УДК 621.791

Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, И.А. Гилев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА ПРОНИКАЮЩЕЙ ДУГОЙ С ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

Представлены результаты исследования и разработки технологии плазменной сварки проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки цветных металлов и сложнолегированных сплавов. Определены оптимальные условия формирования сварного шва комбинированного процесса. Установлена математическая зависимость скорости подачи проволоки от геометрических характеристик стыка и диаметра проволоки. Полученные результаты позволяют подобрать необходимые режимы сварки проникающей дугой с формированием качественного и бездефектного соединения. Описана возможность подачи проволоки, которая осуществляется таким образом, чтобы не нарушался баланс силовых факторов на передней стенке жидкой ванны. Проведена оценка различных способов подачи присадочной проволоки в хвостовую часть и на переднюю кромку сварочной ванны. Проведены опыты с различными вариантами подачи присадочной проволоки на переднюю кромку полости кратера. В первом варианте присадочная проволока подавалась с касанием поверхности, а во втором варианте проволока подавалась на весу. Приведены макроснимки соединений, полученных плазменной сваркой проникающей дугой алюминиевого, титанового и сложнолегированного сплава, с наиболее благоприятным вариантом формирования шва. Показана принципиальная возможность получения бездефектных сварных швов при минимальных затратах и высокой производительности.

Ключевые слова: плазменная сварка, плазмотрон, проникающая дуга, цветные металлы, сложнолегированные сплавы, присадочная проволока, сварочная ванна, прямая полярность тока, катодная очистка, обратная полярность тока, сварка титана.

Y.D. Schitcyn, D.S. Belinin, I.A. Gilev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PLASMA WELDING PENETRATION ARC WITH WIRE FEEDING NONFERROUS METALS AND COMPLEX ALLOYS

The results of research and development of technology of plasma arc welding penetration with simultaneous wire feeding non-ferrous metals and complex alloys. The optimal conditions for the formation of the weld combined process. Mathematical relationship set wire feed speed from the geometrical characteristics of the junction and the wire diameter. The obtained results allow us to pick up the necessary arc welding is penetrating the formation of high-quality and defect-free connection. Described the possibility of the wire, which is implemented in a way that maintains the balance of power factors on the front wall of the liquid bath. The evaluation of different ways of presenting the filler wire to the tail section and the front edge of the weld pool. Experiments were conducted with various embodiments of the filler

wire feed on the leading edge of the crater cavity. In the first embodiment, the filler wire fed from the touch surface and the second embodiment applied to a wire weight. Given macro shots penetrating arc plasma welding of aluminum, titanium and complex alloys with the most favorable one for the formation of the joint. The principal possibility of obtaining defect-free welds at the lowest cost and high performance.

Keywords: plasma welding, plasmasurfacing, penetrating arc, nonferrous metals, complex alloys, filler wire, weldpool, welding bathroom, straight polarity, cathodic cleaning, titanium welding.

Плазменная сварка ответственных конструкций является объектом изучения и разработки в развитых странах мира. Например, в производстве топливных баков разгонной ступени космических объектов по программе Space Shutlle используется плазменная сварка проникающей дугой. Однако при высоком качестве сварных швов разработанное оборудование является очень дорогим [1].

Следует отметить, что наряду с известными неоспоримыми преимуществами плазменная сварка проникающей дугой имеет недостаток – некоторое провисание лицевой стороны сварного шва. Несмотря на то что провисание имеет незначительную величину, в ряде случаев, особенно для конструкций, работающих в условиях динамического нагружения, требуется выполнение второго прохода для наложения декоративного валика, заполняющего провисание. Выполнение этой операции может потребовать перенастройки оборудования или передачи изделия на другое рабочее место, повышает трудозатраты, снижает производительность и может быть причиной возникновения дефектов сварного шва.

