

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В.В. Овчинников, А.М. Дриц, Р.Н. Растопчин, М.А. Гуреева

В статье представлен анализ современного состояния и тенденций развития плазменной сварки алюминиевых сплавов. Отмечено, что основным направлением разработки технологии плазменной сварки как плавящимся, так и неплавящимся электродом, является создание комбинированных плазменных технологий с использованием нескольких источников питания, подсоединенных к плазматрону. При сварке неплавящимся электродом в этом отношении наибольший интерес представляет схема сварки закрытой сжатой дугой с полым анодом, осуществляемая от двух источников постоянного тока. Дополнительные резервы повышения глубины проплавления деталей и качества получаемых швов заключаются в программируемой импульсной попеременной подаче двух разных плазмообразующих газов – аргона и гелия. В варианте сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом существенно увеличивается доля основного металла в формировании шва, что следует учитывать при разработке составов присадочных проволок для сварки алюминиевых сплавов. Использование комбинированных плазменных технологий позволяет повысить производительность процессов сварки алюминиевых сплавов и качество выпускаемой продукции в несколько раз.

Ключевые слова: плазменная дуга, сварка плавящимся электродом, сварка неплавящимся электродом, комбинированная технология, алюминиевый сплав, механические свойства.

CURRENT TRENDS OF WELDING TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR ALUMINUM ALLOYS

V.V. Ovchinnikov, A.M. Drits, R.N. Rastopchin, M.A. Gureeva

In the article analysis of the present state and trends of plasma welding development for aluminum alloys is described. There is noted that creation of combined plasma technologies using several power supplies connected to the plasmatron is the main direction of the development for plasma welding technologies with the consumable and nonconsumable electrode as well. Regarding nonconsumable electrode welding, the closed compressed arc welding circuit with a hollow anode carried out by DC power is more interesting. Additional reserves for enhance the penetration depth and quality of the seams are programmable pulsed alternately submitting two different plasma gases – argon and helium. At aluminium alloys welding with a consumable electrode the proportion of the base metal in the weld formation substantially increases that should be taken into consideration at developing the willing wire compound for aluminium alloys welding. The use of combined plasma technologies allows aluminium alloys welding efficiency increase and product quality enhance as well.

Keywords: plasma arc welding with consumable electrode, welding with nonconsumable electrode, combined technology, aluminium alloy, mechanical properties.

Введение

Современные металлические конструкции работают в различных условиях: при повышенных и пониженных температурах, в агрессивных средах, при сложном циклическом нагружении, в условиях комбинированного воздействия неблагоприятных факторов.

Эти факторы повышают уровень требований к конструкции, заставляя использовать для их изготовления высоколегированные алюминиевые сплавы. В свою очередь сварные швы конструкций также должны соответствовать целому комплексу показателей, среди которых обеспечение равнопрочности с основным ме-

таллом при минимальных остаточных деформациях, получение заданных геометрических параметров сварного шва и высокого качества его поверхности, минимальное усиление шва и плавный переход к основному металлу, и ряд других требований.

Одним из перспективных направлений совершенствования сварочных технологий является разработка и внедрение процессов с использованием высококонцентрированных источников энергии, таких как лазер, электронный луч и плазма. Плазменные технологии являются перспективными с точки зрения экономичности и эффективности [1, 2].

Плазменная сварка алюминиевых сплавов успешно конкурирует со сваркой в среде защитных газов неплавящимся и плавящимся электродом по производительности, экономичности и качеству получаемых соединений. Поэтому она стала применяться, в первую очередь, в таких отраслях промышленности, как авиастроение, ракетная техника, приборостроение, электронное, электротехническое и химическое машиностроение, медицинская техника и др., где широко используется аргонодуговая сварка.

По сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, преимущества плазменной сварки следующие:

- меньшее влияние возможного изменения расстояния от торца сопла плазмотрона до изделия на геометрические размеры зоны проплавления;
- меньшее влияние изменения тока на форму дуги, а, следовательно, и на стабильность проплавления металла;
- высокая надежность зажигания дуги благодаря дежурной дуге;
- отсутствие включений вольфрама в сварном соединении;
- повышение скорости сварки;
- меньшее тепловложение и коробление изделий.

О широких возможностях плазменной сварки свидетельствуют примеры применения этого процесса при изготовлении ответственных сварных конструкций толщиной от 3 до 20 мм из высокопрочных алюминиевых сплавов.

Целью настоящей работы является выявление основных современных тенденций совершенствования процессов плазменной сварки алюминиевых сплавов.

Схема и основные параметры процесса плазменной сварки

Дуговую плазменную струю для сварки получают по двум основным схемам. При плазменной струе прямого действия изделие включено в сварочную цепь дуги, активные пятна которой (катодное и анодное) располагаются на вольфрамовом электроде и изделии. Осуществление процесса сварки по этой схеме принято называть плазменно-дуговым, поскольку плазменная струя совмещена со столбом дугового разряда. При плазменной струе косвенного действия активные пятна дуги находятся на вольфрамовом электроде и внутренней или боковой поверхности сопла плазмотрона [3].

По данной схеме источник теплоты становится независимым от изделия со струей плазмы, выделенной из столба дугового разряда в виде факела. В этом случае передача теплоты изделию осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением плазмы. При нагреве плазменной струей прямого действия (сжатой дугой) к перечисленным механизмам теплопередачи добавляется передача энергии заряженными частицами, движущимися в электрическом поле.

Наибольшее распространение получил способ плазменной сварки сжатой дугой прямого действия благодаря определенным преимуществам перед сваркой сжатой дугой косвенного действия:

- 1) эффективный КПД сжатой дуги прямого действия в среднем на 10–30 % выше этого показателя сжатой дуги косвенного действия достигает 65–75 %;
- 2) максимальная плотность теплового потока на изделии, как правило, выше на порядок и более;
- 3) допустимая электрическая и тепловая мощность при прочих равных условиях выше, что обусловлено отсутствием активного пятна в канале сопла плазмотрона;
- 4) более высокая стойкость сопла и стабильность горения дуги.

Состав плазмообразующего газа и материала неплавящегося электрода выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. В качестве плазмообразующего газа обычно применяют аргон, гелий и их смеси. Плазмообразующий газ может служить также и защитой расплавленного металла от воздуха. В некоторых случаях для защиты расплавленного

