

УДК 621.791:669.71

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ\*

А.А. ГРИНЮК<sup>2,3</sup>, В.Н. КОРЖИК<sup>1,2</sup>, В.Е. ШЕВЧЕНКО<sup>1,2</sup>, А.А. БАБИЧ<sup>2</sup>,  
С.И. ПЕЛЕШЕНКО<sup>4</sup>, В.Г. ЧАЙКА<sup>2</sup>, А.Ф. ТИЩЕНКО<sup>2</sup>, Г.В. КОВБАСЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Китайско-украинский ин-т сварки им. Е.О. Патона (Гуандунский Генеральный Институт промышленных технологий)  
(Гуанчжоуский научно-исследовательский институт цветных металлов, КНР)

<sup>2</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, ул. Дашавская, 6/2. E-mail: andrey\_grinyuk@ukr.net

<sup>4</sup>Южно-Китайский технолог. ун-т, КНР, Гуанчжоу, 510641. E-mail: sviatoslav@qq.com

Выполнен анализ литературы, описывающей характерные технологии сварки алюминиевых сплавов дугой, сжатой скоростным потоком инертного газа. Показано, что плазменно-дуговая сварка является дальнейшим развитием процесса сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в инертных газах. Установлено, что в процессе развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов происходил переход от переменного синусоидального тока к постоянному току при обратной полярности, а в дальнейшем и к разнополярному асимметричному току с прямоугольной формой волны тока. Более перспективным направлением совершенствования оборудования для плазменно-дуговой сварки является переход от специализированных источников питания к модульному построению сварочной установки плазменно-дуговой сварки на основе источников питания, применяющихся для сварки неплавящимся электродом, и плазменных модулей. Дальнейший путь усовершенствования процессов плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов — это комбинированное или гибридное использование нескольких источников нагрева, включая сжатую дугу и дугу плавящегося электрода. Наиболее перспективным по мнению авторов является гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом с полным анодом и аксиальной подачей проволоки. Библиогр. 41, рис. 17.

*Ключевые слова:* плазменно-дуговая сварка, алюминиевые сплавы, переменный синусоидальный ток, разнополярный асимметричный ток, гибридная плазменно-дуговая сварка, плавящийся электрод

Алюминий и алюминиевые сплавы по производству и потреблению занимают второе место после стали. Благодаря комплексу физико-механических, коррозионных и технологических свойств легкие сплавы на основе алюминия успешно применяются не только при создании летательных аппаратов, но и в других отраслях промышленности и в строительстве. Значительны объемы применения алюминиевых сплавов в изделиях военной техники, в судостроении, в производстве автомобильного и железнодорожного транспорта, в электротехнике, при изготовлении криогенной и химической аппаратуры, в сельскохозяйственной и пищевой промышленности. Наряду с многообразием различных способов сварки для получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов более широко применяются дуговые способы сварки, которые можно разделить на сварку неплавящимся и плавящимся электродами. При изготовлении конструкций из полуфабрикатов алюминиевых сплавов толщиной 2...12 мм преимущественно используют сварку неплавящимся электродом. В свою очередь сварку неплавящимся

электродом выполняют свободно расширяющейся и сжатой дугой.

Первые упоминания о применении энергии плазменной струи для обработки металлов относятся к 1950-х годам [1]. В настоящее время плазменную струю используют для сварки, резки, нанесения покрытий, поверхностной закалки и др. Для обработки металлов применяют сжатую дугу прямого и косвенного действия. При использовании дуги прямого действия электрический разряд горит между электродом и изделием, а в случае косвенной дуги разряд горит между электродом и плазмообразующим соплом. В этом случае на обрабатываемую деталь воздействует только струя плазмы, выдуваемая через сопло малого диаметра потоком инертного газа.

Сварка плавлением с нагревом сжатой плазменной дугой является дальнейшим развитием способа сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов [2]. В конструкцию горелки дополнительно введено еще одно внутреннее медное водоохлаждаемое сопло. Газ, выдувающийся через отверстие малого диаметра (от 1 до 5 мм)

\* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках программы иностранных экспертов в КНР № WQ20124400119, проекта R&D инновационной группы провинции Гуандун (КНР) № 201101C0104901263 и международного проекта Министерства науки и техники КНР № 2013DFR70160.

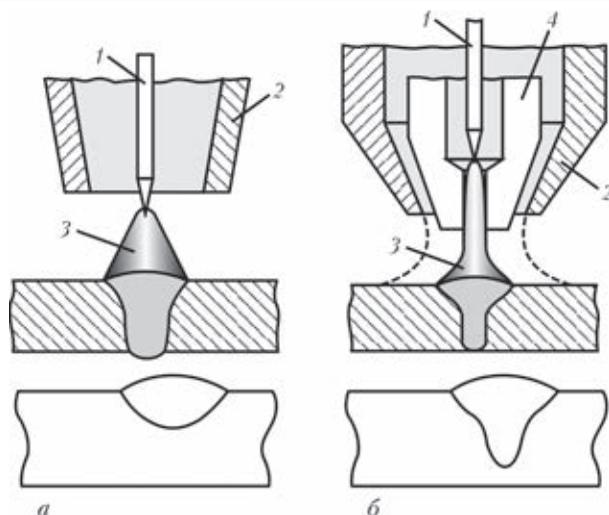


Рис. 1. Схема процесса и форма проплавления сварного шва при дуговой (а) и плазменно-дуговой (б) сварке неплавящимся электродом: 1 — вольфрамовый электрод; 2 — сопло защитного газа; 3 — сварочная дуга; 4 — плазмообразующее сопло

внутреннего сопла, образует вокруг дуги слой тепловой и электрической изоляции, препятствующий ее свободному расширению. Зона сварки защищается потоком инертного газа из внешнего сопла большего диаметра (рис. 1). При этом повышается температура столба дуги и ее напряжение [2].

В целом, анализ опыта применения плазменной дуги для сварки показал, что она является более универсальным источником нагрева металла при сварке по сравнению с электрической дугой при сварке неплавящимся и плавящимся электродом. По сравнению с этими методами плазма обеспечивает более глубокое проплавление металла при одновременном уменьшении объема его расплавления, а также имеет следующие достоинства:

более высокая температура плазменной дуги (до 18000...25000 К);

меньший диаметр дуги;

цилиндрическая форма дуги (в отличие от обычной конической);

давление плазменной дуги на металл в 6...10 раз выше, чем у обычной;

возможность поддерживать дугу на малых токах (0,2...30 А).

Применение плазменной дуги при сварке также обеспечивает отсутствие разбрызгивания металла при сварке, меньший разогрев основного металла и как следствие меньшую его деформацию, отсутствие необходимости во многих случаях подготовки (разделки) за счёт высокой проплавляющей способности плазменной дуги, повышенную экономичность и производительность (в 2...3 раза и более), снижение затрат на механическую обработку при подготовке стыков

под сварку и обработку швов после сварки в 3...5 раз и более, снижение расхода сварочных материалов в 3...5 раз и более, повышение качества сварных швов и обеспечение возможности 100%-й автоматизации процессов сварки продольных и кольцевых швов.

