высокая интенсивность процесса катодной очистки. Развитая поверхность кольцевого неплавящегося электрода обеспечивает его эффективное охлаждение.

Выводы по пятой главе

Проведенные литературные исследования позволяют сделать вывод о высокой эффективности плазменных технологий при сварке деталей из алюминиевых сплавов. При этом технологические возможности плазменной сварки могут быть расширены за счёт применения решений в области гибридной сварки, которая позволяет использовать преимущества обоих способов сварки.

В настоящем исследовании предлагается применить гибридную сварку на основе процесса горения сжатой дуги (плазменный процесс) и механизированной сварки плавящимся электродом в защитном газе. Питание сварочной дуги выполняется от источника постоянного тока на обратной полярности.

При таком способе сварки формирование сварочной ванны происходит за счёт горения двух дуг. Первая дуга горит между изделием и неплавящимся электродом, это сжатая дуга. Вторая дуга горит между изделием и сварочной проволокой. Таким образом, в данной технологии сочетается плазменная сварка и механизированная сварка в защитных газах. В схеме присутствует два источника питания. Первый источник обеспечивает питание сжатой дуги. Второй источник обеспечивает питание дуги между проволокой и изделием.

Преимуществами процесса является простота конструкции плазматрона, высокая интенсивность процесса катодной очистки. Развитая поверхность кольцевого неплавящегося электрода обеспечивает его эффективное охлаждение.

Заключение

В настоящем диссертационном исследовании поставлена цель – повышение производительности и качества ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов.

В ходе анализа свойств материала отливок были сформулированы сложности ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов.

В качестве первой трудности следует отметить пленку на поверхности деталей, которая состоит из оксида алюминия. Наблюдается значительная разница в температурах плавления оксидной пленки и основного металла, в результате чего при формировании сварочной ванны не происходит расплавления пленки в металле, пленка присутствует в ванне в виде нерасплавившихся частиц. Кроме того, плотность пленки выше, чем плотность расплавленного металла, в результате чего пленка тонет в сварочной ванне и загрязняет её.

В качестве второй трудности следует указать потерю прочности алюминиевых сплавов при высоких температурах. По этой причине наблюдается провисание и провал сварочной ванны и вытекание в зазор расплавленного металла.

В качестве третьей трудности следует указать значительный по сравнению со сталями коэффициент термического расширения, что становится причиной образования повышенного уровня остаточных напряжений и деформаций. При ремонте деталей и заготовок из алюминиевых сплавов это может стать причиной коробления и появления трещин. Кроме того, при сварке алюминиевых сплавов приходится бороться с образованием кратеров.

В качестве четвертой трудности следует указать высокую растворимость газов в расплавленном алюминии. По этой причине возникает значительное количество пор, так как при кристаллизации происходит

обратное выделение газов. В результате этого прочность и пластические свойства металла сварного шва могут существенно снизиться.

В качестве пятой трудности следует отметить высокую опасность получения горячих трещин. Образование горячих трещин происходит по причине того, что структура металла шва является столбчатой с выделением легкоплавкой эвтектики по границам зёрен. Применительно к ремонтной сварке отливок опасность возникновения горячих трещин при сварке усиливается, так как в отливке может присутствовать высокий уровень остаточных напряжений третьего рода (уравновешивающийся в пределах всей детали), что вызывает дополнительные растягивающие напряжения, раскрывающие трещину.

При анализе базовой технологии ремонтной сварки с применением ручной аргодуговой сварки неплавящимся электродом выявлены недостатки. В качестве первого недостатка следует отметить низкую производительность процесса по сравнению с другими, получившими распространение способами сварки. Вторым недостатком является существенная зависимость полученных при сварке результатов от квалификации самого сварщика.

При анализе альтернативных способов ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов установлены способы сварки, применение которых к рассматриваемым деталям покажет наибольшую эффективность. Такими способами являются аргодуговая сварка неплавящимся электродом, механизированная сварка проволокой сплошного сечения в инертных газах, сварка трёхфазной дугой, плазменная сварка.

Для повышения эффективности аргодуговой сварки неплавящимся электродом предложено выполнять питание сварочной дуги пульсирующим током.

При сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой алюминиевых сплавов по сравнению со стационарной дугой сокращается протяженность оксидной пленки в швах и пористость сварных соединений.

Применение асимметричного тока способствует интенсификации перемешивания расплавленного металла и активизации процессов катодного разрушения оксидной пленки. Это позволяет в 3 раза уменьшить относительную протяженность включений оксидной пленки в швах алюминиевых сплавов и вероятность образования протяженных нитевидных включений в швах.