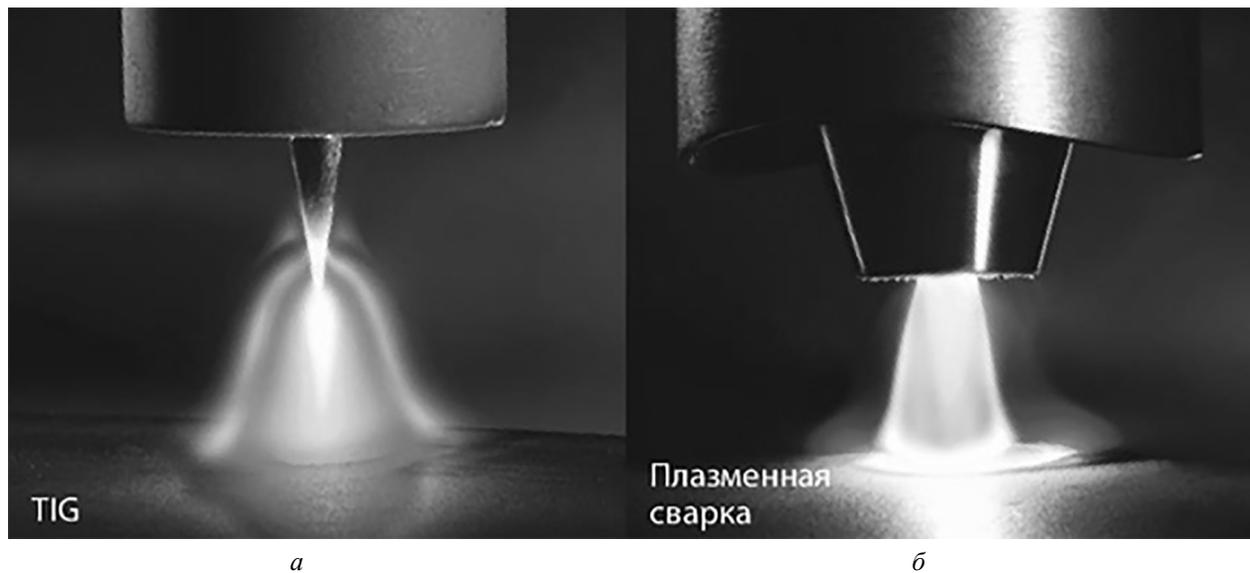


Рис. 1. Форма свободной (а) и плазменной (б) дуг

металла используют подачу отдельной струи защитного газа. Электроды изготавливают обычно из вольфрама и меди.

Для защиты катода и сопла от разрушения и перегрева наилучшим газом считается аргон, так как он химически инертен и имеет малую теплопроводность. Однако аргон малоэффективен для преобразования электрической энергии в тепловую. Гелий обладает относительно высокой теплопроводностью и лучше других преобразует энергию дуги в теплоту. В случае его применения в чистом виде происходит быстрый нагрев и разрушение сопла, поэтому указанный газ применяют в смеси с аргоном.

При свободном горении дуги при атмосферном давлении, температура в ее столбе зависит от состава газовой среды и достигает $(5-10) \cdot 10^3$ К. При ограничении возможности свободного расширения дуги температуру столба можно повысить до $(15-30) \cdot 10^3$ К. Кроме того, при сжатии столба дуги ограничивается свободное перемещение активного пятна на поверхности изделия. Благодаря этому тепловой поток в изделии становится более концентрированным, глубина проплавления увеличивается с одновременным уменьшением зоны нагрева основного металла, прилегающего к сварному шву.

В отличие от свободной дуги, имеющей форму конуса с расширяющимся сечением в сторону изделия, плазменная дуга имеет форму, близкую к цилиндрической (рис. 1). При этом изменение длины плазменной дуги

в достаточно широких пределах практически не влияет на глубину проплавления.

Сжатую дугу прямого действия, применяемую для сварки, можно рассматривать как электрическую дугу, но отличающуюся от последней более высокой концентрацией энергии и широкими возможностями ее регулирования. Основные параметры режима плазменной сварки аналогичны параметрам аргонодуговой сварки. К дополнительным параметрам, оказывающим влияние на основные параметры режима плазменной сварки, относятся диаметр и длина плазмообразующего сопла, расход и состав плазмообразующего газа.

К основным параметрам плазменно-дуговой сварки относятся: ток, напряжение, расстояние от торца сопла до изделия, скорость сварки, подача плазмообразующего и защитного газа, диаметр и длина сопла.

Характерный для плазменной сварки алюминиевых сплавов диапазон параметров режима: сварочный ток от 80 до 350 А; напряжение от 25 до 35 В; скорость сварки от 10 до 50 м/ч; подача плазмообразующего газа от 1,5 до 5 л/мин; подача защитного газа от 3 до 10 л/мин; расстояние от среза сопла до изделия от 4 до 8 мм; диаметр сопла от 2,5 до 5 мм; длина канала сопла от 1 до 3 мм.

Ток плазменной сварки является наиболее важным параметром. При повышении сварочного тока эффективная мощность процесса и плотность теплового потока в центре пятна нагрева и диаметр пятна нагрева заметно увели-

чиваются. Уменьшение диаметра канала сопла приводит к уменьшению диаметра дуги (увеличение коэффициента сосредоточенности теплового потока, поступающего в изделие), к росту эффективной тепловой мощности и давления дуги, поэтому при заданной глубине проплавления скорость сварки увеличивается.

Следует учитывать, что с уменьшением диаметра сопла снижается верхний предел тока (критический ток). Одним из недостатков плазменной сварки является невозможность увеличения тока больше определенного значения при фиксированных размерах канала сопла плазмотрона (длине и диаметре), т.е. дугу можно сжимать до определенного предела.

При некотором значении тока и диаметра сопла образуется «двойная дуга» или каскадная дуга. Визуально двойное дугообразование проявляется в том, что горят две дуги: между неплавящимся электродом и соплом, между соплом и изделием. В этом случае на верхней кромке рабочего сопла образуется анодное пятно первой дуги (анодная область дуги), на нижней – катодное пятно второй дуги, которое может удаляться от отверстия сопла на значительное расстояние вместе со столбом дуги. В этих активных пятнах тепловые потоки превышают предельно допустимые значения, и сопло разрушается.

Одной из причин образования двойной дуги является увеличение тока и соответственно диаметра столба сжатой дуги. При определенной величине тока диаметр столба становится соизмеримым с диаметром канала сопла. Толщина прослойки «холодного газа» между стенкой канала сопла и столбом дуги уменьшается, благодаря чему повышается электропроводность дуги, и создаются условия для электрического пробоя. Вероятность двойного дугообразования снижается, если увеличивается расстояние от сопла до изделия, отключается дежурная дуга, уменьшается длина канала, увеличивается расход газа, уменьшается величина углубления электрода в канал сопла, увеличивается диаметр сопла и улучшается его охлаждение.

Ценным свойством сжатой дуги является малая чувствительность глубины проплавления и ширины шва к изменению длины между соплом и изделием от 4 до 8 мм при износе вольфрамового электрода [4].

Силовое воздействие плазменной дуги пропорционально квадрату тока. Оно возрас-

тает с увеличением расхода плазмообразующего газа, уменьшением диаметра и длины канала сопла, а также расстояния от торца сопла до изделия.

Плазменная сварка проникающей дугой

Сварка проникающей дугой (рис. 2) характеризуется полным проплавлением свариваемых элементов по толщине с образованием небольшого отверстия, через которое раскаленные газы и пары удаляются за нижние кромки свариваемых элементов. Металл, расплавленный плазменной дугой, стекая по стенкам свариваемых элементов, удерживается в сварочной ванне силами поверхностного натяжения. При подобной технологии формирующие подкладки не применяют.

Сварку алюминиевых сплавов ведут на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе. По сравнению со сваркой без сквозного проплавления этот метод обеспечивает:

- полный и равномерный провар без применения подкладок, установка которых всегда весьма затруднительна;
- постоянный контроль провара благодаря образованию сквозного отверстия;
- увеличение допусков на величину зазора.

