

УДК: 6
259

**КУРЬЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА**

И. С. Гришин

**МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА
ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Государственный комитет РСФСР по делам
науки и высшей школы

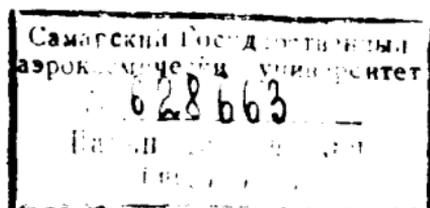
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

И.С.Гришин

МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА
ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Курс лекций

ФОНД РК



Самара 1991

УДК 621.791.755

Микроплазменная сварка тонколистовых конструкций: Курс лекций /И.С.Гришин; Куйбышев. авиац. ин-т. Самара, 1991. 42 с.
ISBN 5-230-16896-X

Изложена физическая сущность микроплазменной сварки, рассмотрены особенности образования плазмы в сварочной дуге, способы, вопросы техники и технологии микроплазменной сварки, даны примеры применения этого метода при изготовлении тонкостенных конструкций.

Курс лекций рассчитан на студентов дневной и вечерней форм обучения при изучении ими курсов "Технология конструкционных материалов" и "Сварка металлов". Работа подготовлена на кафедре производства летательных аппаратов.

Табл. 5. Ил. 20. Библиогр.: 12 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени С.П.Королева

Рецензенты: В.Матвеев, Ф.Тененбаум

ISBN 5-230-16896-X © Куйбышевский авиационный институт, 1991

ВВЕДЕНИЕ

Сварные конструкции из металлов и сплавов малых толщин (0,05-1,5 мм) составляют значительный объем сварочных работ. Однако получение качественных сварных соединений в таких конструкциях связано с рядом трудностей. При сварке металлов малых толщин достаточно сложно выдерживать оптимальные геометрические характеристики шва и, следовательно, получать стабильное качество сварного соединения, при этом возрастает вероятность образования прожогов металла и других дефектов. Среди известных способов сварки для соединения тонколистовых материалов наибольшее применение получили газовая сварка, дуговая сварка неплавящимся электродом в непрерывном и импульсном режимах, а также электронно-лучевая и лазерная сварки. Для некоторых типов конструкций успешно применяются контактная, диффузионная и ультразвуковая сварки.

В начале 60-х годов в научно-исследовательском институте авиационной технологии (НИИАТ) под руководством А.В.Петрова и в ряде зарубежных фирм (Швейцария, Англия, США и Франция) были начаты работы по использованию плазменной струи - сжатой дуги для обработки материалов (плазменное напыление, сварка и резка металлов). В институте электросварки им. Е.О.Патона АН УССР в эти же годы решалась задача по изучению физических процессов сварочной дуги и разработке на этой основе способов микроплазменной сварки металлов малых толщин и оборудования для ее широкого применения. Для решения этой задачи были изучены особенности и разработана теория контрагирования малоамперной сварочной дуги в различных средах, в том числе в вакууме, выполнены исследования катодных процессов сварочной дуги и определены условия стабильного горения малоамперной дуги с холодным катодом. На основе результатов исследований были раз-

работаны новые способы микроплазменной сварки металлов, в том числе алюминия, при нормальном и низком давлении.

Важным преимуществом микроплазменной сварки является стабильность горения скатой электрической дуги при очень малых токах. Плазменная струя имеет высокую концентрацию и интенсивность распределения теплового потока, обладает широкими технологическими возможностями, причем ее можно регулировать в широких пределах. Микроплазменная сварка в непрерывном и импульсном режимах горения дуги нашла широкое применение во многих отраслях промышленности: радио- и электротехнической, приборостроительной, электронной и медицинской технике, в производстве летательных аппаратов при изготовлении элементов конструкции узлов и агрегатов.

В предлагаемом курсе лекций дано краткое систематизированное изложение комплекса вопросов, связанных с физической природой скатой дуги, с ее получением и свойствами. Рассматриваются сущность и особенности технологии и техники микроплазменной сварки.

I. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

I.1. Образование плазмы в сварочной дуге

Дуговой разряд является одним из видов электрических разрядов в газах. Он характеризуется относительно низким падением напряжения и сравнительно большой плотностью тока. В применяемых на практике сварочных дугах падение напряжения составляет несколько десятков вольт, а плотность тока – 50 А/мм^2 и более [1]. В обычных условиях газ является диэлектриком. Он может проводить ток только в тех условиях, когда газ инжектируется извне или внутри него генерируются заряженные частицы. Источником генерации заряженных частиц является ионизация газа, в результате которой образуются свободные электроны и положительные ионы. Обычно ионизация атомов и молекул газа происходит при их столкновении с электронами, атомами или фотонами. При этом ионизуемым частицам передается энергия, которая превышает некоторое минимальное значение, зависящее от рода газа, называемое потенциалом ионизации. Существует также ступенчатый процесс, приводящий к ионизации при столкновении атомов и электронов с возбужденными атомами. Если же газ нагрет до высокой температуры, то все процессы ионизации в нем происходят одновременно. Ионизации соответствует обратный процесс – рекомбинация, в результате которой при столкновении положительного иона с электроном образуются нейтральные частицы.

Для обеспечения заданной стационарной электропроводности газа, когда концентрация заряженных частиц не изменяется со временем и процессы их появления и исчезновения стабилизированы, требуются затраты энергии. Именно в этом заключается основное различие газообразных проводников тока от жидких и твердых. В ионизированных газах ток переносится электронами и положительными ионами. При отсутствии электрического поля электроны и ионы нагретого газа совершают лишь беспорядочные движения, и средняя скорость их в любом направлении равна нулю. Если же к разрядному промежутку прило-

жена разность потенциалов, то под действием электрического поля электроны и ионы приобретают дрейфовые скорости, которые параллельны полю. Электроны дрейфуют к положительно заряженному электроду — аноду, а положительные ионы — к отрицательно заряженному электроду — катоду. Таким образом, в дуге существуют катодная и анодная области, обладающие объемными зарядами.

В квазинейтральной области, называемой столбом дуги и занимающей практически весь разрядный промежуток, ток переносится электронами и ионами. Так как концентрации их практически равны, а дрейфовая (направленная) скорость электронов под действием электрического поля значительно больше скорости ионов, то ток в столбе дуги практически переносится одними электронами. Направленная скорость электронов зависит от напряженности электрического поля и температуры столба дуги, а также рода газа и давления. Температура столба обуславливает ряд различных явлений в дуге и поэтому является одним из основных параметров. В столбе дуги наблюдается наибольшая степень ионизации газа. Причем, чем выше температура столба дуги, тем интенсивнее протекает процесс ионизации.

При высокой температуре любой газ перестает быть нейтральным. Однако чем больше порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева, тем больше число электронов в атоме и тем прочнее связаны электроны внутренних слоев оболочки с атомным ядром. Поэтому полную ионизацию атомов тяжелых элементов можно наблюдать только при температурах в миллионы и десятки миллионов градусов. Плазмой называют газ, в котором большая часть атомов и молекул ионизирована. Плазма является нормальной формой существования вещества при температуре 10000°C и выше. Это — низкотемпературная плазма. Для высокотемпературной плазмы нормальными считаются температуры 10^6 и выше (термоядерные реакции).

В электрической дуге энергия источника питания превращается в кинетическую и потенциальную энергию частиц плазмы — газового столба дуги, которая передается электродам и частично превращается в электромагнитное излучение — фотоны. Во всех дугах действуют мощные потоки ионизированного газа с преимущественным направлением вдоль оси, их скорости при сварке достигают $75-150$ м/с. Если столб дугового разряда сжать, например, путем истечения газового потока через узкое водоохлаждаемое сопло сварочной горелки, то это приведет к

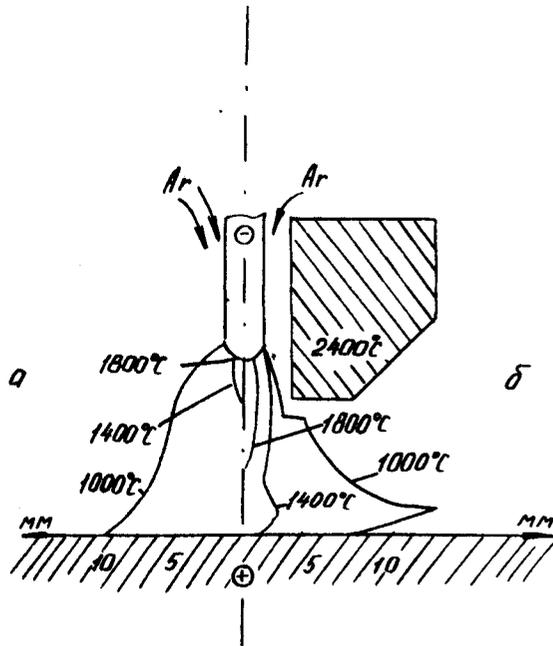
увеличению плотности тока в столбе дуги и связанному с этим значительному повышению температуры. Высокая температура столба дуги способствует ионизации плазмообразующего газа, при которой он обладает весьма значительной электропроводностью, приближающейся к электропроводности проводника. Таким образом, можно сравнительно просто получить плазменную струю сжатием дугового разряда потоком газа. Поэтому плазменная сварка представляет собой новый вид сварки плавлением, при котором детали нагреваются плазменной струей — сжатой дугой (ГОСТ 2601-84).

1.2. Формирование сжатой дуги

Основными недостатками малоамперной аргоновой дуги, затрудняющими осуществление качественной сварки металлов малых толщин, являются низкая стабильность (во времени и пространстве) дуги малых токов и малая плотность в анодном пятне (рис. 1,а). Работы по плазменной сварке на больших токах показали [2], что сжатая дуга, формируемая каналом плазмотрона, имеет значительно большую пространственную устойчивость, чем свободно горящая, а раздельная подача плазмообразующего и защитного газов позволяет применять при сварке различные смеси газов (рис. 1,б). Указанные преимущества сжатой дуги приемлемы также и для сварки металлов малых толщин ($\delta < 1$ мм), что обусловило по существу появление нового способа — микроплазменной сварки.

Плазменные струи получают в специальных устройствах, которые в сварочной технике называют плазменными горелками или плазмотронами [3]. Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем интенсивного охлаждения газовым потоком столба дуги, горящего в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазменной горелки. В инженерной практике наметились две схемы дуговых плазменных горелок (рис. 2).

