

УДК 621.791

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ПРОНИКАЮЩЕЙ ДУГОЙ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

© 2013 Ю.Д. Щицын, И.Л. Синани, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 13.03.2013

Представлены результаты исследования и разработки технологии плазменной сварки проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки цветных металлов и сложнoleгированных сплавов. Определены оптимальные условия формирования сварного шва комбинированного процесса. Показана принципиальная возможность получения бездефектных сварных швов при минимальных затратах и высокой производительности.

Ключевые слова: *плазма, проникающая дуга, сварка*

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 Shuttle» используется плазменная сварка проникающей дугой. Однако при высоком качестве сварных швов, разработанное оборудование является очень дорогим [1]. Кроме того, 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 дефектности в сварном шве. Для устранения необходимости во втором проходе логически напрашивается вывод о попытке совмещения плазменной сварки проникающей дугой с одновременной

подачей присадочной проволоки. Однако положительного производственного опыта такого совмещения до настоящего времени не имеется. Подача дополнительного металла повышает неустойчивость жидкой ванны, ведет к разрушению ее, и дефектному формированию сварного шва.

Цель работы: исследование возможности плазменной сварки проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки, обеспечивающего качественное формирование сварного шва при высокой производительности.

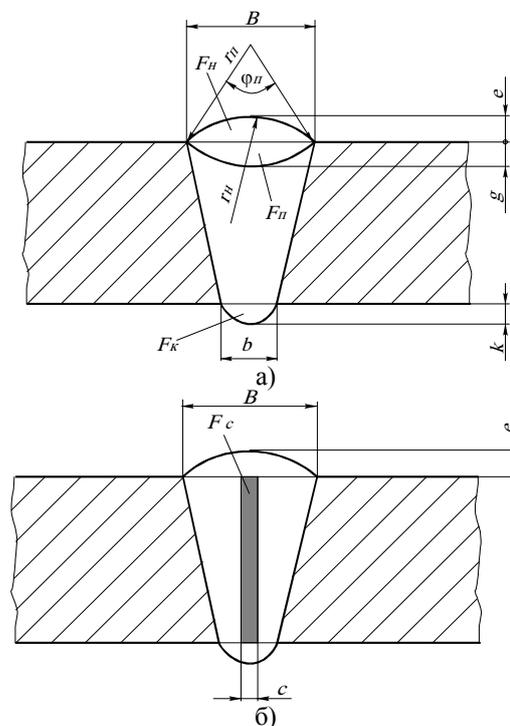


Рис. 1. Поперечное сечение сварного шва при плазменной сварке проникающей дугой: а) сборка стыка без зазора, б) сборка стыка с зазором

Щицын Юрий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производство и технология конструкционных материалов». E-mail: svarka@pstu.ru

Синани Игорь Лазаревич, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов»

Белинин Дмитрий Сергеевич, аспирант
Неулыбин Сергей Дмитриевич, студент

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

Причиной разрушения жидкой ванны и дефектного формирования сварного шва должно быть создание неустойчивости на ее 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. Необходимо последовательно рассмотреть эти причины. На рис. 1а 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 $b/2 = k = r$ – форму корня шва равной полукругу. Тогда площадь провисания корня шва $F_k = \pi b^2/4$.

Для формирования усиления сварного шва присадочный металл должен заполнять ослабление шва F_n и создавать валик площадью F_n . 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_n и F_n можно определить как площадь сегмента:

$$F = \frac{R^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{180} - \sin \varphi \right) \quad (1)$$

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

Для повышения стабильности процесса металлы толщиной $\delta=6-8$ мм и выше рекомендуется сваривать по стыку, собранному с зазором c (см. рис. 1б). 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 $\Sigma F = F_n + F_n + F_c$, где $F_c = \delta c$. Скорость подачи присадочной проволоки для качественного формирования сварного шва при плазменной сварке проникающей дугой определяется как:

$$V_{mn} = \frac{4 \cdot V_{cs} \cdot \Sigma F}{\pi \cdot d_n^2} \quad (2)$$

где V_{cs} – скорость сварки; d_n – диаметр присадочной проволоки, находится в диапазоне 1,0-2,0 мм, причем предпочтительней использовать меньшие диаметры (1,0-1,6 мм), что не ведет к снижению стабильности формирования сварного шва.

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, возможны также оттеснение и разрыв жидкой ванны, и переход к зоне реза или закрытие сквозного отверстия в корне шва и дефектное формирование без сквозного проплавления.