Для устранения необходимости во втором проходе логически напрашивается идея попытаться совместить плазменную сварку проникающей дугой с подачей присадочной проволоки [2]. В то же время положительного производственного опыта такого совмещения до настоящего времени не имеется. Подача дополнительного металла повышает неустойчивость жидкой ванны и может привести к ее разрушению и формированию дефектного сварного шва.

Целью настоящей работы является исследование возможности реализовать плазменную сварку проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки, обеспечивающий качественное формирование сварного шва.

При соответствующей геометрии поперечного сечения сварного шва разрушение жидкой ванны в результате превышения гравитационных сил над силами поверхностного натяжения маловероятно (рис. 1). Разрушение жидкой ванны и формирование дефектного сварного шва

может быть вызвано неустойчивостью ванны на передней стенке при внесении дополнительного металла. Это может происходить при неправильной дозировке подачи присадочного металла (при повышенном объеме подачи) и неблагоприятной траектории движения расплава с фронта плавления в хвостовую часть сварочной ванны при неправильной подаче присадочной проволоки [3]. Необходимо последовательно рассмотреть эти причины. На рис. 1, *а* представлено поперечное сечение сварного шва, полученного при плазменной сварке проникающей дугой по стыку, собранному без зазора. Величина провисания корня шва определяется шириной корня b и высотой k. Без большой погрешности можно принять форму корня шва равной полукругу: $b/2 = k = r$. Тогда площадь провисания корня шва $F_к = \pi b^2/4$.

Для формирования усиления сварного шва присадочный металл должен заполнять ослабление шва $F_п$ и создавать валик площадью $F_н$. Для обеспечения минимальной концентрации напряжений необходимо создавать плавный переход от основного металла к наплавленному валику. Для этого требуется выполнять сварной шов с минимальным усилением ($e = 1…1{,}5$ мм). Площадь $F_п$ и $F_н$ можно определить как площадь сегмента

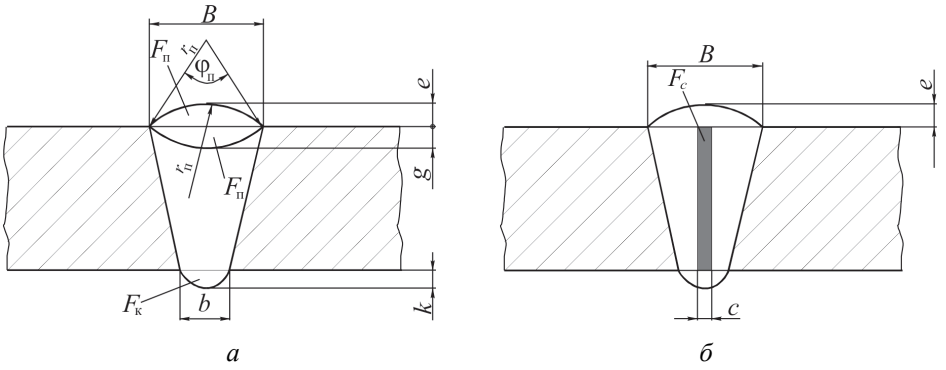
$$F = \frac{R^2}{2}\left(\frac{\pi\varphi}{180} - \sin\varphi\right),$$

где R – радиус окружности, $R = \dfrac{\left(\dfrac{B}{2}\right)^2 + f^2}{2 \cdot f}$; f – стрела сегмента, $f = g(e)$.

Для повышения стабильности процесса металлы толщиной $\delta = 6 – 8$ мм и более рекомендуется сваривать по стыку, собранному с зазором c (рис. 1, *б*). Для формирования усиления шва необходимых размеров при сварке проникающей дугой по стыку, собранному с зазором, подача присадочного металла должна производиться с учетом объема, необходимого для заполнения зазора в стыке. Таким образом, суммарная площадь поперечного сечения, необходимого для заполнения присадочным металлом, составляет $\sum F = F_п + F_н + F_с$, где $F_с = \delta c$. Скорость подачи присадочной проволоки для качественного формирования сварного шва при плазменной сварке проникающей дугой определяется как

$$V_{\text{пп}} = \frac{4 \cdot V_{\text{св}} \cdot \Sigma F}{\pi \cdot d_{\text{п}}^2},$$

где $V_{\text{св}}$ – скорость сварки; $d_{\text{п}}$ – диаметр присадочной проволоки, $d_{\text{п}}$ = = 1,0…2,0 мм, причем предпочтительней использовать меньшие диаметры (1,0…1,6 мм), что не ведет к снижению стабильности формирования сварного шва.