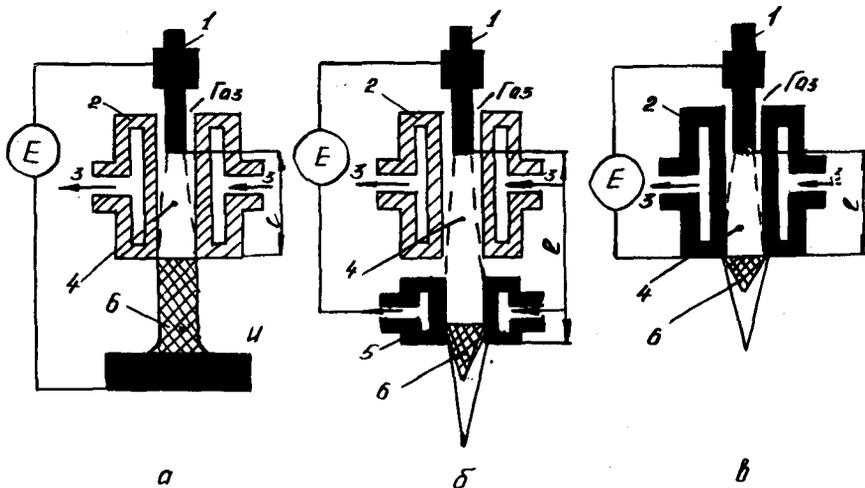
1. Горелки для сварки плазменной дугой (горелки прямого действия), в которых одним из электродов является обрабатываемый материал (рис. 2,а). В этом случае используют два энергетических источника: плазменную струю и электрически активное пятно дуги. Солено и канал совмещены: плазменная струя совпадает со столбом дуги. Внутренний коэффициент полезного действия такой горелки, т.е. использование подведенной к ней электрической энергии, достигает 60-80%.



Р и с. 1. Распределение температуры в дуговом разряде: а – без стабилизации газовым потоком при аргодуговой сварке; б – дуговой разряд, горящий в канале плазменной горелки в потоке аргона

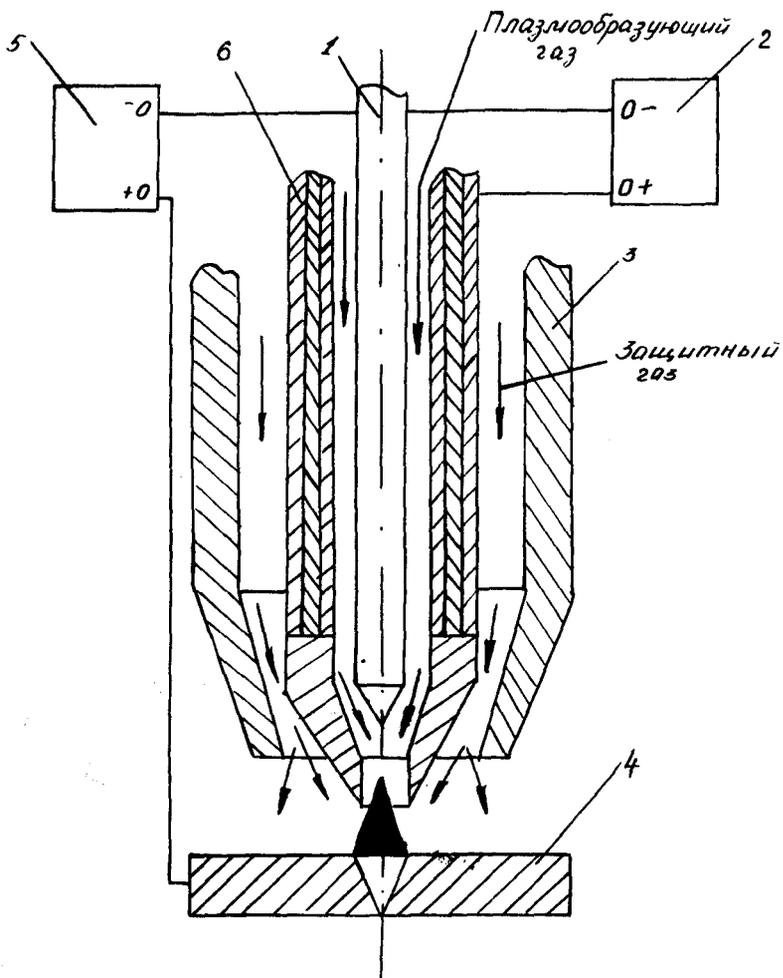
2. Горелки для сварки плазменной струей (горелки косвенного действия, рис. 2, б, в). На рис. 2,б изображены отдельные сопло и канал, плазменная струя выделена из столба дуги. На рис. 2,в сопло и канал совмещены. Для снижения тепловой нагрузки на электроды применяют плазменные горелки с магнитным закручиванием дуги. Максимальное значение внутреннего КПД таких горелок (при больших расходах газа) достигает 50–70%.

Принципиальная схема процесса микроплазменной сварки с горелкой прямого действия показана на рис. 3. Вольфрамовый электрод диаметром 0,8–2,0 мм с острозаточенным концом выставляется строго по оси водоохлаждаемого сопла с отверстием в нем, равным диаметру



Р и с. 2. Принципиальные схемы плазменных горелок: 1 — электрод; 2 — канал; 3 — охлаждающая вода; 3 — столб дуги; 5 — сопло; 6 — плазменная струя; E — источник тока; И — изделие; δ — углубление электрода в канал

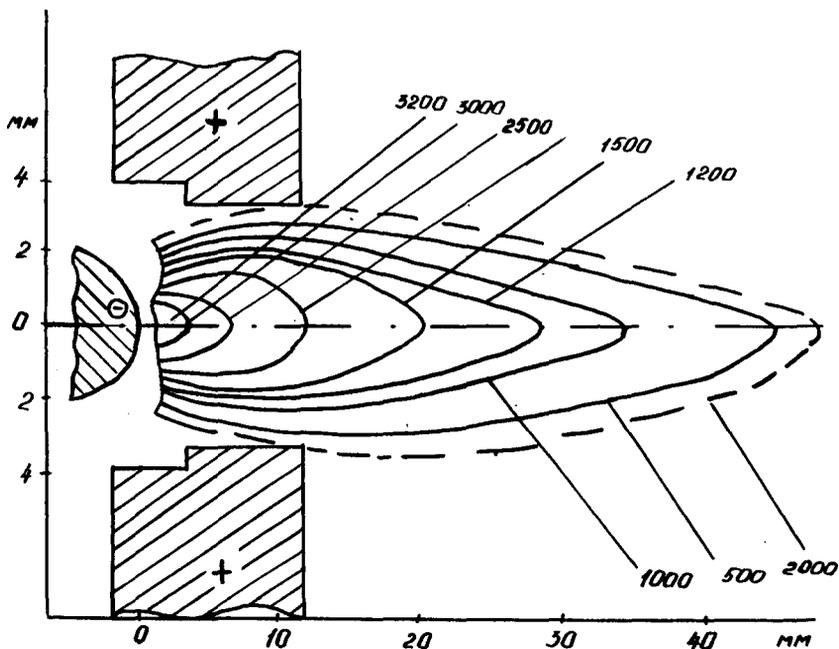
ру электрода. Электрод устанавливается внутри сопла на расстояние, равное диаметру выходного отверстия. Между электродом и соплом подается плазмообразующий газ. От вспомогательного источника питания 2 между соплом и электродом возбуждается малоамперная дежурная дуга, которая горит непрерывно. Поток плазмообразующего газа выдувает из выходного отверстия сопла плазменную струю. При поднесении горелки к изделию 4 на расстояние 1–2 мм без закорачивания сопла на изделие от основного источника тока 5 возбуждается рабочая дуга. Для защиты свариваемого металла от окисления и повышения устойчивости столба дуги малого диаметра по зазору между водоохлаждаемым соплом и керамическим мундштуком 3 подается защитный газ.



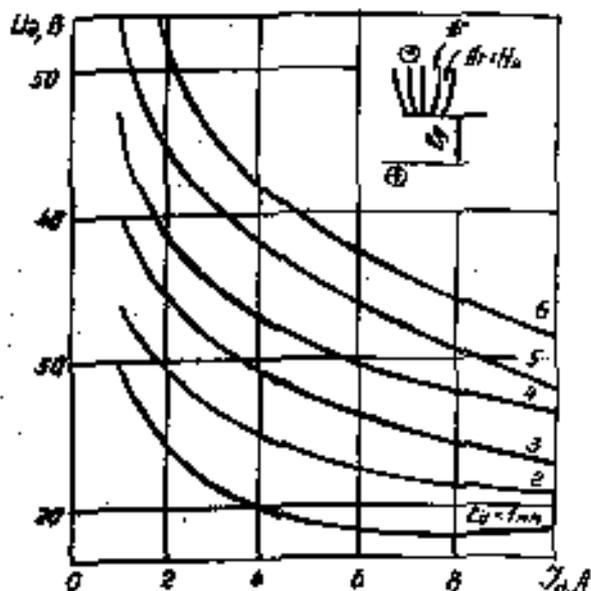
Р и с. 3. Схема устройства для получения микроплазменной струи

1.3. Характеристики плазменных струй

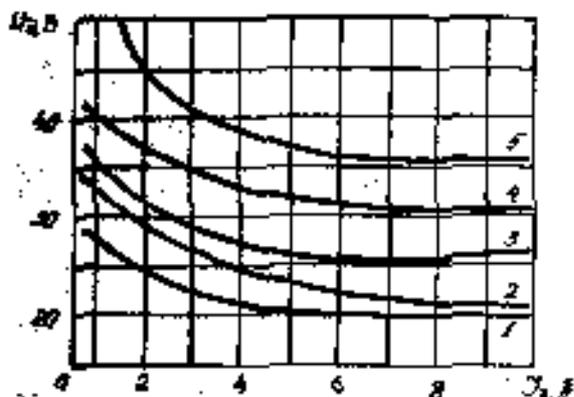
Ярко светящееся ядро плазменной струи с основанием, несколько меньшим входного сопла, окружено менее светящимся факелом. Длина струи определяется в основном мощностью дуги, размерами сопла, родом и расходом газа. При ламинарном истечении газа (низкие скорости струи) наблюдается длинная, мало смешивающаяся с окружающей атмосферой струя плазмы. Короткая струя плазмы наблюдается при турбулентном истечении газа (большие скорости струи). Формой сопла можно задавать очертания плазменной струи и тем самым распределение теплового и силового воздействия по поверхности обрабатываемого тела. Температура плазменной дуги и плазменной струи и радиусу и длине распределяется крайне неравномерно (рис. 4). Максимальная температура наблюдается в центре струи. В токоведущей части плазменной струи вблизи катода температура газа достигает $24000\text{--}32000^\circ\text{C}$.