Согласно ГОСТ 2601-84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий» сварка плавлением, при которой нагрев производится сжатой потоком газа дугой, называется плазменной сваркой. По нашему мнению такое определение больше подходит к процессу сварки сжатой дугой косвенного действия, которую, как правило, не используют для сварки. Поэтому более правильно применять термин «плазменно-дуговая сварка», который оговаривает участие в нагреве детали как энергии дуги, так и энергии плазменной струи.

**Плазменно-дуговая сварка переменным синусоидальным током.** Особенностью дуговой сварки алюминиевых сплавов является необходимость разрушения поверхностной тугоплавкой оксидной пленки. Для эффективного ее разрушения плазменно-дуговую сварку необходимо выполнять на постоянном токе при обратной полярности или на разнополярном токе [3].

Как и в случае со сваркой неплавящимся электродом свободно-расширяющейся дугой, первые опыты плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов проводили с использованием переменного синусоидального тока частотой 50 Гц. В конце 1960-х годов в ИЭС им. Е.О. Патона интенсивно проводились исследования этого процесса [4, 5]. Для обеспечения горения сжатой дуги к обычной установке для сварки алюминия неплавящимся электродом добавляли блок дежурной дуги, которая горела между электродом и плазмообразующим соплом, ионизируя промежуток между электродом и изделием. При использовании переменного синусоидального тока разрушение оксидной пленки происходит в полупериод обратной полярности, когда на электроде плюс. При этом до 70 % тепла дуги выделяется на электроде. В 1970-1971 гг. способ плазменно-дуговой сварки на переменном синусоидальном токе применялся в судостроении. Так, для его реализации предлагался перспективный автомат для сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом «Алюминий-1» и источник питания УДГ-701 [6]. В дальнейшем этот способ сварки не получил широкого распространения. В литературе отсутствует информация о серийных установках плазменно-дуговой сварки на переменном синусоидальном токе.

**Плазменно-дуговая сварка на постоянном токе при обратной полярности.** Впервые плазменно-дуговую сварку на обратной полярности

для соединения листов алюминиевого сплава толщиной 6,35 мм применили сотрудники корпорации «Thermal Dynamics Corp» [7]. Первые работы в Советском Союзе по применению постоянного тока при обратной полярности относятся к началу 1970-х годов [8, 9]. Наилучшее катодное разрушение плены (катодная очистка) при сварке неплавящимся электродом достигается при обратной полярности. В качестве анода выступает электродный узел плазматрона, а катодом служит само изделие. Плазменно-дуговую сварку на постоянном токе при обратной полярности легче реализовать по сравнению со сваркой переменным синусоидальным током. Так, например, можно использовать в качестве источника питания сжатой дуги обычные сварочные выпрямители. Тем не менее этому способу плазменно-дуговой сварки присущ существенный недостаток – при сварке на обратной полярности на электродном узле плазматрона выделяется значительное количество тепла, что приводит к преждевременному разрушению электрода. Для повышения ресурса работы электродного узла осуществляют его интенсивное охлаждение, используют вольфрамовые прутки большого (8...10 мм) диаметра или специальные медные электроды со вставками из тугоплавких материалов (вольфрам, гафний). Для продления срока службы детали плазматрона делают массивными, что увеличивает его габариты. Стабильность горения сжатой дуги постоянного тока при обратной полярности зависит от степени подготовки поверхности деталей под сварку. Наличие неудаленных оксидных плен на поверхности свариваемых изделий может вызвать блуждание пятна нагрева из-за различной эмиссионной способности оксидной пленки и очищенного основного металла [8, 9]. На малых токах это блуждание усиливается. Способ широко применялся для изготовления изделий криогенного назначения из алюминиевых сплавов [10]. В СССР для плазменно-дуговой сварки на постоянном токе обратной полярности выпускались установки УПС-301 и УПС-503, также сварку можно было осуществлять с помощью установки для наплавки УПНС-304. Исследования этой разновидности плазменно-дуговой сварки алюминия интенсивно продолжаются в России. Так, в ОАО «Центр судостроения и судоремонта» разработан полуавтомат ППН-200 для плазменно-дуговой сварки алюминия на постоянном токе при обратной полярности. В качестве источника питания используют аппарат для сварки неплавящимся электродом Master-2500 фирмы «Kemppi» [11]. В группе компаний ОАО «Плазмек» разработан универсальный пост плазменно-дуговой сварки, включающий инверторный источник питания, блок

генерирования дежурной дуги и подачи плазмообразующего газа, блок автономного водяного охлаждения и плазматроны собственной разработки. Список фирм, выпускающих оборудование для плазменно-дуговой сварки постоянным током, обширен — в нем могут быть представлены фирмы из Северной и Южной Америк, Европы и Азии. Так, можно отметить такие модели оборудования: DigiPLUS A7P и DigiPLUS A7PO фирмы «IMC Engenharia de Soldagem» (Бразилия), Ultima150 фирмы «Thermal Arc» (США), PI400 Plasma фирмы «Svejsmaskinefabrikken Migatronik A/S» (Дания), Plasmaweld 402 фирмы «L-TEC Schweißtechnik GmbH» (Германия), PSI 350plus фирмы «Kjellberg Finsterwalde Schweißtechnik und Verschleißschutzsysteme GmbH» (Германия), Tetrax 552 RC Plasma CW фирмы «EWM HIGHTEC WELDING AUTOMATION GmbH» (Германия), PW400 фирмы «ARCRAFT PLASMA EQUIPMENT (INDIA) PVT. LTD» (Индия), Plasma 500XP фирмы «Powwel Co LTD» (Корея) и другие.

С целью повышения эффективности процесса плазменно-дуговой сварки на постоянном токе при обратной полярности российскими учеными была предложена импульсная подача плазмообразующих газов [12–14].

Одним из негативных нюансов применения постоянного тока при обратной полярности для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является большая склонность данного процесса сварки к образованию водородной газовой пористости в металле шва [15].

Одной из разновидностей плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов на постоянном токе является процесс сварки Plasmatron, предложенный австрийской фирмой «Inocon Technologie



Рис. 2. Внешний вид сварочной горелки Plasmatron (фирма «Inocon Technologie GmbH») [16]

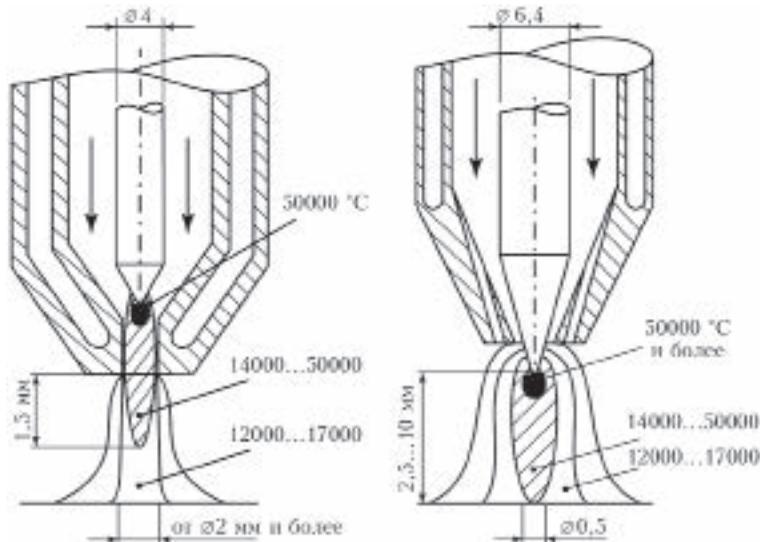


Рис. 3. Распределение температуры в традиционной горелке для плазменно-дуговой сварки (а) и сварочной горелки Plasmaatron фирмы «Inoson Technologie GmbH», Австрия (б) [16] (для а — поверхностная плотность теплового потока  $10^3 \dots 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>; для б —  $10^6$ )