а *б*

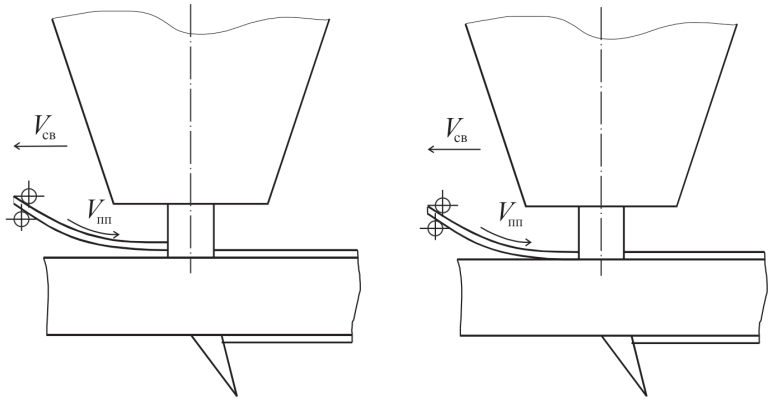
Рис. 1. Поперечное сечение сварного шва при плазменной сварке проникающей дугой: *а* – сборка стыка без зазора; *б* – сборка стыка с зазором

Устойчивость жидкой ванны на весу и качество формирования шва определяется балансом силовых факторов на передней ее стенке. Нарушение баланса ведет к появлению неустойчивости передней стенки и, как следствие, формированию грубочешуйчатой поверхности сварного шва, возможно также оттеснение и разрыв жидкой ванны и переход к зоне реза или закрытие сквозного отверстия в корне шва и дефектное формирование без сквозного проплавления [4].

Подача присадочного металла должна осуществляться таким образом, чтобы не нарушался баланс силовых факторов на передней стенке жидкой ванны. На первый взгляд наиболее предпочтительным является способ подачи присадочной проволоки в хвостовую часть сварочной ванны. При такой подаче исключается перемещение дополнительного металла по сложной траектории по полости кратера. В принципе, возможно два варианта подачи проволоки по этому способу: с касанием поверхности ванны и подача проволока на весу (без касания). Ведение процесса по первому варианту трудновыполнимо по ряду причин: при касании проволоки жидкой (твердожидкой) поверхности ванны возникает ее деформация, которая фиксируется на поверхности шва и является его дефектом; возможна приварка («прили-

пание») проволоки к поверхности остывающей ванны, при этом происходит прекращение подачи проволоки или разрушение сварочной ванны. При втором варианте подачи проволоки в хвостовую часть сварочной ванны происходит крупнокапельный перенос металла в ванну, что сопровождается появлением пульсаций ее поверхности и, возможно, нарушения баланса силовых факторов на передней стенке жидкой ванны. При сварке алюминиевых сплавов способ подачи присадочной проволоки в хвостовую часть сварочной ванны неприемлем, так как проволока должна обязательно касаться поверхности изделия, в противном случае не происходит ее катодной очистки и качественного сплавления со сварочной ванной.