Р и с. 4. Распределение температуры в плазменной струе



Р и с. 5. Семейство вольт-амперных характеристик для
сварочных дуг (защитный газ - 93% He + 7% H₂)



Р и с. 6. Семейство вольт-амперных характеристик
сварочных дуг для различных защитных газов: 1 - He;
2 - 93% He + 7% H₂; 3 - He; 4 - 94% He + 7% H₂; 5 - CO₂

Дуга при сварке неплавящимся электродом в среде инертного газа имеет форму колокола. При плазменной сварке вследствие обжатия сопла стенками дуга принимает форму цилиндра и даже конуса с вершиной, обращенной к изделию, поэтому плазменная сварка мало чувствительна к изменению длины дуги. Плотность тепловой энергии в центральной части плазменной дуги составляет больше 10^5 Вт/см², т.е. в 10 раз больше, чем значение теплового потока дуги при сварке неплавящимся электродом в среде инертных газов. Плотность тепловой энергии при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) равна 10^6-10^9 Вт/см², т.е. плотность плазменной дуги занимает промежуточное значение и относится к высококонцентрированным источникам нагрева.

Для выявления энергетических и технологических особенностей микроплазмы в работе [4] изучены вольт-амперные характеристики в различных защитных средах в зависимости от длины дуги и расходов газов (рис. 5 и 6). Падение напряжения на дуге существенно зависит от рода защитного газа. При одинаковой длине дуги падение напряжения наименьшее при использовании аргона. В гелии и углекислом газе наблюдается более высокое падение напряжения, а наибольшее — в случае применения CO_2 . Добавление водорода в защитный газ (как к аргону, так и к гелию) увеличивает падение напряжения на дуге. Изменение величины падения напряжения при замене защитного газа обусловлено изменением теплофизических свойств среды в районе столба дуги и в ее анодной области. Как видно из рис. 5 и 6, все характеристики дуги падающие. С увеличением длины дуги напряжение падает, но это менее заметно при увеличении силы тока в дуге. На величину падения напряжения в дуге на малых токах оказывают влияние присутствие дежурной дуги, диаметр канала сопла, а также расход плазмообразующего и защитного газов.

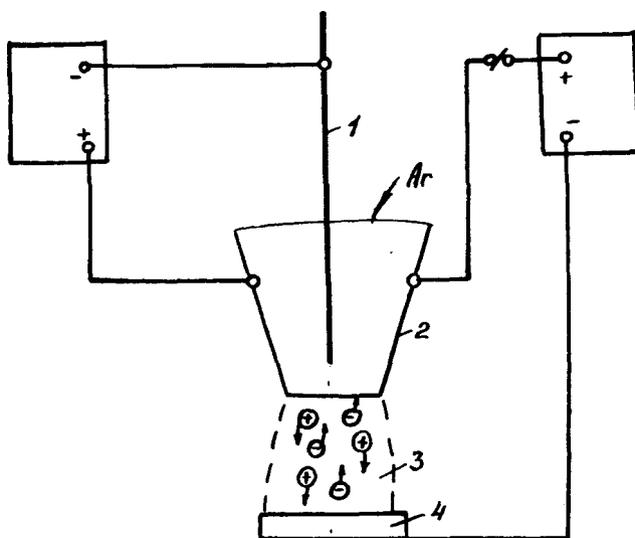
Таким образом, использование сопел с малым диаметром канала и применение различных газов, выполняющих кроме функции защиты металла шва также функцию фокусировки дуги (посредством более интенсивного охлаждения плазмы и затруднения развития ионизации в радиальном направлении), позволяет в микроплазме существенно повысить плотность тока.

2. СПОСОБЫ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

2.1. Сварка на постоянном токе

Сварка подавляющего большинства металлов осуществляется в непрерывном или импульсном режиме дугой прямой полярности, горячей между вольфрамовым электродом плазмотрона и изделием в струе плазмы образующего инертного газа, как правило, аргона (см. рис. 3). Для получения качественных сварных соединений из особо тонких металлов ($S < 0,2$ мм) в ИЭС им. Е.О.Патона разработан способ импульсной микроплазменной сварки [5], суть которого сводится к следующему. Нагрев и плавление металла осуществляется в течение импульса тока длительностью $\tau_{им}$ дугой прямой полярности. В промежуток времени между импульсами (во время паузы $\tau_{п}$) ванночка жидкого металла остывает, металл кристаллизуется и формируется сварная точка. Частота импульса и скорость сварки выбирается так, чтобы обеспечить определенную величину перекрытия сварных точек. Импульсное введение тепла в металл позволяет регулировать время пребывания жидкой ванны в расплавленном состоянии и ее размеры, уменьшить до минимума величину деформации кромок и устранить провисание шва, а также уменьшить пористость.

При микроплазменной сварке тонколистового алюминия для обеспечения стабильности горения малоамперной дуги (по аналогии со сваркой на прямой полярности) применяется малоамперная дежурная дуга, горящая между вольфрамовым катодом и соплом плазменной горелки. Такое решение вытекает из ионно-электронного механизма эмиссии [6]. Физическая сущность этого механизма эмиссии состоит в том, что ион, подходя к поверхности катода, своим собственным электрическим полем вырывает из катода электрон, который под действием внешнего электрического поля, создаваемого катодным падением потенциала, свободно уходит в прикатодную зону дуги, осуществляя перенос электронной компоненты тока в ней. Повысить устойчивость горения дуги с холодным катодом на малых токах согласно этому механизму эмиссии можно, используя посторонний источник ионов. Таким источником, не зависящим от тока основной дуги, служит факел плазмы 3 (рис. 7), создаваемый дежурной дугой косвенного действия. В связи с тем, что в промежутке "сопло 2 - изделие 4" существует такой факел, при



Р и с. 7. Схема микроплазменной сварки на обратной полярности

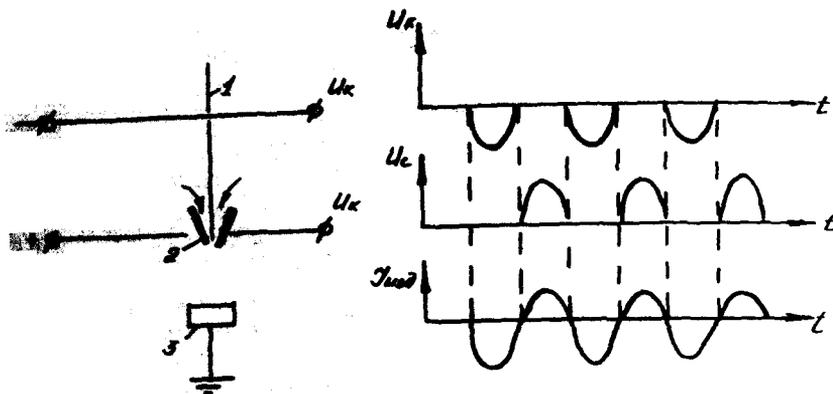
подаче на сопло 2 положительного напряжения (относительно изделия) в разрядном промежутке будет протекать ток несамостоятельного разряда обратной полярности. Таким образом, под действием электрического поля из факела плазмы на изделие (катод) 4 непрерывно поступают ионы, обеспечивая тем самым легкость возбуждения и стабильность эмиссии с холодного катода. Использование медного водоохлаждаемого сопла горелки в качестве анода основной дуги позволяет исключить воздействие тока дуги обратной полярности на катод дежурной дуги. При такой схеме питания плазмотрона вольфрамовый электрод I горелки используется только в качестве катода дежурной дуги и его малый диаметр обеспечивает устойчивое горение при токе 2-5 А.

При малых расходах плазмообразующего газа (0,2-0,8 л/мин) анодное пятно дуги обратной полярности размещается внутри канала сопла, а фокусировка (сжатие) столба вблизи изделия и пространственная его устойчивость обеспечиваются защитным газом. Катодное пятно

в пределах узкой зоны непрерывно блуждает по поверхности изделия и разрушает окисную пленку алюминия путем ее диссоциации. Если ток дуги обратной полярности достаточен для расплавления кромок свариваемого изделия, то одновременно с разрушением окисных пленок будет происходить процесс сварки. Как правило, плазмообразующим газом в этом случае служат аргон, а защитным – гелий или смесь гелия с аргоном.

2.2. Сварка на переменном токе

При этом способе сварки дуга обратной полярности используется только в один полупериод для разрушения окисных пленок на кромках свариваемых деталей. Плавление металла осуществляется в другой полупериод высококонцентрированным источником тепла – дугой прямой полярности, горящей между вольфрамовым электродом плазменной горелки и изделием (рис. 8). Между электродом и соплом плазменной горелки в потоке плазмообразующего газа непрерывно горит дежурная дуга постоянного тока, создающая в промежутке "сопло-изделие" факел плазмы. При подаче на сопло горелки положительного (относительно изделия) полупериода напряжения между соплом и изделием формируется дуга обратной полярности с нестационарным катодным пятном.



Р и с. 8. Схема микроплазменной сварки на переменном токе: 1, 2, – соответственно электрод и сопло плазменной горелки; 3 – изделие

В течение этого полупериода происходит разрушение окисной пленки на кромках свариваемого изделия. Величина тока обратной полярности выбирается только из соображений качественной очистки и поэтому мала. Затем на вольфрамовый электрод горелки поступает отрицательный (относительно изделия) полупериод напряжения. При этом формируется плазменная дуга с большой плотностью энергии, достаточной для плавления, и таким образом осуществляется сварка металлов, имеющих на поверхности тугоплавкие окисные пленки.

Как следует из вышеописанного способа сварки, через изделие проходит асимметричный переменный ток, а по вольфрамовому электроду — только ток прямой полярности. Поэтому оплавления вольфрамового электрода, как при аргонодуговой сварке на переменном токе, не происходит. Это обеспечивает высокую пространственную устойчивость и стабильность горения дуги даже при токах меньше 1 А. Режим дежурной дуги, глубина погружения электрода в канале сопла, расход газов и величины токов в различные полупериоды являются важными технологическими параметрами, оптимальный выбор которых обеспечивает стабильность процесса сварки тонкого алюминия и хорошее качество сварного соединения.