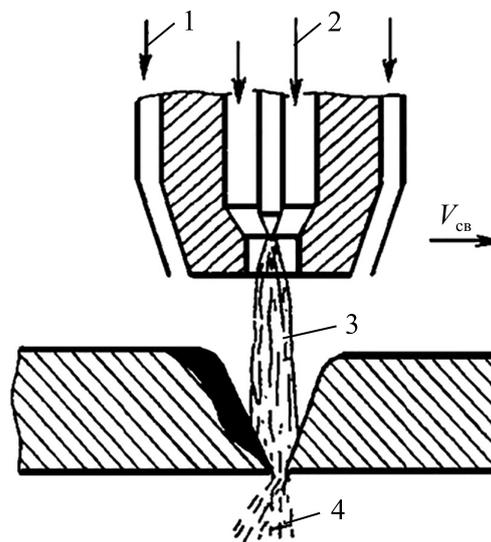


Рис. 2. Схема плазменной сварки проникающей дугой: 1 – защитный газ; 2 – плазмообразующий газ; 3 – столб сжатой дуги; 4 – факел плазмы, выходящий через отверстие за нижнюю плоскость свариваемого изделия; $V_{св}$ – скорость сварки (стрелка показывает направление перемещения плазмотрона)

Разновидности плазменной сварки и способы повышения ее эффективности. Плазменная сварка плавящимся электродом

Этот способ представляет собой комбинацию плазменно-дуговой сварки и дуговой сварки плавящимся электродом (рис. 3). Он отличается от сварки плавящимся электродом тем, что окружающая атмосфера нагревается до такой высокой температуры, что оказывается состоящей из ионизированного газа, т.е. плазмы. Плазма может получаться от отдельного дугового разряда.

Когда такой термически ионизированный газ с высокой электропроводностью окружает проволоку, которая имеет определенный потенциал, электрический ток от проволоки перестает зависеть от собственного дугового разряда. Это обеспечивает самопроизвольное начало разряда, повышенную стабильность и лучший контроль над переносом металла и тепловложением.

При плазменной сварке плавящимся электродом проволока подается по оси горелки через медное сопло в плазменную дугу, которая поддерживается между расположенным сбоку вольфрамовым электродом и изделием [3].

Плазменно-дуговая сварка или плазменная сварка плавящимся электродом в ряду новых сварочных процессов занимает на сегодняшний день особое положение как один из наиболее перспективных способов сварки, сочетающий высокую производительность и качество работ [5]. В пятне нагрева достигается высокая кон-

центрация энергии, что делает этот вид сварки перспективным для соединения алюминиевых сплавов [6].

Преимуществом плазменной сварки плавящимся электродом является высокая скорость, значительное сокращение зоны термического влияния, стабильность процесса, благодаря чему не требуется контроль и поддержание постоянства длины дуги. При данном способе сварки, в связи с глубоким проплавлением, резко увеличивается доля основного металла в формировании шва [7]. Однако при этом необходимо соблюдать точность сборки деталей под сварку и ведения горелки по стыку.

Плавящийся электрод подается по оси плазменной дуги, а в качестве неплавящегося электрода используют водоохлаждаемый кольцевой медный анод-сопло. Подсоединение плавящегося электрода к отдельному источнику питания обеспечивает сочетание свойств дуговой сварки плавящимся электродом и свойств сварки плазменной дугой. В этом случае участок вылета электрода и дуговой разряд, горящий между плавящимся электродом и изделием, окружены аксиальным потоком плазмы, создаваемым плазменной дугой [8].

Поэтому нагрев и плавление плавящегося электрода осуществляется не только теплотой собственной дуги и Джоулевой теплотой, выделяемой проходящим током на вылете электрода, но и теплотой плазменной дуги. Благодаря этому значительно возрастает скорость плавления электродной проволоки, повышается стабиль-

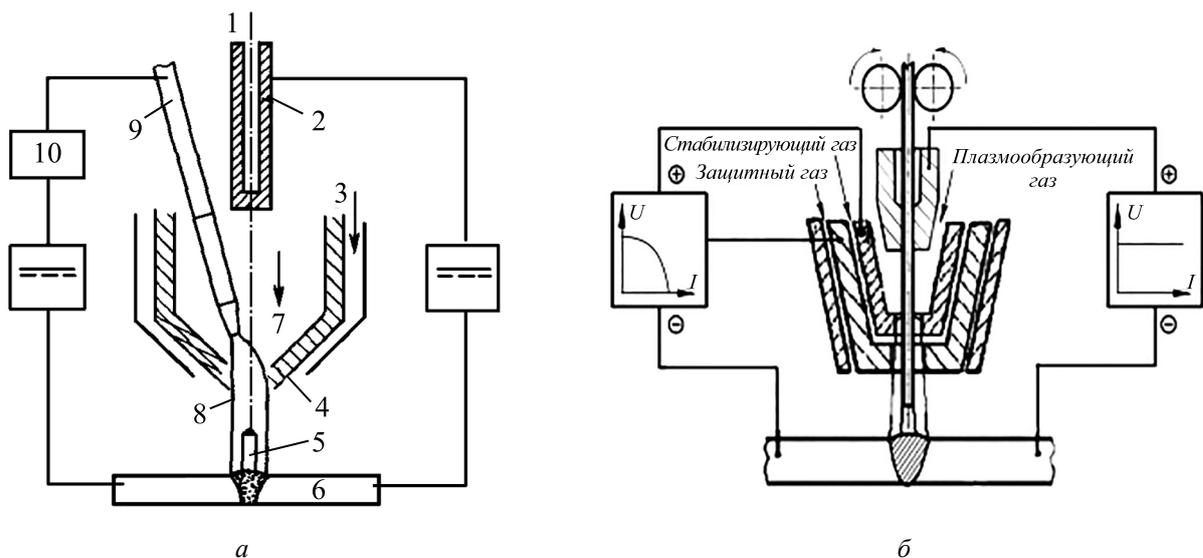


Рис. 3. Схемы плазменной сварки с плавящимся электродом: *а* – с дополнительным вольфрамовым электродом; *б* – с водоохлаждаемым кольцевым анодом-соплом: 1 – присадочная проволока; 2 – контактная трубка; 3 – защитный газ; 4 – медное сопло; 5 – светящаяся струя пара; 6 – изделие; 7 – плазмообразующий газ; 8 – плазменная струя; 9 – вольфрамовый электрод; 10 – осциллятор

ность дуги, устраняется разбрызгивание электродного металла, улучшается формирование сварных швов. Независимое регулирование тока плазменной дуги и дугового разряда позволяет в широких пределах управлять технологическими характеристиками процесса и тем самым получать практически бездефектные швы при значительном увеличении скорости сварки.

Сварка закрытой сжатой дугой

Сущность этого способа сварки состоит в следующем (рис. 4).

Сварка осуществляется дугой, которая возбуждается между вольфрамовым электродом и изделием через канал медного сопла, охлаждаемого водой. Дуга, сварочная ванна и прилегающие зоны нагретого металла защищены от атмосферы воздуха медной, латунной или стальной микрокамерой, охлаждаемой водой. Горелка отделена от нее изоляционной втулкой. Присадочная проволока подается в зону сварки через отверстие в микрокамере [9]. Плазмообразующий газ при выходе из горелки заполняет микрокамеру и под некоторым избыточным давлением выходит по каналу над остывающим сварным швом. Микрокамеру в процессе сварки прижимают к изделию с силой, достаточной для устранения коробления кромок в месте сварки. При сварке тонких листов (до 2-3 мм) для защиты шва достаточно потока плазмообразующего газа. Для листов большей толщины в микрокамеру подают дополнительно защитный газ. Форма микрока-

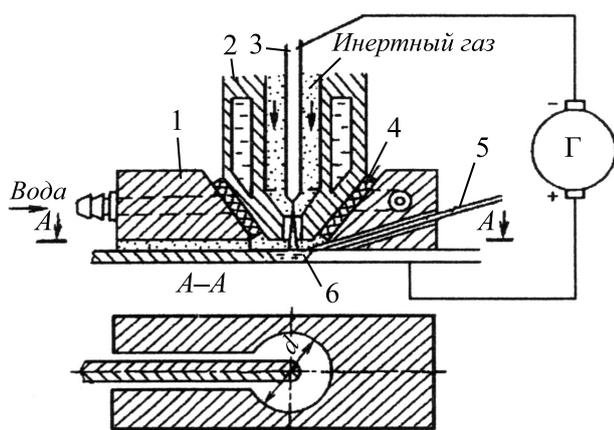


Рис. 4. Схема головки для сварки закрытой сжатой дугой: 1 – камера; 2 – сопло; 3 – электрод; 4 – изоляционная втулка; 5 – присадочная проволока; 6 – свариваемое изделие; Г – сварочный источник питания постоянного тока; d – диаметр выходного отверстия на срезе газозащитного сопла плазменной горелки

меры соответствует профилю изделия и типу соединения. Закрытой сжатой дугой удается сваривать листы толщиной от 0,1 до 16 мм за один проход без разделки кромок.