Резкие изменения силового воздействия дуги во время импульсов и пауз модулированного тока обеспечивают также наиболее благоприятные условия для удаления газовых пузырьков из расплава сварочной ванны. При этом по сравнению со сваркой стационарной дугой обычным синусоидальным током суммарный объем пустот в сварных соединениях уменьшается в 7... 10 раз.

Предложена технология ремонтной заварки дефектов на деталях из алюминиевых сплавов с применением трехфазной дуги. При этом предлагается использовать разработки коллектива кафедры сварки Тольяттинского государственного университета.

Также для сварки предложено использовать присадочную проволоку оригинального состава. Основными химическими элементами в проволоке являются алюминий, кремний, хром и цирконий. Примесями являются железо, цинк, медь и олово. Содержание основных элементов задаётся, в примесей – ограничивается. В составе проволоки содержится кремний 4,5...6 %, хром 0,8...1,2 %, цирконий 0,7...1,2 %. Предлагаемая проволока позволяет уменьшить размер кристаллитов при сварке и наплавке деталей из алюминиевых сплавов. Получение крупных зёрен нежелательно, так как в этом случае возможно образование холодных и горячих трещин, а также снижение эксплуатационных свойств наплавленного металла. За счёт введения в проволоку хрома и циркония удастся повысить коррозионную стойкость наплавленного металла, которая при сварке традиционной проволокой снижается из-за повышенного содержания в проволоке кремния.

Введение в состав проволоки циркония позволяет также снизить размеры зёрен металла сварного шва.

Для повышения эффективности механизированной ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов предложено применить импульсное питание сварочной дуги, для обеспечения которого применяется разработка отечественных инженеров. При этом удалось существенно снизить потери на разбрызгивание, которые довели до 1 %, при этом попадающие на поверхность детали капли имеют форму мелких шариков и не прилипают. За счёт управления горением дуги появилась возможность дозированного введения энергии в дуговой промежуток, контролировать протяженность фаз горения дуги, интенсифицировать перемешивание металла в сварочной ванне. Сварочная дуга горит стабильно и предсказуемо.

Для повышения эффективности плазменной ремонтной сварки деталей из алюминиевых сплавов предложено применить гибридную сварку дугой. Питание сварочной дуги выполняется от источника постоянного тока на обратной полярности.

При таком способе сварки формирование сварочной ванны происходит за счёт горения двух дуг. Первая дуга горит между изделием и неплавящимся электродом, это сжатая дуга. Вторая дуга горит между изделием и сварочной проволокой. Таким образом, в данной технологии сочетается плазменная сварка и механизированная сварка в защитных газах. В схеме присутствует два источника питания. Первый источник обеспечивает питание сжатой дуги. Вторым источником обеспечивается питание дуги между проволокой и изделием.

Преимуществами процесса является простота конструкции плазматрона, высокая интенсивность процесса катодной очистки. Развитая поверхность кольцевого неплавящегося электрода обеспечивает его эффективное охлаждение.

Выполненные задачи позволяют судить о достижении поставленной цели.

Список используемой литературы и используемых источников

1. А. с. 1682076 СССР, МКИ В23К9/09. Источник тока для импульсной сварки / Павшук В. М., Шейко П. П. Заявл. 31.05.89; опубл. 07.10.91, Бюл.№ 37, 6 с.
2. Барабохин Н. С., Бушуев Ю. Г., Шульгина Е. В. Технологические особенности сварки высокопрочного алюминиевого сплава 1460 // Сварочное производство. 1999. № 11. С. 12–14.
3. Белинин Д. С. Щицын Ю. Д. Перспективы применения плазменной дуги обратной полярности для исправления литейных дефектов из сплава АК7Ч // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2021. № 1. С. 74–81.
4. Гиннэ С.В., Наумов С.Б. Материаловедение : учеб. пособие / СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. 198 с.
5. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. – Киев : Изд-во «Наукова думка», 1981. 608 с.
6. Гуреева М. А., Грушко О. Е. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств // Конструкционные материалы. 2009. № 11 С. 27–41.
7. Гуреева М.А., Овчинников В.В., Минаков И.Н. Металловедение: макро- и микроструктуры литейных алюминиевых сплавов. М.: Юрайт, 2019. 254 с.
8. Ельцов В. В. Восстановление и упрочнение деталей машин : учебное пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2014.
9. Ельцов В. В., Карелин В. И., Кондрашова С. В. Комплект универсального оборудования для ремонтной сварки изделий из легких сплавов // Сварочное производство. 1984. № 9. С. 35–36.