Способ сварки на переменном токе допускает возможность попеременной подачи импульсов не только синусоидальной, но и любой другой формы (например, прямоугольной) различной длительности. Раздельная регулировка длительности и амплитуды тока дуги прямой и обратной полярности значительно расширяет технологические возможности этого способа, поскольку степень очистки поверхности от окисных пленок и скорость плавления металла можно изменять в нужном направлении путем регулировки длительности и амплитуды импульсов тока. В этом случае сплошной шов образуется плавлением отдельных точек с заданным перекрытием.

Процесс сварки заключается в следующем. В течение импульса T_{np} тока I_{np} дугой прямой полярности передается свариваемым кромкам достаточное количество тепла $Q_{np} I_{np} U_{np} T_{np}$, которое расплавляет основной металл, образуя сварочную ванну в виде точки. В течение импульса $T_{об}$ тока $I_{об}$ дуги обратной полярности вводится значительно меньшее количество тепла $Q_{об} I_{об} U_{об} T_{об}$, достаточное только для разрушения окисных пленок, и сварочная ванна охлаждается до полной или частичной кристаллизации. Здесь T_{np} , $T_{об}$ и

$U_{пр}$, $U_{об}$ — соответственно КИД и падение напряжения на дуге прямой и обратной полярности. Следующий импульс тока прямой полярности создает сварочную точку на расстоянии h от предыдущей точки:

$$h = (\tau_{пр} + \tau_{об}) V_{св},$$

где $V_{св}$ — скорость сварки.

Общее количество тепла, вкладываемое в одну точечную ванну, можно представить как [7]

$$Q_{общ} = I_{пр} U_{пр} \tau_{пр} + I_{об} U_{об} \tau_{об}.$$

Таким образом, шов формируется путем периодического расплавления точек с шагом h . Перекрытие точек задается их размером и шагом. Количество тепла Q_1 , приходящееся на единицу длины шва, в данном случае представлено как

$$Q_1 = \frac{I_{пр} U_{пр} \tau_{пр} + I_{об} U_{об} \tau_{об}}{(\tau_{пр} + \tau_{об}) V_{св}}. \quad (1)$$

Если мощность дуги обратной полярности намного меньше мощности дуги прямой полярности, то уравнение (1) упрощается и приводится к выражению усредненной мощности с периодически повторяющимися импульсами дуги прямой полярности:

$$Q_1 \approx \frac{I_{пр} U_{пр} \tau_{пр}}{(\tau_{пр} + \tau_{об}) V_{св}}. \quad (2)$$

Учитывая, что $\frac{\tau_{об}}{\tau_{пр}} = \sigma$ — коэффициент жесткости и $\frac{I_{пр}}{I_{об}} = K$ — коэффициент асимметрии тока, соотношение (2) можно записать в виде

$$Q_1 = \frac{I_{пр} (U_{пр} + \frac{\sigma}{K} U_{об})}{(1 + \sigma) V_{св}}, \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой усредненную мощность микроплазменной дуги с разнополярными импульсами тока, когда амплитуда и длительность импульсов тока прямой и обратной полярности различны. Расчет распространения тепла при микроплазменной сварке разно-

полярными импульсами тока и выбор режимов сварки можно осуществлять так же, как и для периодически горящей дуги постоянного тока с непрерывно действующим источником тепла мощностью

$$Q_{\text{общ}} = \frac{2 J_0 U_0 (1 + \frac{G}{K})}{1 + G} .$$

Следует отметить, что по сравнению с микроплазменной сваркой синусоидальным током при сварке разнополярными импульсами прямоугольной формы благодаря постоянному значению коэффициента контрагирования в течение всей длительности импульса глубина проплавления увеличивается, а ширина шва уменьшается.

3. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

3.1. Аппараты для сварки

Для реализации оптимальных условий контрагирования дуги и обеспечения стабильных и качественных сварных соединений из металлов малых толщин требуются специальные источники питания. Они должны обладать гиперболической или пологопадающей внешней характеристикой, обеспечивать надежное возбуждение и горение дуги в непрерывном и импульсном режимах в широком диапазоне токов, начиная примерно от 0,5 А, с длительностью импульсов и паузы между ними $(10-500) \cdot 10^{-3}$ с. Кроме того, для сварки легких металлов и сплавов необходимо обеспечить возбуждение и горение дуги обратной полярности.

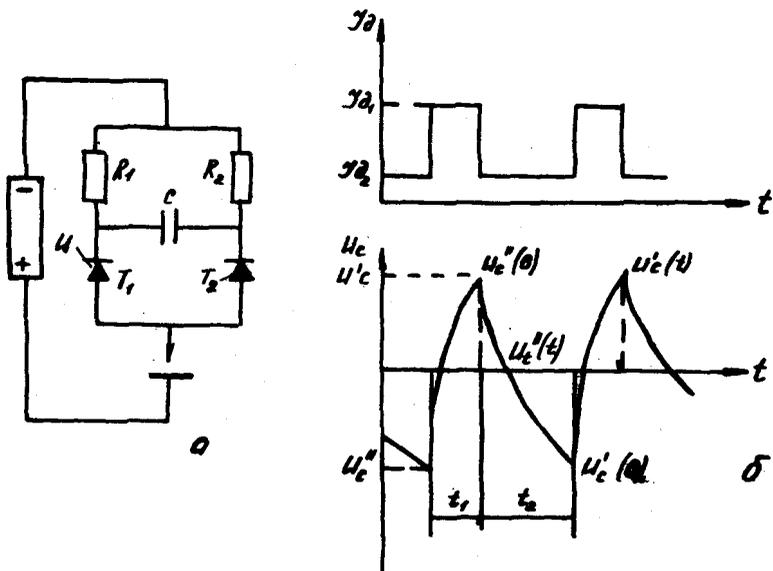
Все микроплазменные источники питания состоят из двух основных узлов: сварочного выпрямителя и коммутатора (прерывателя) тока. Источники питания, предназначенные для сварки алюминия и его сплавов, содержат еще, как правило, выпрямитель и коммутатор разнополярных импульсов тока. Кроме того, во всех источниках питания для микроплазменной сварки имеются маломощный выпрямитель для питания дежурной дуги, а также различные элементы автоматики: электрогазоклапаны, реле и контакторы, гидравлические датчики и т.п.

Сварочный выпрямитель состоит из трансформатора и блока вентилей. Используются два типа трехфазных трансформаторов: с жесткой внешней характеристикой и симметричный трансформатор с развитым магнитным рассеянием и с подвижными катушками. В сварочных выпрямителях микроплазменных источников питания используются кремневые вентили типа ВК и кремневые лавинные вентили типа ВЛ. Эти приборы отличаются высокой проводимостью ($10^2 - 10^3 \text{ Ом}^{-1}$) в прямом направлении и незначительными (до 5 мА) токами утечки в обратном направлении. Характеристики кремневых вентилей остаются стабильными при повышенных температурах (вплоть до $150 - 200^\circ\text{C}$) и допускают высокие плотности тока (до 200 А/см^2) [8].

Наиболее сложной частью импульсных микроплазменных источников питания является коммутатор, предназначенный для преобразования постоянного тока в импульсный. Во всех микроплазменных источниках питания используются коммутаторы, в которых в качестве приборов ключевого действия применен управляемый диод - тиристор. Термин "тиристор" обозначает полупроводниковый ключевой прибор, два возможных состояния которого (запертое и открытое) обуславливаются регенеративной внутренней обратной связью в многослойной структуре [9]. Наиболее распространенными являются кремневые управляемые вентили: КУВ, ВКУ, Т, Т2, Т4 и др.

Коммутатор постоянного тока, построенный на базе тиристорного мультипликатора, показан на рис. 9. Принцип его работы состоит в следующем. При включении тиристора Т1 (рис. 9,а) в цепи электрода изделия будет протекать ток дуги $I_{\beta 1}$, величина которого определяется напряжением холостого хода источника постоянного тока, падением напряжения на дуге $U_{\beta 1}$ и резистором R_1 . По истечении заданного промежутка времени t_1 включается тиристор Т2, ранее открытый тиристор Т1 закрывается и начинает протекать ток дуги $I_{\beta 2}$. Его величина определяется также напряжением холостого хода, падением напряжения $U_{\beta 2}$ и резистором R_2 . Через время $t_2 = T - t_1$, где T - длительность полного цикла коммутатора, снова включается тиристор Т1 и схема возвращается в первоначальное состояние. Как можно видеть на рис. 9,б, длительность полного цикла работы коммутатора зависит от напряжения, до которого заряжается коммутатор, и от времени его зарядки и разрядки до этого напряжения.

Аппараты для микроплазменной сварки, изготавливаемые серийно промышленностью, по назначению можно разделить на три группы:



Р и с. 9. Схема коммутатора (а), эпюры тока и напряжения (б)

для сварки на постоянном токе;
 для сварки на переменном токе;
 универсальные аппараты.

В табл. I приведены основные характеристики всех разработанных в ИЭС им. Е.О.Патона АН УССР аппаратов для микроплазменной сварки [4].

Следует особенно отметить универсальную установку для ручной и механизированной микроплазменной сварки МПУ-4, имеющую широкий диапазон возможностей для сварки черных и цветных металлов и сплавов из тонколистового материала, которая обеспечивает четыре режима работы:

1. Режим "А" — сварка постоянным током прямой полярности с плавной регулировкой тока от 2,5 до 30 А.

2. Режим "В" — сварка импульсным током прямой полярности с плавной регулировкой импульсов тока от 2,5 до 30 А и дискретной регулировкой длительности импульсов и пауз в пределах 0,02; 0,03; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 с (точность $\pm 10\%$).