GmbH» [16]. Особенностью процесса сварки является оригинальная форма сварочной горелки (рис. 2). По словам сотрудников компании «Inoson Technologie GmbH» такая схема процесса сварки позволяет повысить температуру в активном пятне нагрева (рис. 3) и осуществлять сварку без дополнительного блока генерации тока дежурной дуги.

**Плазменно-дуговая сварка алюминиевых сплавов с чередованием полярностей на электроде и плазмообразующем сопле.** Чтобы уменьшить вредное воздействие тепла, выделяемого на электроде при прохождении тока в полупериод

обратной полярности, и сохранить достаточную катодную очистку шва сотрудниками ИЭС им. Е.О. Патона был предложен оригинальный способ подачи напряжения на плазматрон [17]. В полупериод прямой полярности дуга горела между вольфрамовым электродом и изделием, а в полупериод обратной полярности дуга возбуждалась между изделием и медным плазмообразующим соплом [17]. Благодаря такой схеме подачи энергии на плазматрон достигалось хорошее проплавление, повышалась стойкость вольфрамового электрода, а дуга, горящая в полупериод обратной полярности, обеспечивала эффективное разрушение оксидных плен. Однако это оборудование для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов не было реализовано в серийном производстве. В наше время к идее раздельной подачи энергии на электрод и плазмообразующее сопло вернулись немецкие ученые. Их установка для плазменно-дуговой сварки с чередованием полярностей на электроде и плазмообразующем сопле также пока остается на стадии лабораторных исследований.

**Плазменно-дуговая сварка разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока.** Процесс плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока под названием Variable Polarity Plasma Arc Welding (VPPA) был зарегистрирован фирмой «Hobart Brothers Inc» в

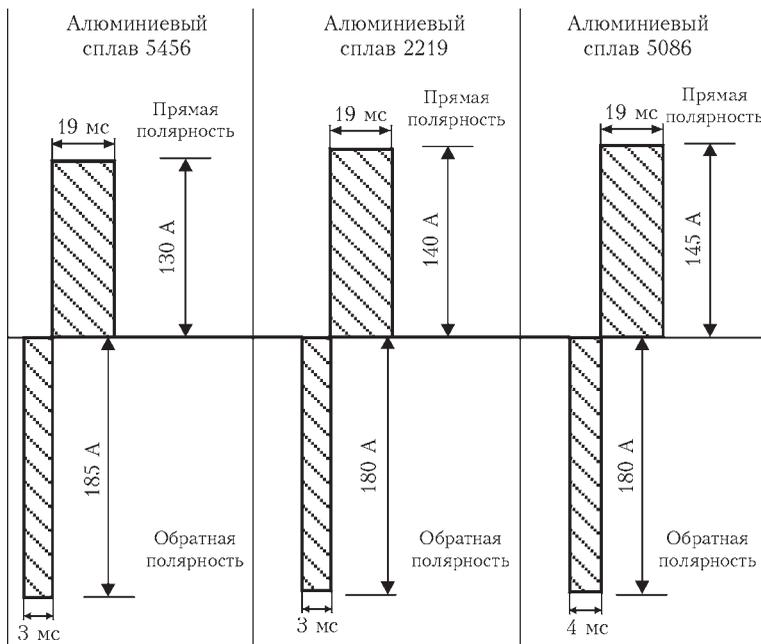


Рис. 4. Амплитуда и длительность протекания тока при прямой и обратной полярности для процесса VPPA при сварке алюминиевых сплавов разного химического состава [18]

1978 г. [18]. В конструкции сварочных установок, генерирующих синусоидальный сварочный ток, для обеспечения поддержания горения дуги был предусмотрен специальный блок, который формировал дополнительный импульс при переходе от прямой к обратной полярности. Прямоугольная форма волны сварочного тока позволила обеспечить надежное возбуждение дуги при смене полярностей без применения специального блока. С целью снижения тепловой нагрузки на электродный узел горелки плазменно-дуговую сварку разнополярным током с прямоугольной формой волны тока выполняли с преобладанием протекания тока при прямой полярности. При этом длительность прохождения тока при об-

ратной полярности выбирают минимально допустимой для обеспечения эффективного катодного разрушения оксидных плен. Соотношение между длительностями прохождения тока при прямой и обратной полярностях составляло примерно 3:1. При этом амплитуда тока при обратной полярности была на 30...40 А выше, чем при прямой полярности (рис. 4) [19]. Снижение количества тепла, выделяемого на электродном узле, позволило повысить работоспособность плазмотрона и уменьшить его геометрические размеры.

В 1972 г. фирма «Sciaky» предложила компании «Boing» использовать для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярный асимметричный ток с прямоугольной формой волны тока [20]. Однако источник питания фирмы «Sciaky» не обеспечивал стабильность горения дуги при разнополярном асимметричном токе. В 1974 г. фирма «Hobart Brothers Inc» приступила к разработке источника питания и комплекса оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока для компании «Boing». В 1979 г. первый аналогичный комплекс оборудования для плазменно-дуговой сварки был поставлен в Marshall Space Flight Center. Основой комплекса был источник питания VP-300-S, текущие значения сварочного тока контролировались при помощи Cyber-Tig 11 Series 800 Programmer. Данный комплекс оборудования и его последующие аналоги широко применялись для изготовления топливных баков для жидкого водорода и кислорода космической системы Space Shuttle [21–23]. В 1990-х годах фирма «Hobart Brothers Inc» прекращает выпуск оборудования для процесса плазменно-дуговой сварки разнополярным током VPPA. В то же время потребности американской космической промышленности в области плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током удовлетворяются продукцией канадской фирмы «Liburdi» (источник питания LTP400-VP) (рис. 5) и американской компании АМЕТ (источник питания VPC450). Большая стоимость оборудования и сложность в эксплуатации не способствовали широкому распространению этого способа сварки в промышленности.

Наиболее эффективно способ плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током VPPA применялся для формирования сварных соединений на весу без применения подкладных элементов с формирующими канавками. Такой процесс получил название «keyhole» (замочная скважина) (рис. 6). При этом процессе плазменная струя насквозь проникает через расплавленный металл сварочной ванны, образуя сквозной канал, который существует в течение всей сварки. Сквоз-



Рис. 5. Внешний вид источника питания LTP 400–VP (фирма «Liburdi») для плазменно-дуговой сварки по процессу VPPA [18]

ное проникновение плазменной струи полностью устраняет включения оксидной пленки в шве, а также уменьшает деформацию изделия из-за выравнивания нагрева свариваемых деталей по высоте. В качестве плазмообразующего газа использовался 100%-й аргон, а в качестве защитного газа – 100%-й гелий.