10. Ельцов В. В. Объект исследований – трехфазная сварочная дуга // Сборник трудов к 40-летию кафедры ОТСП и 75-летию В.И. Столбова ; под ред. В. В. Масакова, В.П. Сидорова. Тольятти : ТГУ, 2007, С. 105-116.

11. Ельцов В. В., Потехин В. П., Зеленков А.С. Формирование сварочной ванны при наплавке трехфазной дугой неплавящимися электродами с подачей присадочной проволоки // Ремонт, восстановление, модернизация. 2006. № 12. С. 2–6.

12. Ельцов В. В. Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов : учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2012. 176 с.

13. Ермаков И. Н., Герасимчук А. В., Якшимбетова К. С. Особенности образования пористости в ходе затвердевания отливки сложной конфигурации // Наука ЮУрГУ : материалы 66-й Науч. конф. Челябинск : Изд. центр ЮрГУ. 2014. С. 810–813.

14. Ермолин С. А., Тарасов А. С. Технологические возможности инверторных источников питания для механизированной дуговой сварки // Записки горного института. 2014. Т. 209. С. 42–46.

15. Зайцев О. И. Прогнозировании параметров режима при импульсно-дуговой сварке алюминиевых сплавов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / Олег Игоревич Зайцев ; Тульский государственный университет. Тула, 2003.

16. Зайцев О. И., Оглодков М. С., Щетинина Н. Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1. С. 19–24.

17. Ищенко А. Я., Мищенко В. А., Чаюн А. Г. Аргодуговая сварка алюминиевых сплавов АМг5 и 01381 на постоянном, переменном и асимметричном токе // Автоматическая сварка. 1978. № 11. С. 46-48.

18. Ищенко А. Я., Чаюн А. Г., Белецкий В. М. Особенности сварки плавлением высокопрочного алюминиевого сплава 01420 // Автоматическая сварка. 1977. № 3. С. 38–41.

19. Ищенко А. Я., Чаюн А. Г., Илюшенко Р. В. Свариваемость и технология дуговой сварки сплава системы алюминий-магний-литий. Автоматическая сварка. 1985. № 10. С. 47–49.
20. Калеко, Д. М. Современные способы дуговой сварки алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 1994. № 5–6. С. 35–37.
21. Крампит А. Г., Крампит Н. Ю., Габитов Э. К. Модернизация сварочного оборудования – как решение приоритетной задачи по импортозамещению // Технологии и материалы: технический научно-производственный журнал. 2016. № 6. С. 18–23.
22. Короткова Г. М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов : монография. Тольятти : ТГУ, 2009. 335с.
23. Крушенко Г. Г. Выявление и исправление заваркой дефектов в отливках из алюминиево-кремниевых сплавов // Динамика систем механизмов и машин. 2014. № 2. С. 303–304.
24. Лебедев В. А. Некоторые особенности дуговой механизированной сварки алюминия с управляемой импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2007. № 11. С. 26–30.
25. Лукьянов В. Ф., Фомин В. Н., Моисеенко В. П. Влияние окисных включений на прочность сварных соединений сосудов давления из сплава АМг6 // Сварочное производство. 1970. № 6. С. 24–27.
26. Мау В. А., Улюкаев А. В. Глобальный кризис и тенденции экономического развития // Вопросы экономики. 2014. № 11. С. 15–21.
27. Моисеенко И. Г. Лукашин Н. В. К вопросу о повышении герметичности сварных ёмкостей из сплава АМг6 // Сварочное производство. 1969. № 8. С. 31–32.
28. Моисеенко И. Г., Столбов В. И., Турченко М. А. Окисные включения при сварке сплава АМг6 // Сварочное производство. 1968. № 5. С. 23–24.

29. Оботуров В. И., Толкачев Ю. Н. Некоторые особенности образования и разрушения оксидных плен при аргоно-дуговой сварке алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1973. № 11. С. 22–24.

30. Павлова И. А., Павлов А. С. Техничко-экономический анализ при внедрении инноваций на производственном предприятии // Экономический анализ: теория и практика. 2014. № 40. С. 14–21.

31. Патент 114631 РФ, МПК В23К10/02. Плазматрон для сварки плавящимся электродом // Щицын Ю. Д., Щицын В. Ю. Заявл. 06.10.2011; опубл. 10.04.20212; Бюл. № 10. 13 с.

32. Патент 2378095 РФ, МПК В23К35/28. Присадочная проволока для сварки алюминиевых сплавов / Л. Коттины, С. Ж. Клодин, Ф. Жарри. Опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1.