Технические характеристики аппаратов для микроплазменной сварки

Тип аппарата	Толщина свариваемого металла, мм		Режим работы	Сварочный ток, А		Длительность импульса (паузы), с	Плазматрон
	ХВНПОТ	АМГ6		прямая полярность	обратная полярность		
A-1255	0,1-0,8	-	Ш	0,5-10	-	-	ОБ-III5
A-1255M	0,1-1,0	-	Ш, ИП	0,5-20	-	0,02-0,5 (0,02-0,5)	ОБ-III5
МПИ-3	0,08-1,0	-	ИП	0,5-20	-	0,008 (0,012-0,092)	ОБ-II60A
МПУ-М	0,1-1,3	-	Ш, ИП	0,8-30	-	0,02-0,4 (0,02-0,5)	ОБ-III5
МПА-80	0,1-2,0	-	Ш, ИП	1,0-80	-	0,02-0,5 (0,02-0,5)	ОБ-II60A
A-1281		0,2-1,2	ПТ	3,0-70	1,5-40	0,01(0,01)	ОБ-II60A
A-1575		0,5-2,5	ПТ	5,0-200	3,0-100	0,01(0,01)	ОБ-1213
МПУ-РИ	0,1-1,3	0,2-0,6	Ш, ПО	1,5-30	1,0-15	0,02-0,5 (0,02-0,5)	ОБ-II60A
A-1347	0,3-2,5	0,3-2,5	Ш, РИ, ИП	6,0-150	3,0-55	0,02-0,2 (0,03-0,5)	ОБ-II60A
МПИ-5	0,05-1,2	0,3-0,8	ИП, РИ	1,5-25	1,5-12	0,006(0,014-0,034)	ОБ-1213
МПУ-5	0,1-2,0	0,3-2,0	Ш, ПТ, ИП	2,0-100	1,0-60	0,03-0,5 (0,03-0,5)	ОБ-II60A

Примечание. Ш - постоянный ток прямой полярности, ПО - постоянный ток обратной полярности, РИ - разнополярные импульсы тока, ИП - импульсный ток прямой полярности, ПТ - переменный ток.

3. Режим "С" — сварка импульсным током разной полярности с плавной регулировкой тока прямой полярности от 2,5 до 30 А и дискретной регулировкой длительности импульсов тока прямой полярности в пределах 0,02; 0,03; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 с (точность $\pm 10\%$) и тока обратной полярности от 4 до 12 А и длительности импульсов тока обратной полярности в пределах 0,02; 0,03; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 с (точность $\pm 10\%$).

4. Режим "Д" — сварка постоянным током обратной полярности с плавной регулировкой тока от 4 до 12 А.

Ток дежурной дуги в режиме "А" — $3 \pm 0,5$ А, в режиме "Д" — $6 \pm 0,5$ А. Ток основной дуги прямой полярности в непрерывном режиме при длине дуги 3–6 мм: на I ступени — 2,5–10 А $\pm 7,5\%$; на II ступени — 8–30 А $\pm 7,5\%$.

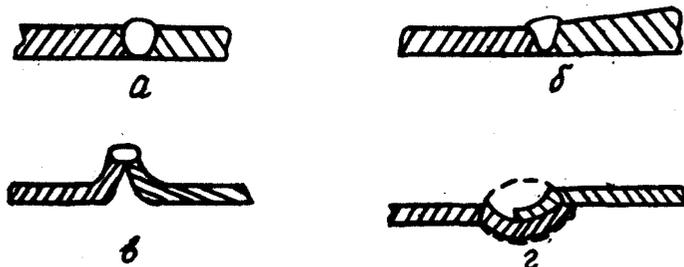
Ток основной дуги обратной полярности в непрерывном режиме при длине дуги 2–3 мм — 4–12 А $\pm 7,5\%$. Длина основной дуги прямой полярности при токе сварки 2,5 А не менее 3 мм. Длина основной дуги обратной полярности при токе сварки 6 А не менее 2 мм.

Для механизированной сварки кроме специализированных аппаратов могут применяться автоматы АДНГ, АДСВ и другие, серийно изготовляемые для автоматической АДС с установкой на них плазменных горелок (плазмотронов), показанных в табл. I. Могут также использоваться механизмы перемещения сварочных тракторов и подвесных головок после их доработки.

3.2. Особенности технологии и техники сварки

Технология микроплазменной сварки различных металлов и сплавов во многом зависит от их физико-химических свойств. Техника сварки в каждом конкретном случае должна разрабатываться с учетом свойств данного металла или сплава, а также типов соединений и конструкции изделия.

Типы сварных соединений. В зависимости от взаимного расположения свариваемых элементов применяют стыковые, угловые и нахлесточные соединения. При микроплазменной сварке стыковые соединения (рис. 10, а) применяют для металлов толщиной 0,1–2,0 мм. Разделка свариваемых кромок для этих толщин не производится. При сварке элементов различной толщины на более толстом из них выполняют скос



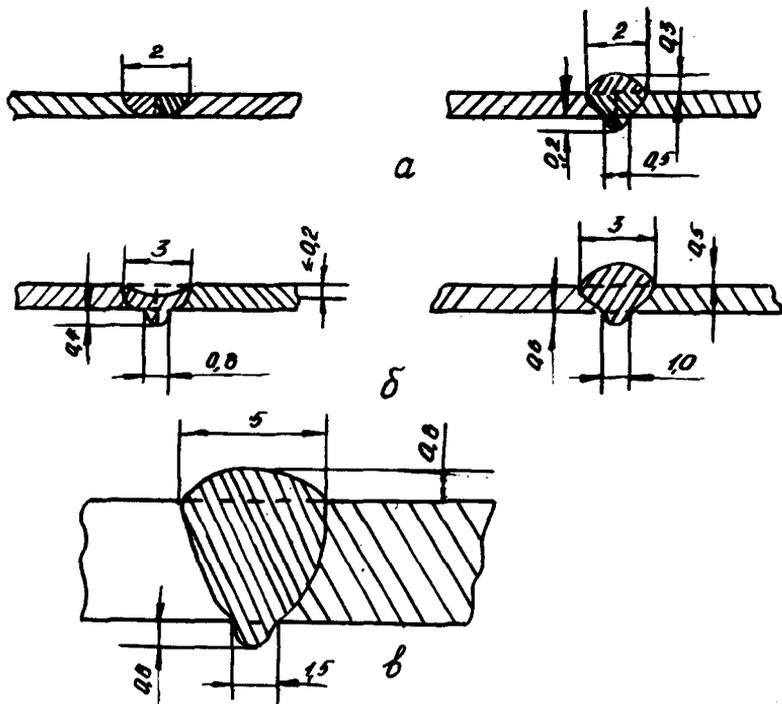
Р и с. 10. Стыковые соединения: а - одинаковой толщины; б - различной толщины; в - с отбортовкой кромок; г - с предварительным изгибом кромок

кромок до толщины меньшего элемента (рис. 10, б). Для металлов толщиной менее 0,2 мм применяется отбортовка кромок (рис. 10, в). Сварку стыковых соединений осуществляют в предназначенных зажимных приспособлениях на технологических подкладках с формирующей подкладкой или без нее, если толщина металла не превышает 0,3 мм. Качественное соединение легких металлов толщиной 0,2-0,3 мм может быть получено, если стыковку осуществлять так, как показано на рис. 10, г. Соединение таким способом способствует удалению окисных пленок из зоны сварки.

Ориентировочные размеры стыковых швов приведены на рис. 11. Основными конструктивными элементами таких швов являются общая толщина наплава, ширина провара в верхнем и нижнем основаниях, величина проплава и высота усиления.

Угловые соединения (рис. 12) в зависимости от угла расположения деталей по форме являются стыковыми и торцевыми. Широкое распространение при микроплазменной сварке получили соединения впритык с последующим разгибанием детали на необходимый угол.

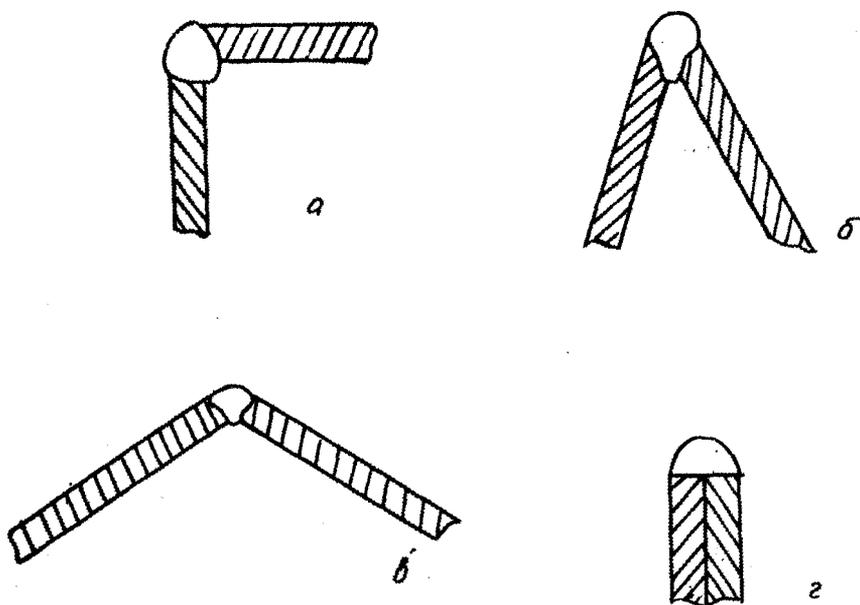
В нахлесточных соединениях предусматривают проплавление верхнего и нижнего листов на всю глубину (рис. 13, а). Как и при других способах сварки плавлением, микроплазменной сваркой можно также получать нахлесточные соединения с электросварочными и шпоночными швами, заполняемыми присадочным металлом (рис. 13, б, в). Техника сварки тавровых соединений при микроплазменном способе затруднена. Такие соединения следует заменять стыковыми, угловыми или тор-



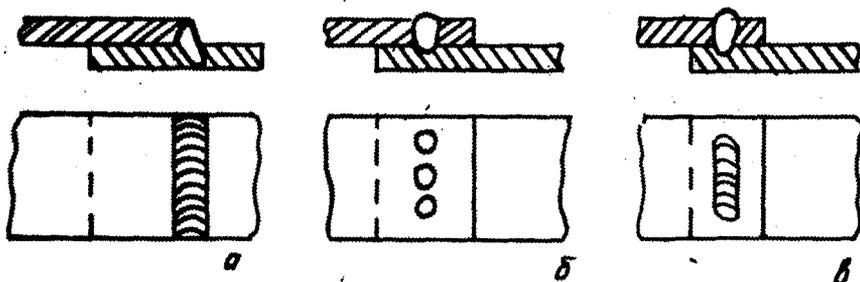
Р и с. II. Размеры стыковых швов металла толщиной:
 а - 0,3 мм; б - 0,5 мм; в - 1,5 мм

цены. Поскольку при микроплазменной сварке объем сварочной ванны небольшой, то возникают благоприятные возможности получения качественных швов, расположенных в различных пространственных положениях. Этот процесс значительно упрощается при использовании импульсного режима сварки.