Более активное использование в промышленности плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током началось с 2000-х годов. Так, в Европе ряд фирм, таких как «Merkle» (Германия), «EWM» (Герма-

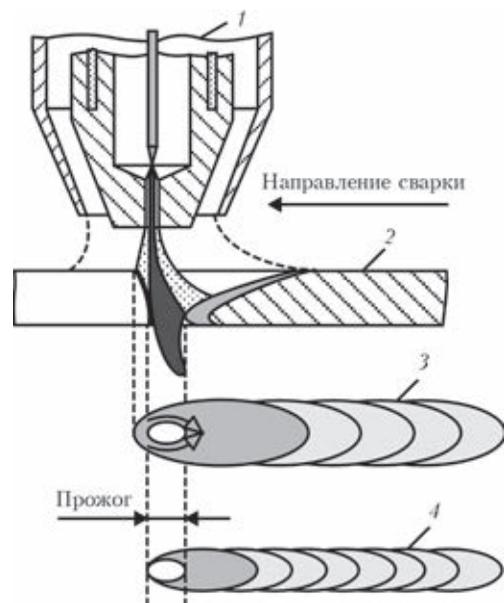


Рис. 6. Принципиальная схема процесса плазменно-дуговой сварки в режиме «замочная скважина» (схема ISF Aachen) [22]: 1 — плазменная горелка; 2 — шов; 3 — поверхность шва; 4 — корень шва)

ния), «Castolin» (Швейцария), «SBI» (Австрия), «Migatronic Automation» (Дания) приступили к серийному выпуску оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока. Некоторые из этих установок — Tetrax 350 AC/DC Plasma (EWM) и PMI-380 AC/DC (SBI) можно использовать как для автоматической, так и для ручной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов.

В начале 1990-х годов в Институте электросварки им. Е.О. Патона проводились исследования плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока на тиристорных источниках питания с индуктивными накопителями. Результаты исследований показали, что для качественного формирования шва достаточно только временной асимметрии, т. е. преобладания длительности протекания тока при прямой полярности и равенства амплитуд токов при прямой и обратной полярностях [24, 25].

В 2001 г. по техническому заданию ИЭС им. Е.О. Патона фирма «Fronius» (Австрия) разработала комплекс оборудования для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным

асимметричным током с прямоугольной формой волны. В состав комплекса входят источник питания MW450, плазменный модуль FPM, механизм подачи присадочной проволоки KD 4000, система перемещения плазмотрона, система управления процессом сварки FPA 2003-Plasma, блок автономного водяного охлаждения (рис. 7). При помощи этого комплекса оборудования в ИЭС им. Е.О. Патона была разработана технология плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током алюминиево-литиевых сплавов [26, 27].

В отличие от оборудования для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов других фирм установка для плазменно-дуговой сварки фирмы «Fronius» выполнена по схеме «источник питания + плазменный модуль». Такое конструктивное решение позволяет выбирать для решения поставленных задач источник питания с необходимой мощностью. Если в процессе работы используется сварочный ток не более 150 А, то имеется возможность использовать в составе установки для плазменно-дуговой сварки источники питания с номинальной мощностью до 220 А. В качестве источников питания для плазменно-дуговой сварки могут использоваться все серийные источники питания фирмы «Fronius» для аргодуговой сварки неплавящимся электродом разнополярным асимметричным током (источники питания серии MW).

Применение системы управления процессом сварки FPA 2003-Plasma позволяет значительно расширить возможности плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током. Так, возможность импульсной подачи плазмообразующего газа позволяет эффективно бороться с пористостью при сварке алюминиевых сплавов, а модуляция сварочного тока и подача присадочной проволоки с переменной скоростью обеспечивает качественное формирование швов при орбитальной сварке неповоротных стыков. Исследования, проведенные в ИЭС им. Е.О. Патона, подтвердили, что более точная регулировка параметров плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током при помощи системы управления процессом сварки FPA 2003-Plasma позволяет использовать этот способ сварки для получения неразъемных соединений из тонких (1,0...2,0 мм) алюминиевых полуфабрика-



Рис. 7. Оборудование фирмы «Fronius» для плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током

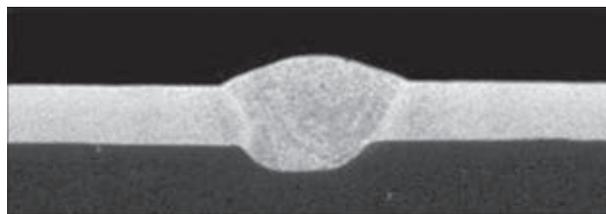


Рис. 8. Макрошлиф сварного соединения из сплава Д16 толщиной 2 мм, сваренного плазменно-дуговой сваркой в нижнем положении

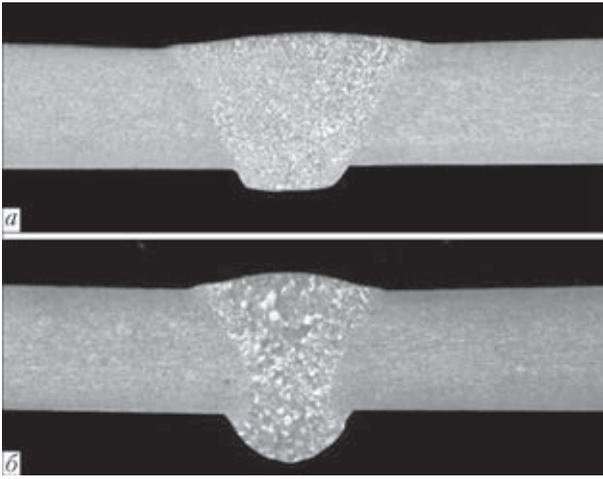


Рис. 9. Макрошлиф сварного соединения из сплава 1420 (Al-Li-Mg) толщиной 6 мм, сваренного плазменно-дуговой сваркой в нижнем положении на подкладке с формирующей канавкой (а) и в режиме сквозного проплавления плазменной струи «keyhole» (б)

тов (рис. 8), а также для выполнения сварки в режиме сквозного проникновения плазменной струи (рис. 9) [27].

Наличие в ассортименте оборудования машинных и ручных плазмотронов, а также переключение работы плазменного модуля позволяют одинаково хорошо использовать оборудование фирмы «Fronius» как для автоматической, так и для ручной плазменной сварки.

В настоящее время плазменный модуль FPM уже снят с производства, новый плазменный модуль PlasmaModule 10 с цифровым управлением, к сожалению, не обеспечивает плазменно-дуговую сварку разнополярным асимметричным током.