Особенность сварки закрытой сжатой дугой состоит в том, что плазменная сварка осуществляется внутри микрокамеры. Охлаждаемая водой микрокамера одновременно является прижимным приспособлением и защитным устройством, а также соответствует типу соединения и профилю свариваемого изделия.

Сварка двойной плазменной дугой с токоведущей присадочной проволокой

При этом способе сварки источниками тепла служат плазменные дуги, возбуждаемые между электродами горелки и изделием и между электродом и непрерывно подаваемой в зону сварки присадочной проволокой (рис. 5).

Плазменная дуга между электродом и изделием, в основном, подогревает свариваемые кромки и жидкий присадочный металл, заполняющий разделку; плавление же проволоки обеспечивает преимущественно плазменная дуга между проволокой и электродом.

Наилучшие результаты получаются, если применять источник питания для дуги (электрод-изделие) с крутопадающей вольт-амперной характеристикой, а для дуги (электрод-проволока) – с жесткой. В этом случае наблюдается явление саморегулирования, обеспечивающее при заданных условиях сварки плавление проволоки около оси плазменной дуги.

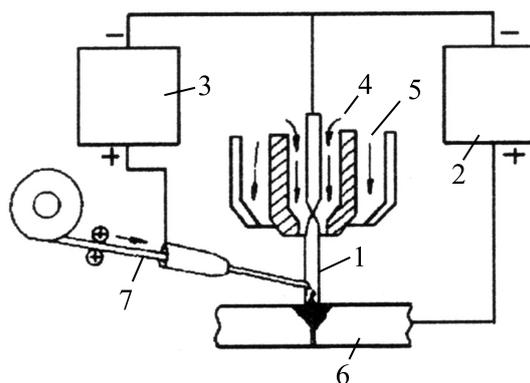


Рис. 5. Схема процесса сварки двойной плазменной дугой с токоведущей присадочной проволокой: 1 – плазменная дуга; 2 – источник питания дуги «электрод-изделие»; 3 – источник питания дуги «электрод-проволока»; 4 – плазмообразующий газ; 5 – защитный газ; 6 – изделие; 7 – проволока

Комбинированные методы плазменной сварки

Комбинированные технологии – это использование нескольких источников энергии в зоне обработки, например, плазменная дуга и дуга плавящегося или неплавящегося электрода для большей концентрации энергии. Применение данных технологий возможно в таких областях, как плазменная и микроплазменная сварка, резка, наплавка, плазменное напыление покрытий, плазменное поверхностное упрочнение деталей, плазменная наплавка и др.

Были разработаны следующие виды данной технологии: плазменная сварка обесточенной проволокой; плазменная сварка токоведущей проволокой; плазменная сварка заглубленной дугой плавящегося электрода (рис. 6). Данные способы отличаются от сварки плавящимся электродом тем, что окружающая электрод атмосфера является горячим ионизированным газом – плазмой. Электрический ток с плавящегося электрода в таких условиях перестает зависеть только от собственного дугового разряда [10]. Это обеспечивает самопроизвольное начало разряда и лучший контроль над переносом металла. Столб сжатой дуги отличается высокой пространственной устойчивостью, что объясняется взаимодействием электромагнитных полей сжатой дуги и плавящегося электрода. Это позволяет достичь глубокого проплавления изделия и высокоскоростной сварки металлов различной толщины. Основные преимущества – это бездефектность швов, регулирование глубины проплавления, повышение скорости сварки [11].

Для расширения технологических возможностей и повышения стабильности процесса ведутся работы по изучению возможностей получения комбинированных плазменных технологий с использованием нескольких источников питания, подсоединенных к плазматрону. Было разработано несколько схем подключения источников питания: комбинация дуг разной полярности; двойная дуга прямой полярности; двойная дуга обратной полярности (рис. 7). Эти способы сварки нуждаются в исследовании распределения энергетических, тепловых и газодинамических характеристик. Данные способы сварки позволяют резко повысить эффективность и стабильность процессов сварки благодаря взаимодействию дуги, горящей с электрода на сопло, и дуги, горящей с сопла на изделие. Сочетание двух дуг повышает тепловложение в изделие, что позволяет сваривать заготовки толщиной до 20 мм без разделки кромок, без дополнительных операций, необходимых при обычных способах сварки.

Плазменная сварка с полым анодом

Известны следующие способы сжатия открытой дуги: интенсивный отвод теплоты в металл охлаждаемого сопла из низкотемпературной периферийной зоны открытой дуги; разграничение дуги и стенок сопла потоком относительно холодного газа (газовая стабилизация); воздействие магнитным полем, а также создание в зоне дугового разряда динамического вакуума (сварка полым катодом).

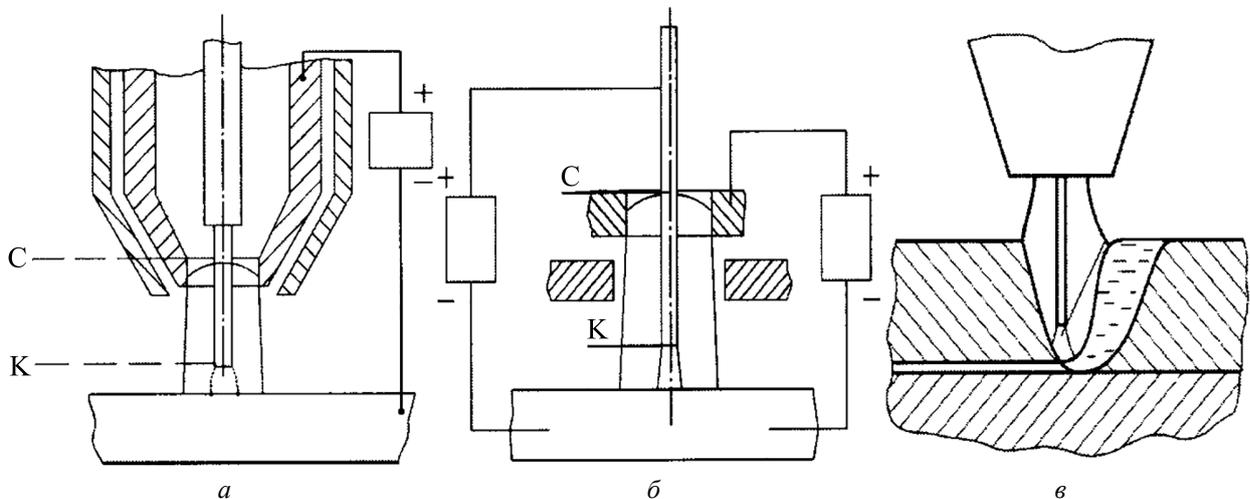


Рис. 6. Схемы комбинированной плазменной сварки: а – плазменная сварка обесточенной проволокой; б – плазменная сварка токоведущей проволокой; в – плазменная сварка заглубленной дугой плавящегося электрода; К – катодная область дуги; С – вход в цилиндрический канал плазмообразующего сопла