Сварка углеродистых и легированных сталей. Микроплазменная сварка этих классов сталей осуществляется, как правило, на постоянном токе прямой полярности в непрерывном и импульсном режимах горения дуги, и особенности их сварки во многом одинаковы. Однако при разработке технологии конкретных изделий следует учитывать свойства



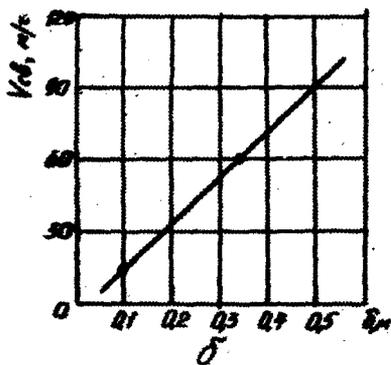
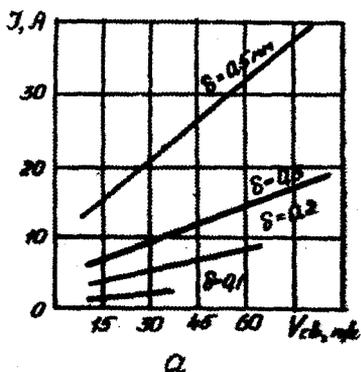
Р и с. 12. Угловые соединения с прямым (а), острым (б), тупым (в) углом и соединение впритык (г)



Р и с. 13. Наклесточные соединения с угловым (а), точечными (б), шпоночными (в) швами

стали данной марки. Так, низкоуглеродистые кипящие стали зачастую склонны к пористости из-за большого содержания водорода в защитной аргоноводородной смеси. Для предупреждения этого явления содержание водорода в защитном газе не должно превышать 3%. Нержавеющие стали аустенитного класса вследствие низкой теплопроводности и большого коэффициента линейного расширения склонны к деформациям сварных конструкций. Для борьбы с короблением конструкций микроплазменную сварку нержавеющих сталей необходимо выполнять в жесткой оснастке. Следует избегать концентрации швов на небольших участках, а сборку свариваемых элементов необходимо проводить с минимальными зазорами и пренебрежениями кромок. Выбранные режимы сварки должны обеспечивать такие условия нагрева и охлаждения металла, при которых ширина зоны термического влияния будет минимальной. В этом отношении число повторных нагревов металла необходимо ограничивать.

Для сварки металлов на постоянном токе в непрерывном режиме величину сварочного тока выбирают пропорционально толщине металла. На рис. 14, а представлены зависимости тока от скорости сварки при различной толщине металла. Для каждой толщины металла существует оптимальная скорость сварки (рис. 14, б). При превышении скорости сварки увеличивается вероятность образования подрезов. При малых же скоростях сварки увеличиваются ширина швов и величина зоны термического влияния.



Р и с. 14. Влияние толщины металла на величину сварочного тока (а) и скорость сварки (б)

Методически более сложно выбирать режимы импульсной микроплазменной сварки ввиду большого количества параметров режимов, чем при сварке стационарной дугой. В работе [10] приведена методика выбора режимов микроплазменной сварки нержавеющей стали. Амплитуда тока I_{max} подбирается из условия обеспечения полного проплавления при минимальной ширине шва. При изменении длительности импульса τ_u и паузы τ_n необходимая для данной толщины детали амплитуда тока I_{max} не зависит от абсолютного значения τ_u и τ_n и обуславливается только жесткостью $G = \frac{\tau_n}{\tau_u}$. Частота следования импульсов (т.е. длительность импульса при заданной жесткости) выбирается таким образом, чтобы перекрытие точек $P = 50\%$. Задаваясь значениями P , G и скорости сварки $V_{св}$, можно вычислить параметры импульсного режима I_{max} , τ_u , τ_n :

$$I_{max} = \frac{dJ_{ср}}{dV_{св}} V_{св} (1+G) + J_0;$$

$$\tau_u = \frac{1}{f(1+G)};$$

$$f = \frac{V_{св}}{(1-P)\ell};$$

$$\tau_u = \frac{(1-P)\ell}{V_{св}(1+G)};$$

$$\tau_n = G\tau_u;$$

где $J_{ср} = \frac{I_{max}}{1+G}$, J_0 - значение I_{max} при $V_{св} = 0$,
 f - частота импульсов тока, ℓ - ширина шва.

Данную методику можно применять при выборе режимов сварки и для других металлов малой толщины. В табл. 2 приведены ориентировочные режимы микроплазменной сварки некоторых металлов и сплавов на постоянном токе прямой полярности в непрерывном и импульсном режимах.

Сварка титана и его сплавов. Титан и его сплавы отличаются высокой химической активностью по отношению к атмосферным газам в расплавленном и твердом состоянии. Продукты их взаимодействия (окислы, нитриды и гидриды) сильно окрупчивают металл. Поэтому при

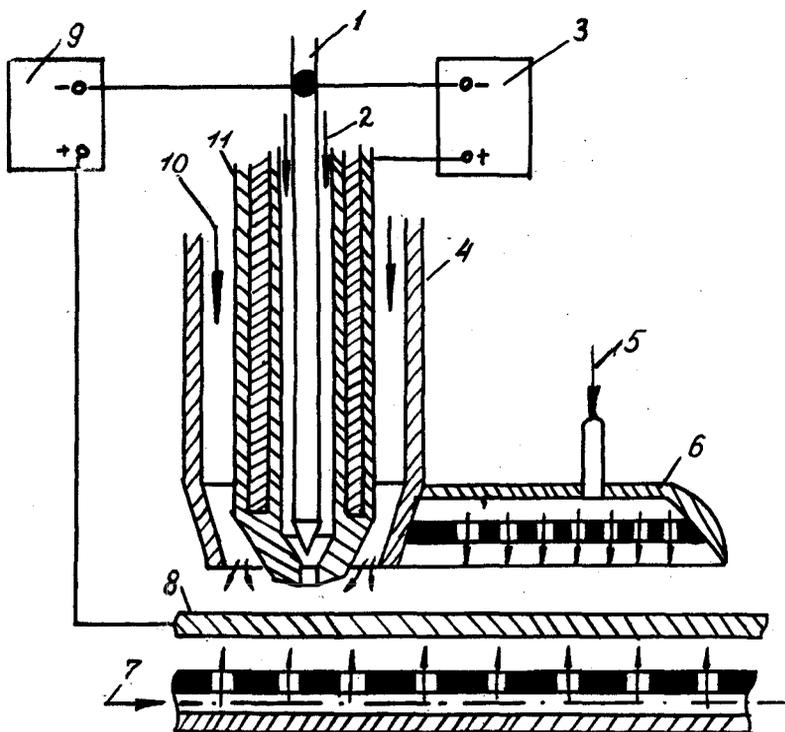
Т а б л и ц а 2

Режимы микроплазменной сварки

Свариваемый материал	Толщина, мм	Ток, А	Напряжение, В	Длительность, с		Скорость сварки, м/ч	Состав защитного газа	Расход газа, л/мин	
				импульс	пауза			плазмобразующего	защитного
Низкоуглеродистая сталь	0,1	2,0	24	Непрерывный		12	Аргон+3% водорода	0,2	5
Сталь I2X18N10	0,1	3,0	20	0,02	0,02	22	Аргон+4% водорода	0,2	5
—"	0,25	6,0	25	Непрерывный		12	Аргон + 0,5% водорода	0,3	5
Медь	0,08	10	28-30	Непрерывный		9,1	Аргон + 75% гелия	0,2	6
Никель	0,3	18	24	Непрерывный		11	Аргон + 5% водорода	0,25	6
Золото	0,35	12	22-26	Непрерывный		10	—"	0,25	6
Платина	0,2	8	23	—"		12	—"	0,2	5

сварке возникает необходимость надежной защиты от окружающей атмосферы как расплавленного металла сварочной ванны, так и околошовной зоны, а также корня и остывающего сварного шва (рис. 15). В качестве плазмобразующего газа применяют аргон, а защитного — гелий. Сварку выполняют на постоянном токе прямой полярности в непрерывном и импульсном режимах. В табл. 3 приведены режимы микроплазменной сварки стыковых соединений титана.

В обеспечении стабильного формирования швов титана и титановых сплавов важную роль играют форма и размеры соединений. При сварке толщиной более 0,3 мм отбортовка не требуется. Для толщин 0,1-0,5 мм зазоры и смещение кромок не должны превышать 0,2 S. При сварке стыковых соединений толщиной 0,1-0,3 мм необходимо соблюдать все параметры режима и, в первую очередь, амплитуду импульса тока, длительность импульса и паузы.



Р и с. 15. Схема процесса микроплазменной сварки титана: I - электрод; 2 - плазмообразующий газ; 3 - источник питания дежурной дуги; 4 - керамический наконечник; 5 - защитный газ; 6 - приспособление для защиты остаточных участков шва; 7 - защитный газ; 8 - свариваемое изделие; 9 - источник питания микроплазмы постоянного тока; 10 - защитный газ; II - водосхлаждаемое солено

Сварка алюминия и его сплавов. Основные особенности, которые следует учитывать при разработке технологии и техники микроплазменной сварки алюминия и его сплавов, заключаются в следующем. Вследствие повышенного сродства поверхность металла в исходном состоянии всегда покрыта слоем тугоплавких окислов, отрицательно

Т а б л и ц а 3

Режимы микроплазменной сварки титана

Толщина, мм	Ток, А	Длительность, с		Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин		Режим работы
		импульс	пауза		плазмообразующего	защитного	
0,08*	3	-	-	9	0,15	4	Непрерывный
0,1	5-6	-	-	20	0,15	4	"-
0,2	5-8	-	-	36-60	0,4	3-4	"-
0,2	14	0,16	0,08	13	0,2	5	Импульсный
0,3	6-10	-	-	30-60	0,4-0,5	3-4	Непрерывный
0,3	12-15	0,16	0,08	24-48	0,5-0,6	5-6	Импульсный
0,5	12-15	-	-	24-48	0,5-0,6	5-6	Непрерывный
0,5	24	0,16	0,08	13	0,4	8,5	Импульсный
1,0	25-30	-	-	6-12	0,7-0,8	8,6	Непрерывный
1,0	90-100	0,4	0,4	10-15	0,4	8-10	Импульсный

Примечание. * - соединение с отбортовкой.