В последние годы существует ряд подходов к созданию оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током алюминиевых сплавов, а именно – создание специализированных установок для плазменно-дуговой сварки и создание плазменных модулей (консолей) для подключения к серийным источникам питания для сварки неплавящимся вольфрамовым электродом. По нашему мнению, применение дополнительных плазменных модулей для создания установки для плазменно-дуговой сварки на базе источников питания для сварки неплавящимся электродом позволит снизить затраты на создание сварочного поста по сварке сжатой дугой, повысить универсальность применения комплекса оборудования, варьировать значения необходимой мощности источников питания для сварки, более полно реализовать технологические возможности современных источников питания для сварки неплавящимся вольфрамовым электродом.

**Лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов.** Лазерный луч, будучи электрически ней-

тральным, хорошо может сочетаться со сварочной дугой плавящегося и неплавящегося электродов при горении в общую ванну. Лазерный луч одинаково хорошо сочетается в гибридных сварочных процессах со сжатой дугой неплавящегося электрода, горячей как на постоянном токе при обратной полярности, так и на разнополярном асимметричном токе. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов позволяет сократить ширину шва, увеличить глубину проплавления и скорость сварки по сравнению с обычной плазменно-дуговой сваркой [28, 29].

**Плазменно-дуговая сварка с использованием порошка в качестве присадочного материала.** При плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов как постоянным, так и разнополярным током традиционно использовали в качестве присадочного материала проволоку из алюминиевых сплавов. Учеными немецких университетов городов Хемниц и Ильменау было предложено использовать при плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов в качестве присадочного материала алюминиевый порошок [30]. Применение алюминиевого порошка при плазменно-дуговой сварке имеет ряд преимуществ, а именно — исключаются помехи от направляющих присадочной проволоки при перемещении «рук» роботов, появляется возможность в широком диапазоне выбирать химический состав присадочного материала, возможность быстрой смены направления сварки без разворота плазмотрона с закрепленной системой подачи проволоки. Основным недостатком использования алюминиевого порошка в качестве присадочного материала является большая поверхность, покрытая оксидной пленой по сравнению с присадочной проволокой. Наличие разветвленной поверхности, покрытой оксидной пленой, ограничивало применение данного способа сварки для соединения деталей толщиной менее 2 мм. При малых значениях сварочного тока оксидная пленка эффективно не разрушается в дуге. В данный момент ведутся исследования по возможности повышения мощности дуги за счет применения гелийсодержащих смесей [31].

**Двухсторонняя плазменно-дуговая сварка и сварка неплавящимся электродом.** Американскими учеными было предложено совместное использование для сварки алюминиевых сплавов плазмотрона и горелки неплавящегося электрода (рис. 10). По такой схеме подключения вместо кабеля массы к изделию подводят горелку неплавящегося электрода [32]. На изделие одновременно с разных сторон воздействует сжатая дуга неплавящегося электрода и свободно расширяющаяся дуга неплавящегося электрода, питающихся от

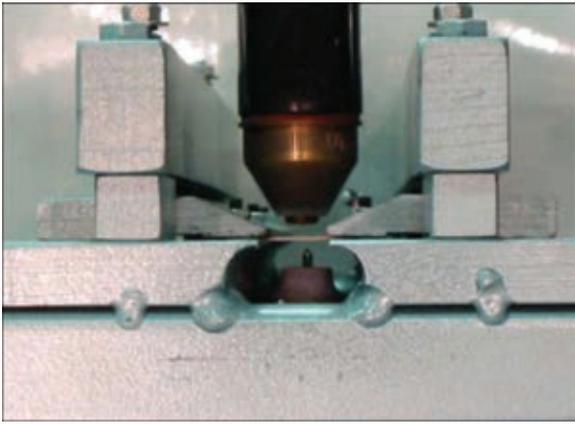


Рис. 10. Двухсторонняя плазменно–дуговая сварка и сварка неплавящимся электродом [32]

одного источника питания. Такое совместное горение дуг увеличивает напряжение обоих дуг, увеличивает глубину проплавления, а также повышает стабильность существования сквозного канала при сварке в режиме сквозного проплавления плазменной дуги [33].

**Комбинированное использование плазменно-дуговой сварки и сварки плавящимся электродом.** Современное развитие производства алюминиевых конструкций, в частности, для протяженных конструкций транспортов наземного и морского базирования, выдвигают требования повышения скорости сварки. Одним из способов решения такой задачи может быть комбинированное использование нескольких способов сварки, например, плазменно-дуговой сварки и сварки плавящимся электродом. Так, в 2002–2005 гг. в ИЭС им. Е.О. Патона была разработана технология комбинированного использования плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током без присадочного материала и аргонодуговой сварки плавящимся электродом (рис. 11). Между двумя источниками нагрева расстояние составляло 65 мм, общая сварочная ванна отсутствовала. Сжатая плазменная дуга неплавящегося электрода выполняла нагрев изделия и частичное удаление водорода из расплавляемого металла. Формирование выпуклости сварного шва осуществляется за счет плавления электродной проволоки. Комбинированное применение плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током и аргонодуговой сварки плавящимся электродом при достижении одинаковой глубины проплавления с обычной аргонодуговой сваркой плавящимся электродом позволяет уменьшить ширину шва и зону разупрочнения основного металла при сварке, а также величину этого разупрочнения (рис. 12).

**Гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом.** Одним из перспективных направлений развития процессов плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является ис-



Рис. 11. Размещение плазмотрона и горелки плавящегося электрода при комбинированном использовании плазменно-дуговой сварки и дуговой сварки плавящимся электродом

пользование для формирования сварочной ванны одновременного горения в общую ванну нескольких источников нагрева, таких как сжатая дуга неплавящегося электрода и дуга плавящегося электрода (рис. 13). Этот процесс за рубежом получил название Plasma-MIG. Упоминание о данном процессе относится к 1970-м годам, а первый патент на этот способ сварки принадлежит фирме «Philips Corporatins» [34]. Дуга плавящегося электрода горит внутри сжатой дуги неплавящегося электрода. На данный момент существуют две ос-

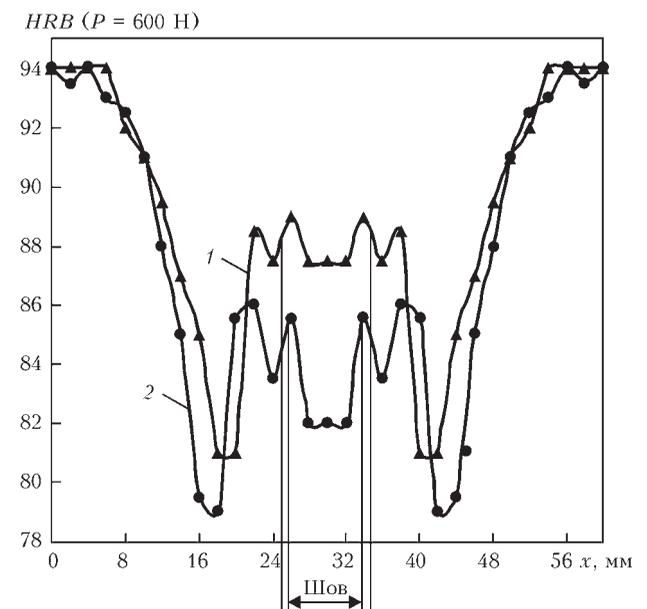


Рис. 12. Твердость наплавки на сплав АМг6Н толщиной 12 мм, полученных при комбинированном использовании плазменно–дуговой сварки и сварки плавящимся электродом (1) и обычной сваркой плавящимся электродом (2) (присадочная проволока марки СвАМг6)