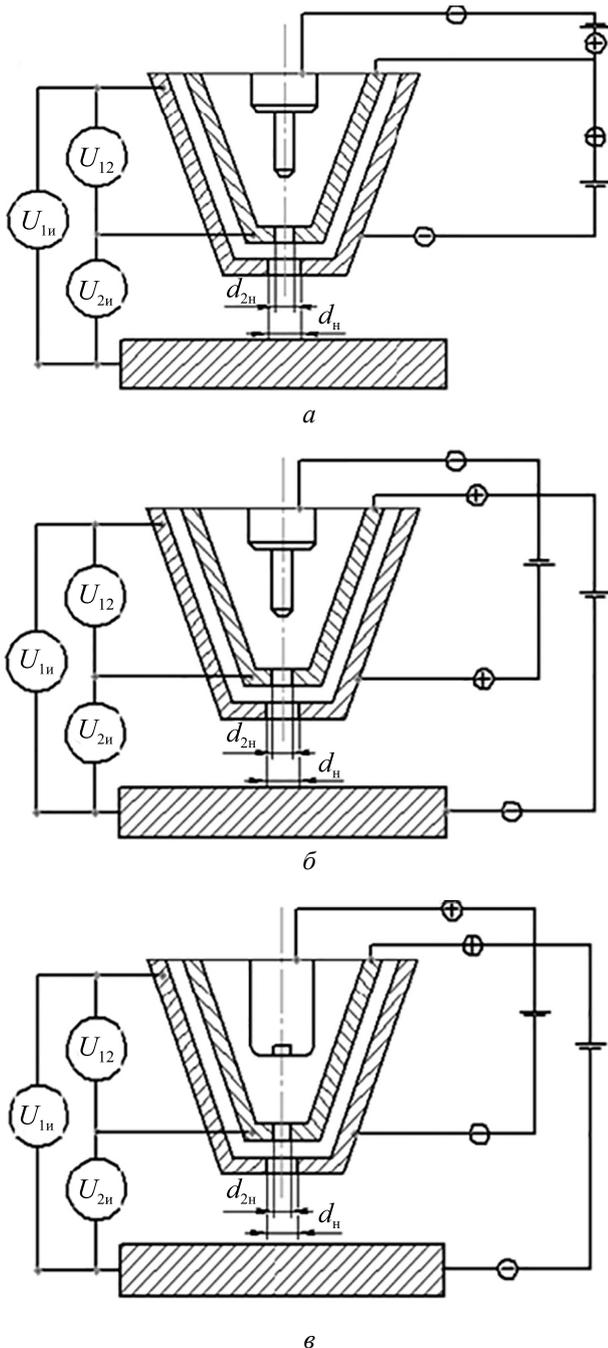


Рис. 7. Схемы подключений двух источников питания к одному плазматрону:

а – комбинация дуг разной полярности;

б – двойная дуга прямой полярности; в – двойная

дуга обратной полярности; d_n – диаметр канала во внешнем плазмобразующем сопле; $d_{2н}$ – диаметр канала во внутреннем плазмобразующем сопле

В настоящее время большое внимание уделяется третьему способу получения сжатой дуги путем использования более совершенных и конструктивно простых плазменных горелок (плазматронов), обеспечивающих в широких пределах регулирование термогазодинамического воздействия дуги на расплавляемый

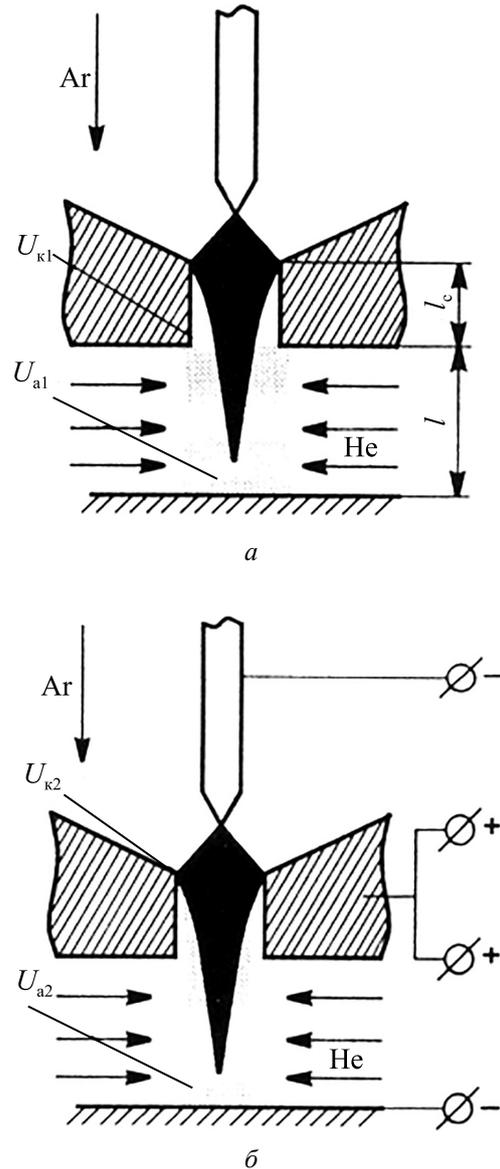


Рис. 8. Схемы горения основной и дежурной дуг с раздельными (а) и совмещенными (б) анодными пятнами:

U_{k1} , U_{a1} – напряжение на катоде и аноде дежурной дуги соответственно; U_{k2} , U_{a2} – напряжение на катоде и аноде сварочной дуги соответственно; l – длина основной (сварочной) дуги; l_c – длина цилиндрического канала плазмобразующего сопла

металл. При этом перспективным является использование в качестве электрода сопла плазматрона.

На этом принципе основан способ сварки, согласно которому возбуждают две дуги постоянного тока: одну – прямой полярности – между вольфрамовым электродом и соплом (дежурная дуга), другую – обратной полярности – между соплом и обрабатываемым изделием. Вторая дуга называется основной [12, 13].

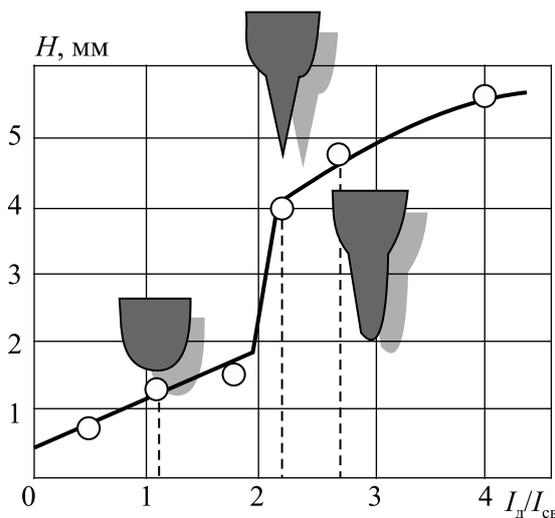


Рис. 9. Зависимость глубины проплавления H от соотношения токов дежурной и основной дуг I_d/I_{cb} при сварке сплава 1420 (диаметр плазмообразующего сопла 3 мм, скорость сварки 0,32 м/мин)

Основная дуга сжимается электрическим путем: в результате выдувания плазмы дежурной дуги создается электрический проводник, который стягивает на себя поток основной дуги, и тем самым обеспечивается сжимающий и стабилизирующий эффект. Возможно стабильное горение основной дуги при ее длине до 10 мм.