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 проволоки на весу (без касания). Ведение процесса по первому варианту трудно выполнимо по ряду причин: при касании проволоки жидкой (твердожидкой) поверхности ванны возникает ее деформация, которая фиксируется на поверхности шва и является его дефектом; возможна приварка («прилипание») 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, т.к. 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).

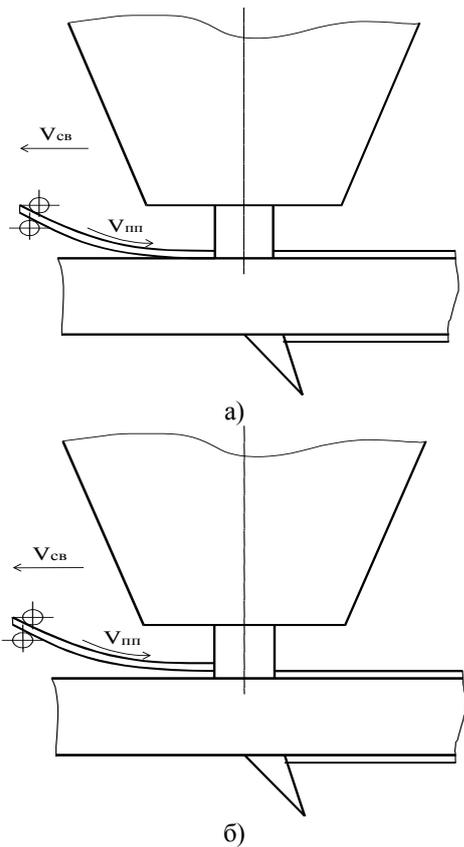


Рис. 2. Схема подачи присадочной проволоки на переднюю кромку полости кратера: а) с касанием поверхности, б) на весу.

Подача присадочной проволоки на весу является самым неблагоприятным вариантом. Плавление и перенос металла осуществляется дискретно (рис. 2б). 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.

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. 2а), что не нарушает стабильности течения процесса и качественного формирования сварного шва. Сварной шов при скорости V_m равной оптимальной формируется с небольшим усилением и плавным переходом к основному металлу внутренние дефекты отсутствуют (см. рис. 3- 5).

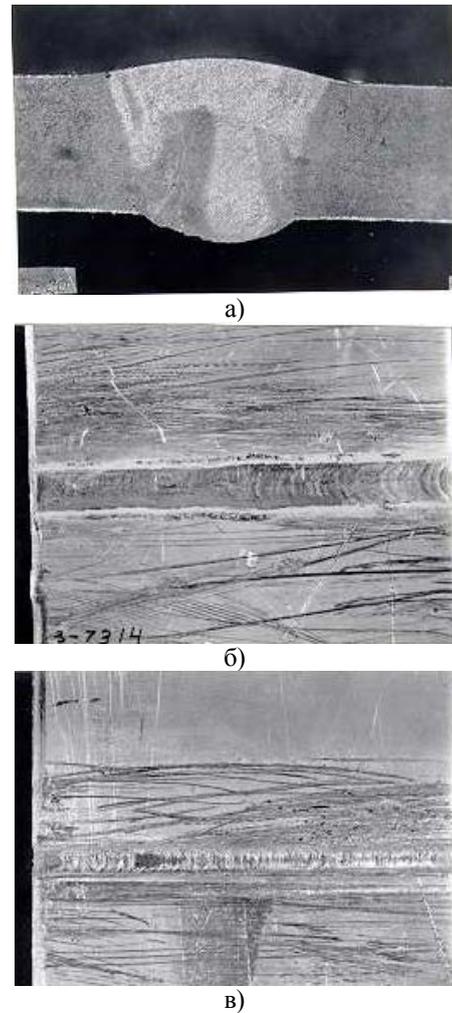
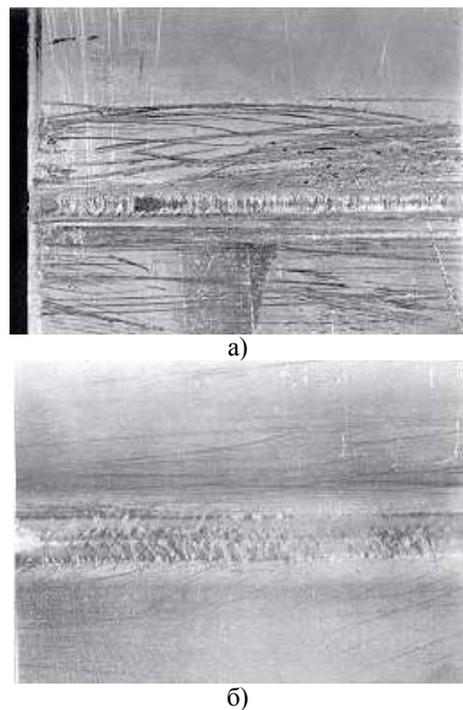