Подача присадочной проволоки в переднюю часть сварочной ванны может иметь также два варианта: подача присадочной проволоки на весу и подача проволоки на переднюю кромку полости кратера по касательной к поверхности изделия (рис. 2). Подача присадочной проволоки на весу является самым неблагоприятным вариантом. Плавление и перенос металла осуществляется дискретно (рис. 2, *а*). Металл плавится вблизи осевой части сжатой дуги и полости кратера. Падение капли может перекрыть полостную часть сварочной ванны (полость кратера), ведет к резкому изменению траектории перемещения металла с фронта плавления в хвостовую часть, а также к изменению газодинамической обстановки в полости кратера. В результате этого происходит либо разрушение жидкой ванны и нарушение стабильности формирования сварного шва или переход к сварке без сквозного проплавления с дефектным формированием сварного шва [5].



а *б*

Рис. 2. Схема подачи присадочной проволоки на переднюю кромку полости кратера: *а* – с касанием поверхности; *б* – на весу

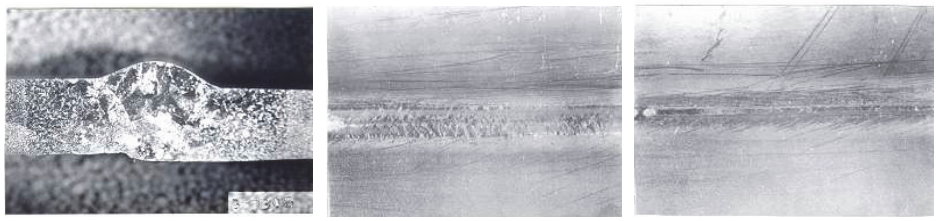
При подаче присадочной проволоки на переднюю кромку полости кратера по касательной к изделию плавление ее происходит совместно с передней кромкой кратера. Перенос расплава осуществляется симметрично по боковым стенкам полости кратера в верхней его части (рис. 2, *б*), что не нарушает стабильности течения процесса и высокого качества сварного шва.

Сварной шов при скорости $V_{пп}$, равной оптимальной, формируется с небольшим усилением и плавным переходом к основному металлу, внутренние дефекты отсутствуют (рис. 3–5). Подрезы на линии сплавления отсутствуют. Лицевая сторона формируется без чешуйчатости, что свидетельствует о непрерывном поступлении металла в хвостовую часть сварочной ванны и высокой устойчивости передней стенки жидкой ванны. Корень шва имеет несколько увеличенные размеры провисания – высоты $k = 1{,}2b$ при практически неизменной ширине b. Расплавленный металл, прошедший по боковым стенкам и попавший в жидкую ванну, активно перемешивается в центральной части ванны за счет вихревого перемещения расплава в ней. Таким способом устойчиво сваривается металл толщиной до 8 мм. Повышение толщины до 10 мм снижает стабильность формирования шва, возможно значительное провисание корня шва и, в отдельных случаях, нарушение целостности жидкой ванны со сбросом металла через сквозное отверстие. В таблице приведены режимы плазменной сварки проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки.



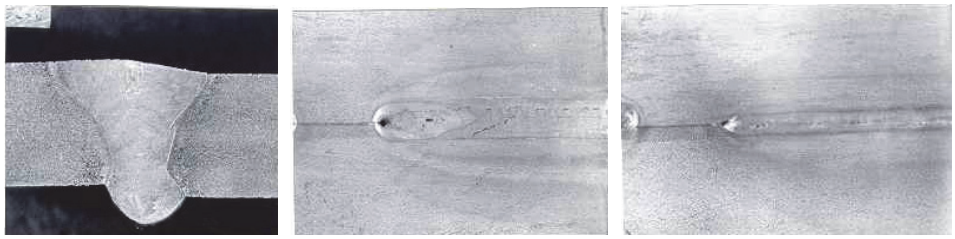
а *б* *в*

Рис. 3. Плазменная сварка проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки, сплав Д16, δ = 5 мм: *а* – макрошлиф сварного шва; *б* – внешний вид лицевой поверхности шва; *в* – внешний вид корня шва



а *б* *в*

Рис. 4. Сварка титана, сплав ОТ4, δ = 5 мм: *а*, *б*, *в* – см. рис. 3



а *б* *в*

Рис. 5. Сварка сложнолегированного сплава ЭП202, δ = 8 мм: *а*, *б*, *в* – см. рис. 3