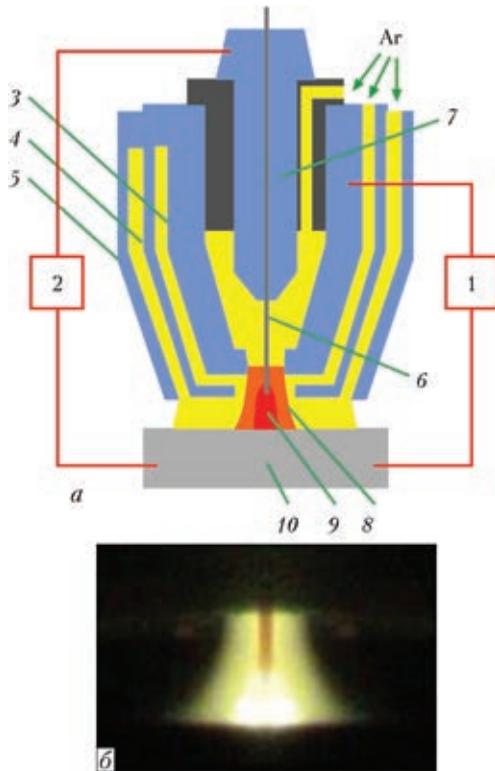


Рис. 13. Схема процесса (а) и внешний вид дуги плазменной сварки плавящимся электродом: 1 — источник питания сжатой плазменной дуги; 2 — источник питания МИГ-дуги; 3 — неплавящийся электрод; 4 — стабилизирующее сопло; 5 — защитное сопло; 6 — плавящийся электрод; 7 — токоподвод; 8 — сжатая плазменная дуга; 9 — МИГ-дуга; 10 — изделие

новые схемы реализации этого процесса сварки — с кольцевым анодом (рис. 14) и с боковым расположением анода (рис. 15). Такое гибридное использование обеих дуг позволяет уменьшить разбрызгивание электродного металла, повысить глубину проплавления и скорость сварки, использовать процесс для выполнения сварки толстых деталей с разделкой кромок.

Исследования гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом проводятся во многих университетах мира, в частности, в Техническом университете города Хемниц (Германия). Там было разработано устройство, обеспечивающее включение и совместную работу источников питания для плазменно-дуговой сварки неплавящимся электродом на постоянном токе при обратной полярности и источника питания для сварки плавящимся электродом на постоянном токе при обратной полярности [35]. Исследования такой же направленности проводятся и в SLV Muenchen (Германия). Аналогичные исследования проводятся в Пермском государственном университете (Россия) [36, 37]. В Украине вопросами плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом занимались в Приазовском техническом университете [38].

Особенности процесса плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом также изучались в Китае, Японии и Бразилии [39, 40].

Фирма «ТВІ» (Германия) наладила выпуск по индивидуальным заказам горелок PLM 500 и PLM 600 с кольцевым анодом для плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом, которая выдерживает токовую нагрузку до 250 и 300 А постоянного тока при обратной полярности соответственно отдельно для плазменной части горелки и узла плавящегося электрода (рис. 14).

Израильская фирма «Plasma Laser Technologies Ltd» предложила процесс гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом под названием Super-MIG, который подразумевает одновременное горение в одну общую ванну сжатой дуги неплавящегося электрода и дуги плавящегося электрода. При этом дуга плавящегося электрода горит сбоку от дуги неплавящегося электрода (рис. 15) [41].

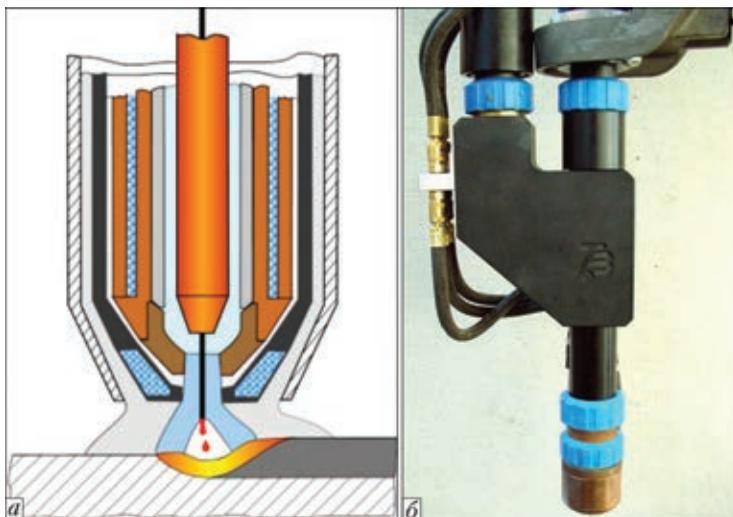


Рис. 14. Схема процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с кольцевым пустотелым анодом и аксиальной подачей электродной проволоки (а) и сварочная головка PLM 500 фирмы «ТВІ» для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом (б)

Несмотря на большой интерес к процессу гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с осевой подачей электродной проволоки серийный выпуск оборудования для реализации такого процесса не налажен. Такое оборудование имеет ограниченный набор функций, что значительно сужает технологические возможности и применение данного процесса.

В 2014–2015 гг. в ИЭС им. Е.О. Патона в рамках сотрудничества по проектам Китайско-украинского института сварки (КНР) разработан универсальный комплекс оборудования для плазменно-дуговой, комбинированной и гибридной сварки PLAZER PW-HYBRID TC. Производитель оборудования – ТОВ «Научно-производственный центр «ПЛАЗЕР»

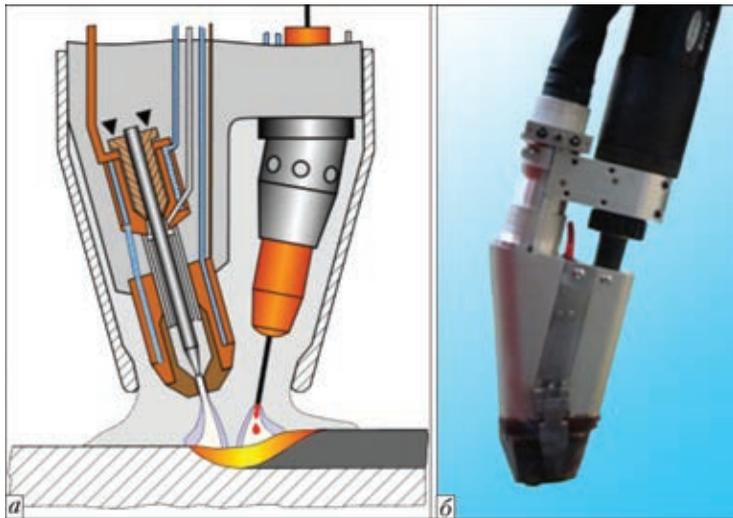


Рис. 15. Схема процесса (а) и сварочная горелка для процесса Super-MIG (б)

(Украина) (рис. 16). Данный комплекс оборудования позволяет реализовать широкий спектр плазменных и дуговых процессов: выполнять плазменно-дуговую сварку с присадочной проволокой постоянным током при прямой и обратной полярностях и разнополярным асимметричным током, гибридную плазменно-дуговую сварку плавящимся электродом с кольцевым анодом плазмотрона и с аксиальной подачей электродной проволоки, комбинированную сварку сжатой дугой и плавящимся электродом, сварку в режиме «мягкая плазма» (Soft Plasma Arc Welding), автоматическую сварку плавящимся и неплавящимся электродом.