С позиций практики применение описанного способа плазменной сварки наиболее эффективно при сварке алюминиевых сплавов, когда требуется разрушение и удаление тугоплавкой поверхностной оксидной пленки.

Технологическая схема исследуемого процесса приведена на рис. 8.

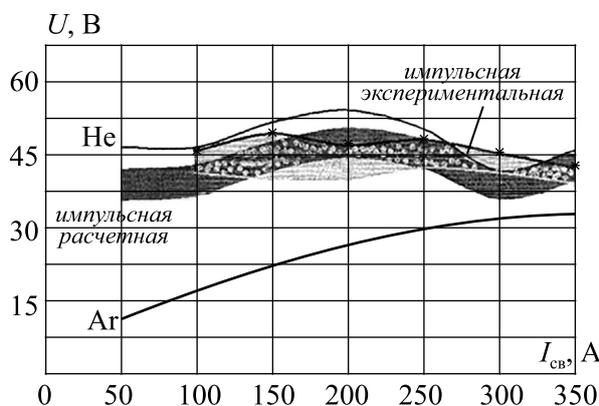


Рис. 10. Вольт-амперная характеристика плазменной дуги при непрерывной подаче плазмообразующего газа (аргон, гелий) и импульсной попеременной подаче указанных газов

Питание основной и дежурной дуг осуществляется от источника ВСВУ-400. В качестве плазмообразующего газа применяли аргон, в качестве защитного – гелий. Ток основной дуги I_{cb} составляет 60–85 А, ток дежурной дуги I_d изменяется в пределах от 30 до 350 А в зависимости от толщины свариваемых заготовок.

Исследовались образцы из алюминиевого сплава 1420 толщиной 10 мм. Глубину проплавления оценивали по шлифам швов, выполненных по целой пластине. Полученные экспериментальные данные (рис. 9) свидетельствуют о том, что при соотношении токов дежурной и основной дуг $I_d/I_{cb} = 1,9 - 2,0$ происходит резкое увеличение глубины проплавления с 1,5 до 4,0 мм.

Визуальное наблюдение в поляризованном свете за характером горения основной дуги свидетельствует о том, что при $I_d/I_{cb} \approx 2$ происходит увеличение длины основной дуги, анодное пятно этой дуги с торцевой поверхности сопла втягивается в объем его канала и совмещается с анодным пятном дежурной дуги. Диаметр столба основной дуги становится практически равным диаметру сопла (3,2-3,5 мм) [14].

Увеличение длины основной дуги, в результате которого произошло совмещение анодных пятен дежурной и основной дуг, позволило повысить общую мощность источника нагрева практически без дополнительного введения энергии в систему.

В результате повышения интенсивности воздействия источника теплоты на материал происходит смена механизма ввода энергии и теплообмена, форма проплава приобретает «кинжальный» вид, характерный для концентрированных источников энергии (см. рис. 9).

Дополнительные резервы повышения свойств металла сварных соединений и снижения вероятности образования пористости заключаются в использовании импульсного тока для питания дежурной дуги и в программируемом изменении состава плазмообразующего газа [15].

Исследования процесса плазменной сварки с импульсной подачей плазмообразующих газов (аргона и гелия) показали, что на глубину проплавления в большей степени оказывает влияние сила тока плазменной дуги и в меньшей степени влияет частота следования импульсов подачи плазмообразующего газа [15].

Импульсная подача плазмообразующих газов благоприятно воздействует на геометрическую форму шва, уменьшая коэффициент

формы шва и устраняя смещение оси шва в направлении перемещения плазматрона.

Сравнение вольт-амперной характеристики плазменной дуги при сварке как в различных газах, так и с импульсной их подачей показало, что при сварке с импульсной подачей газов напряжение на дуге выше, чем при сварке в аргоне, но ниже, чем при сварке в гелии (рис. 10).

В этом случае при импульсном изменении плазмообразующего газа с аргона на гелий происходит скачкообразное изменение длины дуги. При изменении длины дуги изменяется силовое воздействие плазменной дуги на расплав сварочной ванны и, как результат, периодически меняется глубина проплавления. Установлено, что импульсное изменение состава плазмообразующего газа способствует снижению количества пор в металле шва.

Механические свойства сварных соединений

Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных плазменной сваркой, представлены в табл. 1.

На рисунке 11 представлены данные измерений продольных деформаций сварных соединений, выполненных аргонодуговой (1), плазменной сваркой плавящимся (2) и неплавящимся (3) электродами, гелиево-дуговой сваркой (4), проводившихся на образцах толщиной 5 мм из сплава 1201 по методике, разработанной

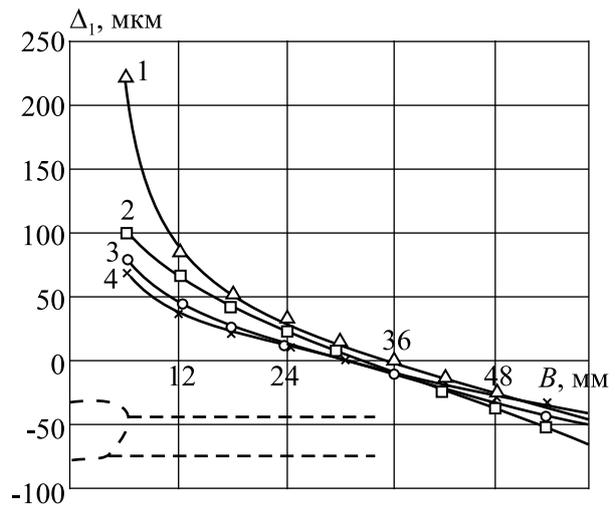


Рис. 11. Продольные смещения Δ_1 в сварных соединениях, выполненных на образцах толщиной 5 мм из сплава 1201: 1 – аргонодуговой сваркой; 2 – плазменной сваркой плавящимся электродом; 3 – плазменной сваркой неплавящимся электродом; 4 – гелиево-дуговой сваркой; B – расстояние от оси шва

в МГТУ им. Н.Э. Баумана [16]. Для них использовался механический рычажный тензометр, оснащенный часовым индикатором с ценой деления 2 мкм и ходом штока 2 мм. База измерений составляла 100 мм. Анализ полученных результатов показал, что минимальными деформациями обладают соединения, выполненные плазменной сваркой неплавящимся электродом и гелиево-дуговой сваркой.