33. Покляцкий А. Г., Гринюк А.А. Влияние параметров асимметричного и модулированного токов на качество сварных соединений алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2001. № 7. С. 33–36.

34. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Бессонов А. С. Предотвращение образования включений оксидной пленки в швах при сварке алюминиевых сплавов пульсирующей дугой // Автоматическая сварка. 1991. № 7. С. 43–47.

35. Рабкин Д. М., Игнатъев В. Г., Довбищенко И. В. Сварка алюминия и его сплавов. Киев : Изд-во "Наукова думка", 1983. 80 с.

36. Рабкин Д. М., Лозовская А. В., Склабинская И. Е. Металловедение сварки алюминия и его сплавов. Киев : Наукова думка, 1992. 160 с.

37. Сварка и резка материалов: Учеб. пособие / М. Д. Банов, Ю. В. Казаков, М. Г. Козулин [и др.]; под ред. Ю.В. Казакова. – М.: Издательский центр «Академия», 2000. 400 с.

38. Ситявин Ю. И., Терминасов Ю. С., Зубриенко Г. Л. Структура и свойства сварных швов алюминиевых сплавов в зависимости от некоторых факторов технологии сварки // Сварочное производство. 1979. №8. С. 28-29.

39. Смирнов И.В. Сварка специальных сталей и сплавов : учебное пособие. Тольятти : ТГУ, 2007. 301 с.

40. Столбов В. И., Шаповалов В. А., Короткова Г. М. Об управлении сварочным током в источниках питания трехфазной дуги. // Сварочное производство. 1982. № 10. С. 24–25.

41. Сушков В. Н., Скачков Ю. Н., Новиков О. М. Склонность лёгких сплавов к образованию оксидных включений при сварке // Сварочное производство. 1975. 5. С. 23–24.

42. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: Учебник для вузов. – 2-е изд. испр. и доп. / А. И. Акулов, В. П. Алехин, С. И. Ермаков [и др.]; под ред. А. И. Акулова. – М.: Машиностроение, 2003. 560 с.

43. Фридляндер И. Н., Сандлер В. Г., Грушко О. Е. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 9. С. 3–9.

44. Чаюн А. Г., Сыроватка В. В., Матяш В. И. Дуговая сварка алюминиевого сплава 01420 с применением ЭМП // Автоматическая сварка. 1981. № 6. С. 19–21.

45. Ширяева Н. В., Овчинников В. В., Габидуллин Р. М. Образование пор при сварке сплава системы алюминий-магний-литий // Автоматическая сварка. 1987. № 3. С. 16–18.

46. Щицин Ю. Д., Синани И. Л., Белинин Д. С., Неулыбин С. Д. Совершенствование технологий плазменной сварки проникающей дугой цветных металлов и сложнолегированных сплавов // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. № 4. С. 427–431.

47. Юсуфова, З. А. О механизме разрушения окисных плён в стыке при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1979. № 10. С. 25-26.

48. Cooper G., Palermo J., Browning J.A. Recent Developments in Plasma Welding // Welding Journal. 1965. № 4. P. 268–276.

49. Dzelnitzki D. Aluplasmawissen: Gleich– oder Wechselstrom // Technica (Suisse). 2000. № 10. P. 44–53.

50. Lathi K., Jenstrom P. Plasma Welding Aluminium // Svetsaren. 1999. № 3. P. 26–28.
51. Liu H., Bouchard M., Zhang L. An experimental study of hydrogen solubility in liquid aluminium // Journal of materials science. 1995. Vol. 30. P. 4309–4315.
52. Mario H., Hirata Yo, Makino H. Reetangural wale AC TIG arc welding of aluminum alloy // Quarterly journal of JWS. 1989. № 7. C. 63–69.
53. Micheli J., Pilcher C. Advanced variable–polarity plasma arc welding // The Fabricator. 2000. № 11. P. 64–72.
54. Na, J. Effect of aging on mechanical properties and localized corrosion behaviors of Al-Cu-Li alloy // Trans. Nonferrous Metal. Soc. China. 2005. № 1. P. 23–29.
55. Ruge J., Lutze P., Norenberg K. Eignung von Aluminiumdruckguss zum Plasma– und Elektronenstrahlschweissen – Entgasungmechanismen und Nahtgute // Schweissen und Schneiden. 1989. № 7. P. 327–332.
56. Tian C. Effect of melt cleanliness on the formation of porosity defects in automotive aluminum high pressure die castings // Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 122. № 1. P. 82–93.
57. Wu C.S., Wang L., Ren W.J., Zhang X.Y. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling // Journal of Manufacturing Processes. 2014. № 16. P. 74–85.