Для реализации такого набора технологических возможностей данное оборудование выпол-

нено в блочно-модульном исполнении и включает следующие основные единицы:

- систему управления процессом сварки, обеспечивающую управление источниками питания, механизмами подачи присадочной проволоки, блоками автономного охлаждения, универсальным многопозиционным манипулятором для выполнения различных способов сварки;
- инверторный источник электропитания сварочного плазмотрона;
- инверторный источник электропитания плавящегося электрода;
- блок согласования работы источников питания плазменной сварки и сварки плавящимся электродом в режимах «Плазма + МИГ» — «гибридная и комбинированная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом»;
- блок плазмотрона для машинной гибридной плазменно-дуговой сварки «Плазма-МИГ» с осевой подачей проволоки с кабель-шланговым пакетом;
- моноблок для комбинированной сварки «Плазма + МИГ» с кабель-шланговым пакетом;
- механизм подачи присадочной проволоки для плазменно-дуговой гибридной сварки «Плазма-МИГ»;
- механизм подачи электродной проволоки для плазменно-дуговой гибридной сварки плавящимся электродом «Плазма + МИГ»;
- блок автономного охлаждения плазмотрона и горелки для сварки плавящимся электродом;
- многопозиционный сварочный манипулятор для плазменной гибридной сварки в нижнем положении, на вертикальной плоскости (включая выполнение вертикальных и горизонтальных швов на вертикальной плоскости), а также для сварки цилиндрических деталей.

Кроме того, в функциях данного оборудования заложена возможность работы в комплексе со сварочным роботом вместо сварочного манипулятора. Для этого в системе управления установкой и в источниках электропитания предусмотрен интерфейс для подключения к роботу с протоколами связи, применяемыми для основных типов передовых сварочных роботов.

Данный комплекс оборудования PLAZER PW-HYBRID TC позволяет выполнять швы в нижнем положении, вертикальные и горизонтальные швы на вертикальной и наклонной плоскостях. Наличие в его составе поворотного сварочного вращателя позволяет выполнять сварку кольцевых швов выше перечисленными способами (рис. 16). Комплекс укомплектован плазмотронами для сварки



Рис. 16. Внешний вид универсального комплекса оборудования для плазменно-дуговой, комбинированной и гибридной сварки в разных пространственных положениях PLAZER PW-HYBRID TC

неплавящимся и плавящимся электродами разработки ИЭС им. Е.О. Патона (рис. 17).

В заключение можно отметить следующее. Плазменно-дуговая сварка алюминиевых сплавов развивалась как продолжение аргонодуговой сварки неплавящимся электродом переменным синусоидальным током. Так, первые аппараты создавались на базе источников питания для сварки неплавящимся электродом переменным током. Однако ненадежность горения дуги переменного синусоидального тока при переходе через нулевую линию и значительный разогрев электродного узла в плазмотроне ограничило возможность широкого распространения плазменно-дуговой сварки на переменном синусоидальном токе промышленной частоты как на территории бывшего Советского Союза, так и за рубежом.

Следующим этапом развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является использование в качестве питания сжатой дуги постоянного тока при обратной полярности. Данный процесс имеет ряд преимуществ: простота исполнения оборудования, хорошая очистка поверхности алюминиевых сплавов и сварочной ванны от включений оксидной пленки. К недостаткам этого процесса стоит отнести большую ширину сварных швов, повышенную склонность к образованию водородной пористости, значительный перегрев электродного узла плазмотрона, что обуславливает увеличение габаритов плазмотрона, а также повышенное блуждание сжатой дуги постоянного тока при обратной полярности при малых амплитудных значениях тока. В данный момент данный способ сварки используется эпизодически как в производственных, так и в исследовательских целях.

Разработка следующего поколения источников питания с прямоугольной формой волны тока для плазменно-дуговой сварки позволило в широком диапазоне регулировать как амплитуду тока прямой и обратной полярностей, длительность протекания тока при прямой и обратной полярности, а также частоту разнополярного тока. Близкая к прямоугольной форма волны сварочного тока упростила процессы возбуждения дуги неплавящегося электрода в полупериод обратной полярности при переходе ее через нуль. Появление источников питания с возможностью создания амплитудной и временной асимметрии сварочного тока дало новый импульс к развитию плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. В частности, способ сварки VPPA был основным при изготовлении в 1980-1090-х годах баков из алюминий-литиевых высокопрочных сплавов для криогенного топлива космической системы Space Shuttle.



Рис. 17. Плазмотроны разработки ИЭС им. Е.О. Патона для плазменно-дуговой сварки неплавящимся (а) и гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся (б) электродами

Упрощение конструкции оборудования для плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током, а также уменьшение его стоимости является благоприятным фактором для внедрения плазменно-дуговой сварки разнополярным асимметричным током не только в аэрокосмической отрасли, но и в других отраслях машиностроения. Положительное влияние оказывает и переход от специализированных установок для плазменно-дуговой сварки к модульному построению комплекса оборудования для плазменно-дуговой сварки на основе серийных источников для сварки неплавящимся электродом. Модульное построение при создании комплекса оборудования позволяет более четко подстраиваться под технические задачи производства.

Дальнейшим перспективным направлением развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является комбинированное и гибридное использование двух и более источников нагрева при формировании сварного соединения. Это позволит увеличить скорость сварки, уменьшить разбрызгивание электродного металла, снизить уровень деформаций сварных конструкций. Одним из перспективных направлений является гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом с кольцевым полым анодом плазмотрона и аксиальной подачей электродной проволоки.

1. Pat. № 2806124 US. Arc torch and process / R.M. Gage. – Date of Pat.: 10 Sept. 1957.
2. Lathi K., Jenström P. Plasma Welding Aluminium // Svet-saren. – 1999. – № 3. – P. 26–28.
3. Dzelnitzki D. Aluplasmaweissen: Gleich- oder Wechselstrom? // Technica (Suisse). – 2000. – 49, № 10. – S. 44–53.
4. Сварка сжатой дугой на переменном токе / Дудко Д.А., Лакиза С.П., Виноградский Ф.М., Корниенко А.Н. // Автомат. сварка. – 1966. – № 7. – С. 47–49.