влияющих на процесс сварки и качество соединений. Попадание гидратированных окислов в сварочную ванну является основной причиной образования дефектов типа окисных включений и пор. Способы очистки соединяемых кромок алюминия и его сплавов перед сваркой одинаковы для всех видов сварки и хорошо освещены в литературе [11]. Это в полной мере относится и к подготовке под сварку присадочной проволоки. В условиях высокотемпературного нагрева происходит дополнительное окисление поверхности свариваемого металла. Непременным условием для получения качественных соединений является предупреждение чрезмерного окисления металла в процессе сварки путем создания надежной газовой защиты околошовной зоны и сварочной ванны.

Для разрушения (очистки) окисных пленок непосредственно в процессе горения дуги при микроплазменной сварке применяется постоянный ток обратной полярности, переменный ток и сварка разнополярными импульсами. Так как мощность дуги постоянного тока обратной полярности значительно меньше, чем мощность дуги прямой полярности, то

этот способ целесообразно применять для толщин металла меньше 0,3 мм. При сварке на переменном токе амплитуда и длительность импульса тока обратной полярности должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить разрушение окислов, образовавшихся за время от момента обработки поверхности металла до сварки и в процессе нее.

Исследованиями [4] установлено, что с увеличением тока прямой полярности глубина h и ширина b проплавления шва непрерывно повышаются. Характерно, что при использовании гелия в качестве защитного газа значение h и b значительно больше, чем при сварке в аргоне, а ширина зоны очистки в 1,5 раза меньше. При исследовании влияния коэффициента асимметрии тока ($\kappa = \frac{I_{np}}{I_{об}}$) на процесс разрушения поверхностных окисных пленок обнаружено, что с его увеличением от 1 до 3 и более при постоянном значении I_{np} формирование шва не ухудшается, а ширина швов в и зоны очистки уменьшается для металлов толщиной 0,1–0,3 мм. При увеличении значения κ до 10 качество очистки поверхности достаточно хорошее. Увеличение скорости сварки при постоянной величине тока приводит к заметному уменьшению ширины и глубины проплавления. Изменение длины дуги от 2 до 5 мм не сказывается существенно на стабильности процесса. Режимы микроплазменной сварки алюминиевых сплавов переменным током и разнополярными импульсами приведены в табл. 4 и 5.

При микроплазменной сварке алюминия и его сплавов применяется присадочная проволока того же состава, что и свариваемый металл.

Т а б л и ц а 4

Режимы микроплазменной сварки на переменном токе

Толщина S , мм	Марка сплава	I_{np} , А	$I_{об}$, А	$U_{д}$, В	d_d , мм	$V_{св}$, м/ч	Расход газа, л/мин	
							термооб-разующего	защитного
0,3	А5	12–15	8–10	16–18	1,0	25–30	0,15–0,2	2–3
	АМг6	8–10	6–8					
0,5	А5	22–26	16–18	20–22	1,0–1,5	22–26	0,2–0,25	2–3
	АМг6	16–18	10–12					
1,0	А5	30–46	22–25	22–24	1,0–1,5	20–24	0,25–0,3	3–4
	АМг6	30–34	18–22					
1,5	А5	50–60	25–30	22–24	1,5–2,0	18–24	0,3–0,35	4–5
	АМг6	40–60	20–25					

Таблица 5

Режимы микроплазменной сварки разнополярными импульсами

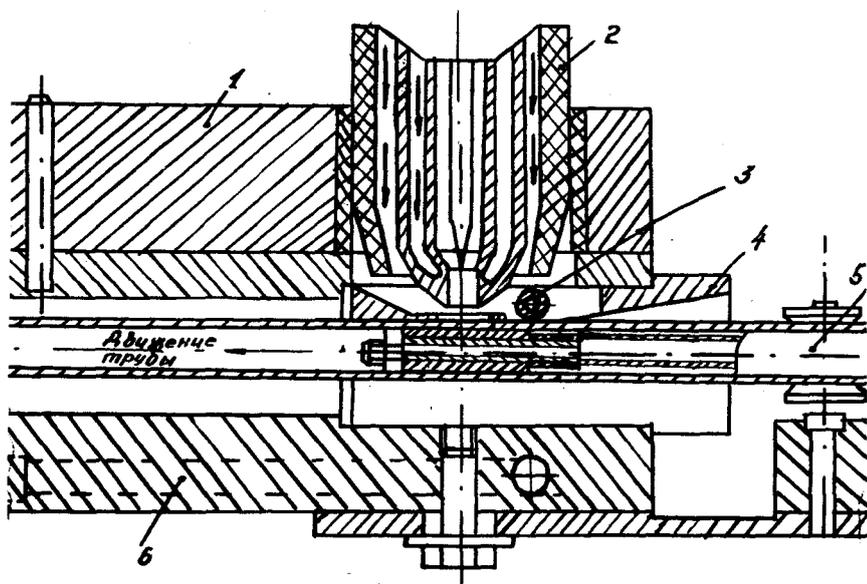
Толщина, S мм	Марка сплава	Тпр, А	Тоб, А	E ₁ пр, С	E ₁ об, С	d _г , мм	V _{св} , м/ч	Расход газа, л/мин	
								плазмообразующего	защитного
0,3	A5	10-12	8-10	0,02	0,04	1,0	25-30	0,15-0,2	2-3
0,5	A5	20-25	15-20	0,03	0,03	1,0	25-30	0,2-0,25	2-3
1,0	A5	40-50	18-20	0,04	0,04	1,0	20-25	0,25-0,3	3-4
	AMr6	35-40	16-18						
1,5	A5	70-80	25-30	0,06	0,06	1,5	20-25	0,3-0,35	3-4
	AMr6	60-70	20-25						
2,0	A5	110-130	30-40	0,08	0,08	1,5	15-20	0,35-0,4	4-5
	AMr6	90-110	30-35						

4. ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

4.1. Сварка тонкостенных труб

Тонкостенные трубы из высоколегированных нержавеющей сталей диаметром 5-10 мм и толщиной 0,15-0,5 мм широко применяют при изготовлении теплообменных аппаратов, гибких металлических рукавов, измерительных приборов и других конструкций. До освоения микроплазменной сварки тонкостенные трубы изготовляли бесшовными. Цельностынутые трубы обладают рядом недостатков и, прежде всего, высокой стоимостью. Аргонодуговая сварка такого рода изделий не обеспечивает стабильного качества соединений. Более эффективной в данном случае оказалась микроплазменная сварка [12]. Микроплазменную сварку производят на специальных установках с использованием источников питания А-1255 и МПУ-М, укомплектованных малогабаритными плазмотронами. Схема процесса микроплазменной сварки тонкостенных труб приведена на рис. 16.

В горелкодержатель 1 устанавливает электрически изолированный от него плазмотрон 2. Заготовку трубы 5 подает в фильере 4, установленной в фильеродержателе 6. Для уменьшения деформации заготовки в процессе сварки применяют предварительное деформирование кромок с



Р и с. 16. Схема процесса микроплазменной сварки тонкостенных труб

помощью ролика 3. Фильтра в данном случае выполняет функцию не только калибрующего устройства, но и является микрокамерой, заполненной аргоном под некоторым избыточным давлением. Такой прием обеспечивает высокую эффективность защиты сварного соединения при незначительных расходах защитного газа. Например, при сварке труб диаметром 8,8 мм из ленты толщиной 0,2 мм (сталь 12Х18Н10Т) расход плазмообразующего газа равен 0,2 л/мин, а защитного газа ($Ar + 5\% H_2$) — 1 л/мин. Скорость сварки составляет 70 м/ч при сварочном токе 6 А. Получаемые микроплазменной сваркой швы характеризуются высокой стабильностью размеров, не имеют провисаний, ослаблений и наплывов, характерных для аргодуговой сварки. Высокая эффективность защиты сварных соединений при сварке труб с при-

менением фильеры приближает этот процесс к условиям сварки в камере с контролируемой атмосферой.

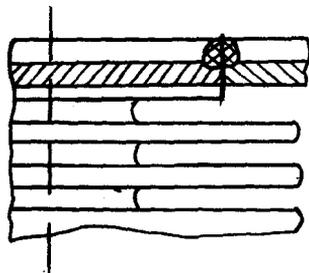
Ресурс изделий, изготовленных из сварных труб, увеличивается в 2-3 раза по сравнению с изделиями, выполненными из цельнотянутых труб и труб, изготовленных аргонодуговой сваркой. При массовом производстве особотонколистные трубы в среднем в 10 раз экономичнее цельнотянутых бесшовных труб. Дальнейшее повышение эффективности применения микроплазменной сварки тонкостенных трубок достигается за счет использования оборудования, обеспечивающего одновременную сварку несколькими дугами.

4.2. Сварка сифонных узлов

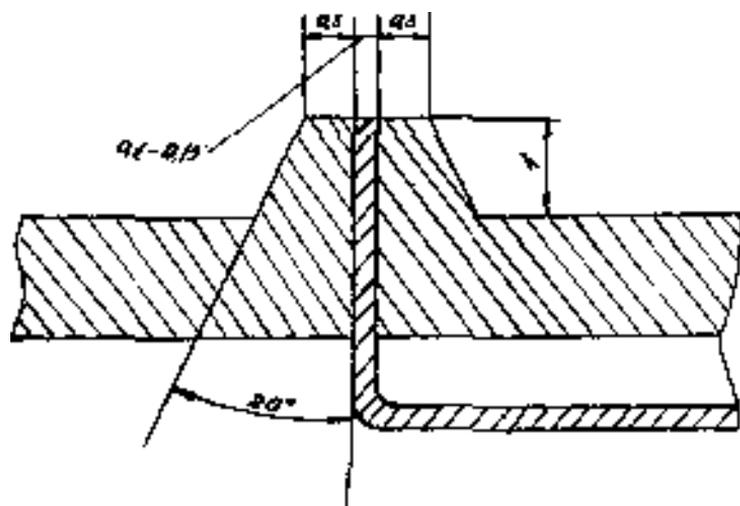
Основное техническое требование, предъявляемое к сифонным узлам, — получение прочноплотных и вакуумно-плотных сварных соединений с сохранением упругих и антикоррозионных свойств фильфона. Для обеспечения необходимой работоспособности сиффона нагрев его рабочих частей в процессе сварки не должен превышать 200°C . На рис. 17 представлен оптимальный вариант соединения сиффона с деталями арматуры. Технологические разработки реализованы на сиффонах из стали 12Х18Н10Т диаметром от 17 до 72 мм, толщиной 0,12-0,15 мм. В качестве источника используют установку МПУ-М.