Таблица 1

Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных плазменной сваркой

Сплав	Толщина, мм	Образец	Предел прочности $\sigma_B^{св}$, МПа	Угол изгиба α , град	Ударная вязкость шва КСУ, кДж/м ²
АМг5	7	Основной металл	295	–	223,2
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	268,3	160	230,4
АМг6	5	Основной металл	351,2	–	247,2
		Сварной шов, плазменная сварка плавящимся электродом на обратной полярности	327,7	81	255,9
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	334,5	67	243,4

Сплав	Толщина, мм	Образец	Предел прочности σ_B^{cb} , МПа	Угол изгиба α , град	Ударная вязкость шва КСЧ, кДж/м ²
1565чМ	5	Основной металл	355	–	258,7
		Сварной шов, плазменная сварка плавящимся электродом на обратной полярности	329,2	180	206,3
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	340,3	170	208,4
1201	5	Основной металл	402	39	277,3
		Сварной шов, плазменная сварка плавящимся электродом на обратной полярности	245	50	230,3
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	249	50	243,1
01205	20	Основной металл	415	32	266,9
		Сварной шов, плазменная сварка плавящимся электродом на обратной полярности	210	55	228,7
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	230	70	236,3
АБТ101	25	Сварной шов, плазменная сварка плавящимся электродом на обратной полярности	340	40	–
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	368	42	–
1460	4	Сварной шов, плазменная сварка плавящимся электродом на обратной полярности	300	45	130
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	325	55	125
1420	5	Сварной шов, плазменная сварка плавящимся электродом на обратной полярности	335	60	155
		Сварной шов, плазменная сварка неплавящимся электродом на обратной полярности	355	65	150

Макро- и микроструктура сварных соединений

Макроструктура в поперечном сечении сварных соединений, выполненных проникающей дугой, характеризуется формой в виде прямоугольника (рис 12, а). Наблюдается некоторое занижение лицевой поверхности шва.

Микроструктура металла шва сплава 1565чМ, выполненного плазменной сваркой неплавящимся электродом с присадочной проволокой СвАМг61, состоит из α -твердого раствора, на фоне которого закристаллизовалась дендритная сетка (рис. 13, а, б) [17]. Степень распада твердого раствора в металле шва

не одинакова – имеются участки с повышенным и пониженным содержанием эвтектики.

Микроструктура переходной зоны характеризуется оплавлением эвтектики вдоль деформированного волокна металла (рис. 13, в). Ширина переходной зоны составляет 0,76–0,85 мм.

Микроструктура основного металла выражена текстурой деформации с выделениями вторичной $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ -фазы (рис. 13, з).

В целом, микроструктура сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных плазменной сваркой, идентична микрострук-

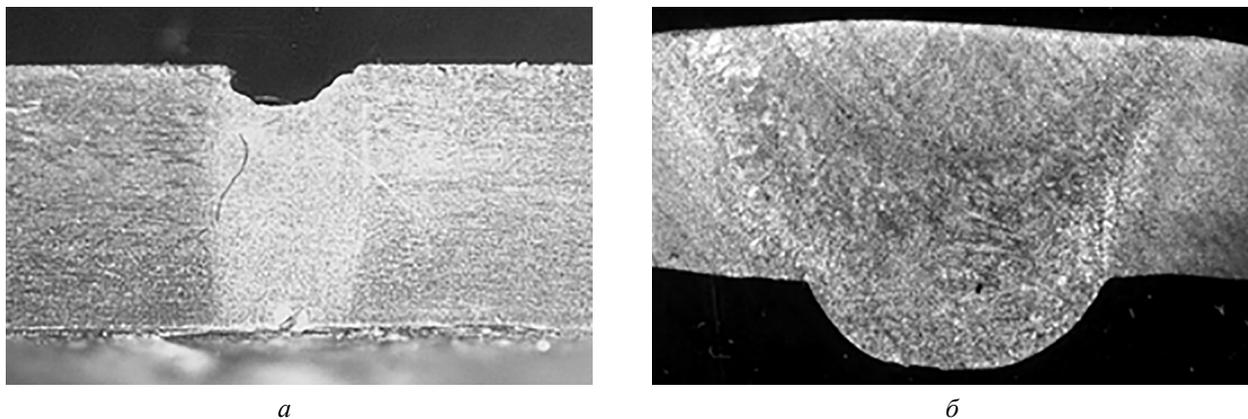


Рис. 12. Макроструктура сварных соединений листов сплава 1565ЧМ толщиной 8 мм, выполненных проникающей плазменной дугой (а) и плазменной дугой плавящимся электродом (б) (×3)

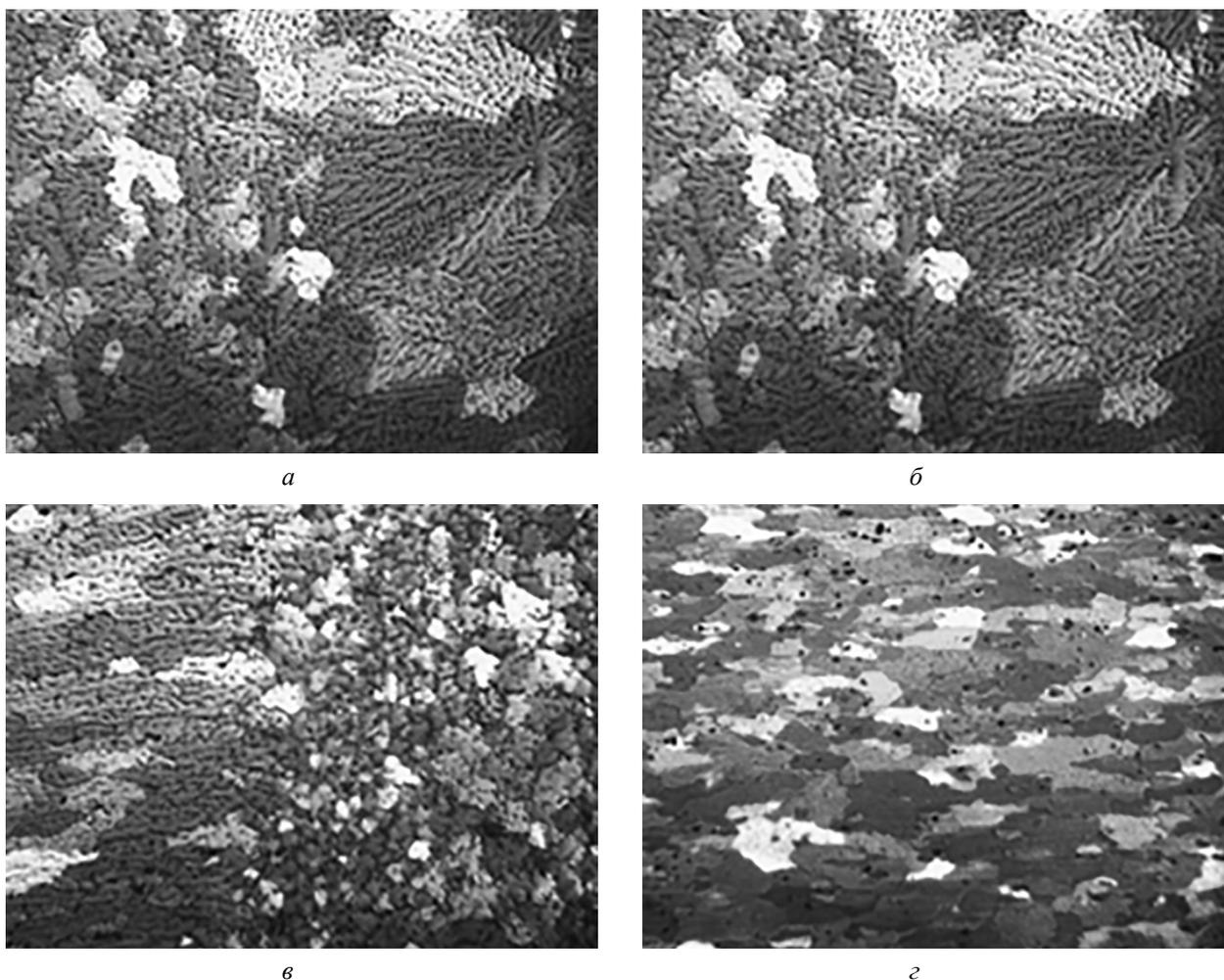


Рис. 13. Микроструктура сварного соединения сплава 1565ЧМ толщиной 8 мм, выполненного плазменной сваркой неплавящимся электродом с присадочной проволокой СвАМг61 (×100): а – шов; б – шов около зоны сплавления; в – зона сплавления; г – основной металл