Режимы плазменной сварки проникающей дугой
с одновременной подачей присадочной проволоки

Материал	δ, мм	$J_д$, А	$d_с$, мм	$Q_п$, л/мин	$h_{с\text{-}и}$, мм	C, мм	$V_{св}$, м/ч	$d_п$, мм	$V_{пп}$, м/ч
$АМ_г6$	4	65–90	2,0–2,5	2,0–2,8	4–5	0–0,3	11–30	1,4	30–60
	6	80–120	2,2–2,8	2,0–3,0	4–5	0–0,5	11–28	1,4	30–80
	8	90–130	2,5–3,0	2,0–3,0	4–5	0,3–0,5	12–24	1,4	26–120
Титан	4	100–160	2,5–3,4	2,2–3,5	4–5	0–0,5	8–30	2,0	20–40
ОТ4, ВТ-1	6	160–180	3,0–3,8	2,5–4,5	4	0–0,8	8–26	2,0	20–50
	8	180–240	3,3–3,8	3,0–5,0	5–6	0,6–1,2	10–20	2,0	20–66
ЭП202	4	120–160	2,5–3,0	2,0–3,2	3–5	0–0,5	12–24	1,5	16–36
	6	160–200	2,8–3,2	2,8–3,6	3–5	0–0,6	10–22	1,5	15–60
	8	180–220	3,2–3,6	3,0–4,2	3–5	0,5–1,2	10–18	1,5	26–100

Возможно, ведение процесса при подаче присадочной проволоки на переднюю боковую кромку полости кратера параллельно оси сварного шва или под углом φ. При сварке металла толщиной до 8 мм такой способ подачи проволоки не нарушает стабильности формирования шва, но может вести к несимметричной форме усиления шва, а иногда и к подрезам с одной стороны шва. Отличные результаты дает подача «расщепленного» (двух проволок уменьшенного диаметра) присадочного металла симметрично на боковые кромки передней час-

ти полости кратера параллельно или под углом к оси шва. Однако при этом усложняется конструкция сварочной головки, кроме того, требуется синхронизация подачи проволок.

Выполнение разработанного процесса возможно с использованием вспомогательного оборудования, разработанного для дуговых способов сварки, с небольшой модернизацией.

Подводя итог сказанному, можно отметить, что разработанная новая технология плазменной сварки проникающей дугой по стыку, собранному с зазором, позволяет вести процесс с одновременной подачей присадочной проволоки, обеспечивая высокую производительность и качество сварных соединений при низкой стоимости.

Список литературы

1. Швингхамер Дж. Высококачественные сварные швы для ракетносителей // Аэрокосмическая техника. – 1988. – № 2. – С. 130–134.

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

3. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – 73 с.

4. Щицын Ю.Д., Тыткин Ю.М. Взаймодействие сжатой дуги с полостью кратера при плазменной сварке проникающей дугой // Сварочное производство. – 1994. – № 6. – С. 32–33.

5. Использование тока обратной полярности для плазменной наплавки / С.Д. Неулыбин, Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, П.С. Кучев // Молодежь и наука: материалы междунар. науч.-практ. конф. (24 мая 2013 г., г. Нижний Тагил): в 2 т. – Нижний Тагил, 2013. – Т. 1. – С. 78–82.

Получено 16.02.2015

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: svarka@pstu.ru.

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – научный сотрудник кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: 5ly87@mail.ru.

Гилев Иван Александрович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: ivan.giliev@mail.ru.

Shicin Yuri (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding Production and Technology of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: svarka@pstu.ru.

Belinin Dmitry (Perm, Russian Federation) – Research Associate, Department “Welding Production and Technology of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: 5ly87@mail.ru.

Gilev Ivan (Perm, Russian Federation) – Student, Department “Welding Production and Technology of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: ivan.giliev@mail.com.