Микроплазменную сварку сиффона к стенке производят при вертикальной оси вращения узла. Оптимальные размеры элементов свариваемых кромок представлены на рис. 18. Удовлетворительные показатели сварных соединений получаются при величине притупления кромки 0,3 мм, угле скола 20° и высоте бортиков не менее 1 мм.

Существенное влияние на качество сварных соединений оказывает величина зазора между телом сиффона и деталями стенки. Этот зазор не должен превышать 0,05 мм. Несоблюдение этого требования приводит к несплавлению кромок, для устранения которого требуется повышать сварочный ток и соответственно увеличи-



Р и с. 17. Соединение сиффона с деталями арматуры



Р и с. 16. Подготовка кромок под сварку шпильки с арматурой

вать объем рифленчатого металла. После этого необходимо скрепить его на месте шпилькой. Несоблюдение кромок по формуле может стать существенное препятствие. В этом случае допускается углубление шпильки на глубину не менее 0,2 мм.

При сварке шпильки угол больших диаметров (более 70 мм) необходимо предварительная привалка кромок для предотвращения возможных промерзаний кромок при нагреве шпильки шпильки. Привалку необходимо производить непосредственно перед сваркой на рабочих режимах с длиной не более 50 мм. Сварку производят на режимах: $I_{св} = 6-9$ А; $U_{св} = 25-28$ В; $V_{св} = 4-12$ м/ч. В качестве флюса используют газ аргоном, в качестве электродов — электроды для аргонодуговой сварки в этом случае погонная скорость сварки в 2 раза меньше, что благоприятно сказывается на качестве шпильки шпильки и его работоспособности в целом.

Определенные затруднения вызывает привалка шпильки в ступенчатых на-на значительной разности в толщинах соседних частей. В этом случае для устранения промерзаний шпильки необходимо использовать

электрод "командит" (рис. 19) в электродку, обеспечивая при этом защитный отвод тепла от тела электродки. Для этого электродный узел выполняется в определенном виде, так, что вся рабочая часть электродки находится внутри электродки, а стержень выступает из нее на величину около 2 мм. Возможны два варианта выполнения электродки: при горизонтально расположенной оси вращения и при ее наклоне под углом в 45° . Ось электродки во всех случаях должна быть вертикальной. В диапазоне скоростей сварки 1,5-3,0 м/ч процесс расплавления "командита" при удовлетворительном оплавлении и отсутствии порогов достигается при сварочном токе 14-20 А; $U_{\text{ср}} = 16-20$ В; $S_{\text{э}} = 2-4$ мм; расход электродного газа (аргона или аргоно-кислородной смеси) равен 0,4 л/мин; расход защитного газа (гелия или аргоно-кислородной смеси) равен 3-4 л/мин. Величина сварочного тока позволяет производить сварку под углом 45° , то величина сварочного тока может быть увеличена до 18-20 А. При этом увеличивается вероятность образования порывов.

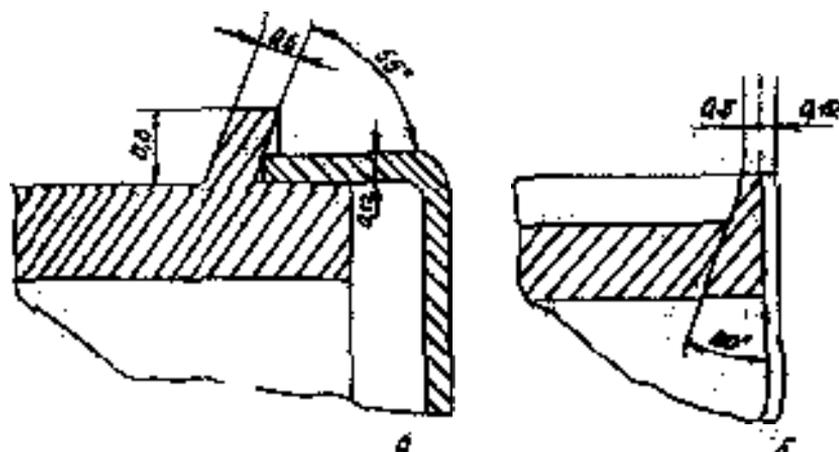


Рис. 19. Подготовка проволочной электродки с электродом (а) и флюсом (б)

Технология микроплазменной плавки электродки и флюса и ее применение одинаковы. Применение микроплазменной сварки в данном случае позволяет упростить конструкцию сопел, отказавшись от ж-

полнительных теплозащитных колец и существенно снижает тепловложение в околошовную зону.

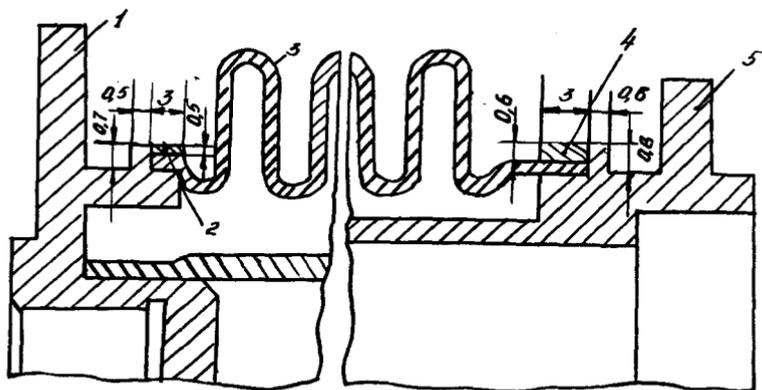
4.3. Сварка узлов электровакуумных приборов

Сварку узлов большинства электровакуумных приборов необходимо производить при пониженном давлении окружающей атмосферы, поскольку данные узлы после сварки подвергаются вакуумированию. Качество таких приборов в значительной мере зависит от постоянства давления среды внутри прибора в течение продолжительного промежутка времени. Если сварные швы насыщены газом или окислены, то в процессе эксплуатации давление внутри прибора увеличивается, что отрицательно сказывается на работоспособности изделия. Например, в вакуумных конденсаторах это приводит к снижению электрической прочности сварных соединений вплоть до выхода их из строя. Микроплазменная сварка при давлениях среды 10^{-2} — 10^{-3} мм рт.ст. обеспечивает высокое качество соединений. Чистота атмосферы, окружающей сварочную ванну, в этом случае определяется чистотой плазмообразующего газа.

Характерным примером применения микроплазменной сварки в вакууме является ее использование при изготовлении вакуумных конденсаторов. Схема соединений (рис. 20), предусматривающая сочетание наружных технологических колец с выступом и проточкой на массивном основании и втулке, обеспечивает оптимальные условия нагрева соединений деталей, обладающих резко отличающимися теплофизическими свойствами. При этом технологическое кольцо служит одновременно и присадочным материалом, способствующим получению вакуумно-плотных соединений.

При разработке технологии сварки тонкостенных конструкций во всех случаях предпочтительней использовать автоматическую микроплазменную сварку, обеспечивающую более равномерное формирование швов по сравнению с ручным способом. При этом сборочно-сварочные установки для механизированной микроплазменной сварки целесообразно создавать на базе унифицированных узлов.

Вышеприведенными примерами далеко не ограничиваются основные области применения микроплазменной сварки. Имеются широкие возмож-



Р и с. 20. Схема соединения при изготовлении вакуумных конденсаторов: 1 — основание, медь МБ; 2 — технологическое кольцо, медь МБ; 3 — сильфон, сталь 12Х18Н10Т; 4 — технологическое кольцо, бронза КМцЗ-1; 5 — втулка; бронза КМцЗ-1

ности дальнейшего увеличения объемов использования микроплазменной технологии, повышения ее эффективности и расширения областей применения в различных отраслях народного хозяйства.

Библиографический список

1. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
2. Гвоздецкий В.С. О функциях распределения плотности тока в анодном пятне дуги //Автомат. сварка, 1973. № 12. С. 20-24.
3. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. /Под ред. Н.А.Сельванского. М.: Машиностроение, 1978. Т. I. 504 с.
4. Микроплазменная сварка /Под ред. Б.Е.Патсона. Киев: Машиностроение, 1979. 248 с.
5. Шнайдер Б.И., Почребиский Д.М. Технология микроплазменной сварки на постоянном токе //Автомат. сварка, 1973. № 4. С. 47-51.
6. Гвоздецкий В.С. К теории катодных процессов в электрической дуге //Автомат. сварка, 1969. № 1. С. 33-37; № 6. С. 1-4.

7. Гвоздецкий В.С. Импульсная микроплазменная сварка на постоянном и переменном токе //Автомат. сварка, 1975. № 2. С. 39-42.
8. Преображенский В.И., Зимин Е.Н. Силовые кремневые вентили. М.: Энергия, 1971. 80 с.
9. Коммутаторы тока для микроплазменной сварки /Д.А.Лудко и др. //Автомат. сварка, 1972. № 3. С. 59-61.
10. Выбор режимов микроплазменной сварки /В.С.Гвоздецкий и др. //Автомат. сварка, 1973. № 7. С. 48-50.
11. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 264 с.
12. Сварка ободонкостенных труб /Д.А.Лудко и др. М.: Машиностроение, 1977. 128 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
I. Физическая сущность микроплазменной сварки	5
I.1. Образование плазмы в сварочной дуге	5
I.2. Формирование сжатой дуги	7
I.3. Характеристики плазменных струй	II
2. Способы микроплазменной сварки	14
2.1. Сварка на постоянном токе	14
2.2. Сварка на переменном токе	16
3. Оборудование и технология микроплазменной сварки	19
3.1. Аппараты для сварки	19
3.2. Особенности технологии и техники сварки ..	23
4. Применение микроплазменной сварки	33
4.1. Сварка тонкостенных труб	33
4.2. Сварка сильфонных узлов	35
4.3. Сварка узлов электровакуумных приборов ...	38
Библиографический список	39

Г р и ш и н Иван Сергеевич

**МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА
ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Редактор **Т.И.Кузнецова**
Техн.редактор **Н.М.Каленик**
Корректор **Н.С.Куприянова**

Свод. тем. пл. № 34

Подписано в печать 19.03.91.

Формат 60x84^I/16. Бумага оберточная белая.

Печать оперативная, Усл.печ.л. 2,55. Усл.кр.-отт. 2,7.

Уч.-изд.л. 2,4. Тираж 500 экз. Заказ № 1514. Цена 20

**Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева.
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.**

**Типография им. В.П.Мяги Самарского полиграфического
объединения. 443099 г. Самара, ул. Венцека, 60.**