5. Дудко Д.А., Корниенко А.Н. Тепловая эффективность процесса сварки плазменной дугой переменного тока // Там же. – 1967. – № 11. – С. 27–30.
6. Рубинчик Ю.Л. Механизированная сварка корпусных конструкций из алюминиевых сплавов. – Л.: Судостроение, 1974. – С. 136.
7. Cooper G., Palermo J., Browning J.A. Recent Developments in Plasma Welding // Welding J. – 1965. – 44, № 4. – P. 268–276.
8. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Особенности формирования швов при сварке плазменной (сжатой) дугой обратной полярности // Свароч. пр-во. – 1971. – № 9. – С. 25–26.
9. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Энергетические характеристики плазменной дуги при обратной полярности // Автомат. сварка. – 1971. – № 5. – С. 27–30.
10. Применение плазменно-дуговой сварки при производстве криогенного оборудования из алюминиевых сплавов / С.А. Некрасов, Г.П. Салкин, А.С. Бычков, В.И. Астахин // Свароч. пр-во. – 1976. – № 4. – С. 16–17.
11. Горбач В.Д., Бочкарев В.П., Назарук В.К. Технология плазменной сварки алюминиевых сплавов // Мир сварки. – 2009. – № 3. – С. 22–25.
12. Киселев Г.С. Разработка технологии плазменной сварки алюминиевого сплава АМг5 с импульсной подачей плазмобразующих газов // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2010 – 20 с.
13. Татаринов Е.А., Киселев Г.С. К расчету вольт-амперной характеристики плазменной сварки при импульсной подаче аргона или гелия // Сварка и диагностика. – 2009. – № 5. – С. 11–14.
14. Пат. № 2351445 Россия. Способ сварки плазменной дугой / С.Л. Бычковский, О.М. Новиков, Э.П. Радько и др.; Заявка 2007121870/02 от 14.06.2007.
15. Ruge J., Lutze P., Norenberg K. Eignung von Aluminiumdruckguss zum Plasma- und Elektronenstrahlschweißen – Entgasungsmechanismen und Nahtgüte // Schweissen und Schneiden. – 1989. – 43, № 7. – S. 327–332.
16. Pat. № 6215089 B1 U.S. Plasma welding Torch. / G. Schweinhart. – Date of Pat. 10 Apr. 2001.
17. А. с. № 221477 МПН В 23k9/16. Способ плазменной сварки / Б.Е. Патон, Д.А. Дудко, В.С. Гвоздецкий и др.; Заявка № 1164345/25–27 от 17.06.1967.
18. Свидетельство о регистрации торговой марки «VPPA» № 73735584 // <http://www.tmfile.com/mark/?q=73735584> последнее обращение 16.07.2015 г.
19. J. Micheli, C. Pilcher. Advanced variable-polarity plasma arc welding // The Fabricator. – 2000. – № 11.
20. Nunes A.C., Bayless O.E., Jones C.S. The Variable Polarity Plasma Arc Welding process: its application to the Space Shuttle external tank — first interim report // George C. Marshall Space Flight Center. – 1983. – June. – 45 p.
21. Clover F.R. Welding of the External Tank of the Space Shuttle // Welding J. – 1980. – 54, № 8. – P. 17–26.
22. Tomsis M., Barhorst. Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power // Ibid. – 1984. – 63, № 3. – P. 25–32.
23. Lockheed Martin michoud space systems // Weld. Des. and Fabr. – 1998. – 71, № 11. – P. 32.
24. Брик Е.Ю. Сварка алюминиевых сплавов плазменной дугой переменного тока // I Междунар. конф. мол. ученых в обл. сварки и смеж. технологий: Тез. докл., Киев, 16–20 мая 1989 г. – Киев, 1989. – С. 91–92.
25. Источник питания дежурной дуги для плазменной сварки алюминия разнополярным током / А.Г. Запарованый, Г.Н. Игнатченко, Л.М. Яринич, Е.Ю. Брик // Автомат. сварка. – 1989. – № 9. – С. 73–74.
26. Лабур Т.М., Гринюк А.А., Покляцкий А.Г. Механические свойства сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой // Там же. – 2006. – № 6. – С. 40–43.
27. Особенности микромеханизма разрушения соединений алюминий-литиевых, полученных плазменной сваркой / Т.М. Лабур, А.А. Гринюк, Т.Г. Таранова и др. // Там же. – 2007. – № 9. – С. 16–22.
28. Гибридная лазер-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И.В. Кривцун, В.Д. Щелягин, В.Ю. Хаскин и др. // Там же. – 2007. – № 5. – С. 49–53.
29. Properties and structure of hybrid laser-plasma welded joints in aluminium alloys / Ternovoj E.G., Shulym V.F., Khaskin V.Yu. et. al. // The Paton Welding J. – 2007. – № 11. – P. 10–15.
30. V. Wesling, A. Schräm, A. Bock, D. Wocilka. Plasmapulververbindungsschweißen von Aluminiumblechen // Praktiker. – 2004. – № 10. – S. 288–294.
31. Untersuchung der metallurgischen Grundlagen zum Plasma-Pulver-Verbindungsschweißen dünner Aluminiumbleche // Schlussbericht für den Zeitraum: 1.6.2003 bis 31.5.2005. – AIF-Vorhaben-Nr. 13.770 B / 4. – Technische Universität Ilmenau. – Ilmenau, – 9.2005. – 73 S.
32. Zhang Y.M., Zhang S.B. Double Side Arc Welding Increases Weld Joint Penetration // Welding J. – 1998. – № 6. – P. 57–61.
33. Moulton J.A., Weckman D.C. Double Side Arc Welding of 5182-O Aluminum Sheet for Tailored Welded Blank Applications // Ibid. – 2010. – № 1. – P. 11–23.
34. Pat. № 3809824 U.S. Method of Plasma-MIG Welding. Date of Pat.: 24 June. 1975 / U.S. Philips Corporation.
35. Matthes K.-J., Kusch M. Plasma-MIG-Schweißen // Praktiker. – 2000. – № 5. – S. 182–188.
36. Щицын Ю.Д., Тьткин Ю.М. Плазменная сварка плавящимся электродом алюминиевых сплавов // Свароч. пр-во. – 1986. – № 5. – |С. 1–2.
37. Плазменная сварка алюминиевых сплавов / Ю.Д. Щицын, В.Ю. Щицын, Х. Херольд, В. Вейнгарт // Там же. – 2003. – № 5. – С. 36–42.
38. Макаренко Н.А., Неведомский В.А. Термические циклы при Плазма-МИГ наплавке // Автомат. сварка. – 2003. – № 1. – С. 45–47.
39. Yan B., Hong-Ming G., Ling Q. Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminium alloys // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2010. – Vol. 20 – P. 2234–2239.
40. Tiago Vieira da Cunha, Jair Carlos Dutra. Processo Plasma-MIG – Contribuição do Arco Plasma na Capacidade de Fusão do Arame // Soldagem Insp. São Paulo. – 2007. – 12, № 2. – P. 89–96.
41. Hybrid Welding: An alternative to SAW // Welding J. – 2007. – № 10. – P. 42–45.

Поступила в редакцию 21.07.2015