туре соединений, полученных аргонодуговой сваркой. Существенное отличие заключается в протяженности зоны термического влияния, которая для плазменной сварки существенно меньше [18]. Кроме того, время пребывания металла зоны термического влияния при повышенных температурах примерно в 2,5–3 раза меньше, чем при плазменной сварке, за счет более высокой концентрации тепловой энергии последней. В результате, в зоне термического влияния снятие нагартовки (для термически неупрочняемых алюминиевых сплавов) и полнота структурных превращений (для термически упрочняемых алюминиевых сплавов) не достигаются, что и обеспечивает более высокий уровень прочностных свойств соединений по сравнению с аргонодуговой сваркой.

Заключение

Анализ современных направлений развития плазменной сварки алюминиевых сплавов показывает, что автоматическая плазменная сварка проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки обеспечивает высокое качество сварных швов. В процессе сварки не проявлялось образование горячих трещин, сварные швы имели высокого качества внешний вид лицевой стороны и корня с плавным переходом к основному металлу.

Интенсивная катодная очистка металла в процессе плазменной сварки на обратной полярности обеспечивает получение качественных сварных швов при снижении требований к подготовке алюминиевых сплавов под сварку.

Для расширения технологических возможностей и повышения стабильности процесса проявляется тенденция по разработке комбинированных плазменных технологий с использованием нескольких источников питания, подсоединенных к плазматрону.

Использование комбинированных плазменных технологий позволяет повысить качество выпускаемой продукции, производительность процессов сварки алюминиевых сплавов в несколько раз, получить бездефектные швы, устранить некоторые технологические операции из цикла изготовления изделия (подготовка кромок для больших толщин, зачистка поверхности алюминиевых сплавов от оксидной пленки и др.), что способствует уменьшению времени изготовления изделия, снижению стоимости погонного метра шва и, следовательно, самого изделия в целом.

Уровень механических свойств сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных плазменной сваркой на обратной полярности неплавящимся электродом с присадочной проволокой, несколько выше, чем при плазменной сварке плавящимся электродом.

Наиболее эффективно применение плазменной сварки плавящимся электродом для выполнения стыковых соединений алюминиевых сплавов толщиной более 10 мм.

Список литературы

1. *Щицын Ю.Д., Тыткин Ю.М.* Плазменная сварка плавящимся электродом алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1986. № 5. С. 1–2.
2. *Грушко О.Е., Овсянников В.В., Овчинников В.В.* Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. М.: Наука, 2014. – 298 с.
3. *Дедюх Р.И.* Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом (обзор) // Сварочное производство. 2014. № 5. С. 34–39.
4. *Bohme D., Cramer H.* Plasma welding – current status // Institutului in Sudura si Incercari De Materiale – Bid Isim. 2013. No. 2. P. 8–14.
5. *Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А.* Плазменная наплавка (обзор) // Сварочное производство. 2007. № 2. С. 32–40.
6. *Гвоздецкий В.С., Макаренко Н.А.* Плазменная сварка (обзор) // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 26–30.
7. Development of a system for plasma welding with consumable electrode of aluminum / *Kohei Ono, Zhongjie Era et al.* // Journal of Light Metal Welding and Construction. 2008. Vol. 46. No. 11. P. 1–5.
8. *Toshlyuki Hasegwa.* Development of new methods for plasma welding // Journal of Light Metal Welding and Construction. 2010. Vol. 48. No. 4. P. 1–4.
9. Сварка закрытой сжатой дугой / *Б.А. Матюшкин, В.И. Денисов, А.А. Толкачев, Д.В. Чавдаров и др.* // Сварочное производство. 2016. № 6. С. 13–16.
10. *Патон Б.Е.* Проблемы сварки на рубеже веков // Автоматическая сварка. 1999. № 1. С. 4–14.
11. *Щицын Ю.Д., Тыткин Ю.М.* Особенности плазменной сварки плавящимся электродом // Материалы Всесоюзной НТК «Эко-

- номия материальных и трудовых ресурсов в сварочном производстве». Челябинск. 1986. С. 138–139.
12. Овчинников В.В., Редчиц В.В., Редчиц А.В. Повышение проплавляющей способности плазменной дуги при сварке алюминиевых сплавов // Новые материалы и технологии. М.: МАТИ, 1997. – 160 с.
13. Патент РФ № 2292256. Способ плазменной сварки / Овчинников В.В., Алексеев В.В. Опубл. 25.01.2007, бюл. 46.
14. Овчинников В.В., Редчиц В.В., Редчиц А.В. Повышение энергетической эффективности плазменной сварки // Сварочное производство. 2004. № 8. С. 21–23.
15. Татаринов Е.А., Киселев Г.С. К расчету вольт-амперной характеристики плазменной сварки при импульсной подаче аргона и гелия // Сварка и диагностика. 2009. № 5. С. 11–15.
16. Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности. М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
17. Овчинников В.В., Дриц А.М., Растопчин Р.Н. Особенности сварки листов алюминиевого сплава 1565ЧМ при производстве цистерн бензовозов // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 4. С. 24–36.
18. Овчинников В.В., Игнатьев Ю.Е., Рязанцев В.И. Импульсная и пульсирующая сварка алюминиевых сплавов // Машиностроение и инженерное образование. 2007. № 3. С. 12–28.

Материал поступил в редакцию 10.08.16

**ОВЧИННИКОВ
Виктор Васильевич**

E-mail: vikov1956@mail.ru;
Тел.: (916) 512-43-82

Академик международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет». Сфера научных интересов: металловедение сварка алюминиевых сплавов, разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов, способы сварки конструкций из алюминиевых сплавов. Автор 528 публикаций, в том числе четырех монографий, 122 изобретений.

**ДРИЦ
Александр Михайлович**

E-mail: Alexander.Drits@gmail.com
Тел.: (916) 642-82-73

Кандидат технических наук, директор по развитию бизнеса ЗАО «Алкоа-СМЗ». Сфера научных интересов: разработка новых высокопрочных алюминиевых сплавов, способы изготовления конструкций из алюминиевых сплавов. Автор 120 публикаций, в том числе трех монографий, 42 изобретений.

**РАСТОПЧИН
Руслан Николаевич**

E-mail: Ruslan15@mail.ru
Тел.: (965) 236-24-46

Главный технолог АО «Машиностроительный завод «БЕЦЕМА». Сфера научных интересов: изготовление сварных конструкций коммерческого транспорта из алюминиевых сплавов. Автор 12 публикаций, в том числе двух изобретений.

**ГУРЕЕВА
Марина Алексеевна**

E-mail: mag1706@mail.ru
Тел.: (916) 163-40-42

Академик международной академии информатизации, кандидат технических наук, доцент, технический директор ООО «НПФ «Луч». Сфера научных интересов: металловедение сварки алюминиевых сплавов, разработка новых свариваемых алюминиевых сплавов. Автор 72 публикаций, в том числе 22 изобретений.