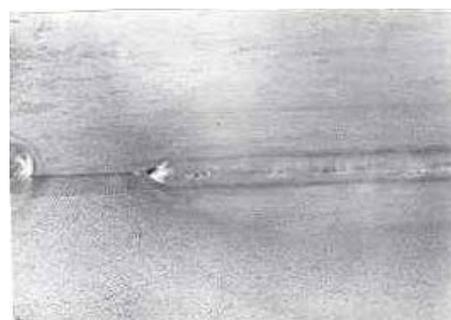
Рис. 3. Плазменная сварка проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки, сплав Д16, $\delta=5$ мм: а) макрошлиф сварного шва; б) внешний вид лицевой поверхности шва; в) внешний вид корня шва





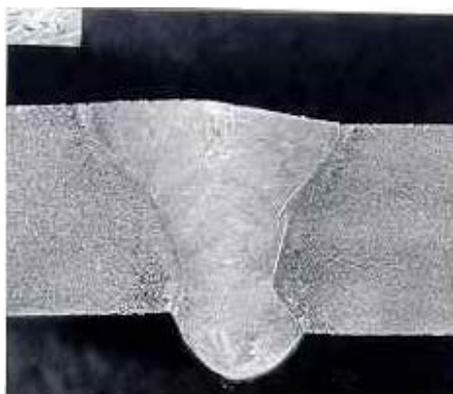
в)

Рис. 4. Сварка титана, сплав ОТ4, $\delta=5$ мм: а) макрошлиф сварного шва; б) внешний вид лицевой поверхности шва; в) внешний вид корня шва



в)

Рис. 5. Сварка сложнoleгированного сплава ЭП202, $\delta=8$ мм: а) макрошлиф сварного шва; б) внешний вид лицевой поверхности шва; в) внешний вид корня шва



а)



б)

Видно, что 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 ($k=1,2 b$) 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, возможны значительное провисание корня шва и, в отдельных случаях, нарушение целостности жидкой ванны со сбросом металла через сквозное отверстие.

Таблица 1. Режимы плазменной сварки проникающей дугой с одновременной подачей присадочной проволоки

Материал	δ , мм	$J_{дс}$, А	$d_{св}$, мм	$Q_{п}$, л/мин	$h_{св}$, мм	C , мм	$V_{св}$, м/ч	$d_{п}$, мм	$V_{п}$, м/ч
АМгб	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 (ОТ4, ВТ-1)	4	100-160	2,5-3,4	2,2-3,5	4-5	0-0,5	8-30	2,0	20-40
	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

Можно вести процесс 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 части полости кратера параллельно или под углом к оси шва. Однако при этом усложняется сварочная головка, кроме того, требуется синхронизация подачи проволоки. Выполнить разработанный процесс можно с использованием вспомогательного оборудования, разработанного для дуговых способов сварки, с небольшой модернизацией.

Выводы: разработана новая технология плазменной сварки проникающей дугой по стыку, собранному с зазором, что позволяет вести процесс с одновременной подачей присадочной проволоки, обеспечивая высокую производительность и качество сварных соединений при низкой стоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Швингхаммер, Дж. Высококачественные сварные швы для ракет-носителей // Аэрокосмическая техника. 1988. № 2. С. 130-134.

IMPROVING THE TECHNOLOGIES OF PLASMA WELDING BY PENETRATION ARCH OF NON-FERROUS METALS AND COMPLEX ALLOYS

© 2013 Yu. D. Shchitsyn, I.L. Sinani, D.S. Belinin, S.D. Neulybin

Perm National Research Polytechnical University

Results of research and development the technology of plasma welding by penetrating arc with simultaneous giving the additive wire from non-ferrous metals and complex alloys are presented. Optimum conditions of formation the weld of the combined process are defined. The principal possibility of receiving non-defective welds is shown at minimum expenses and high efficiency.

Key words: *plasma, penetrating arc, welding*

Yuriy Shchitsyn, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Welding Production and Technology of Construction Materials". E-mail: svarka@pstu.ru

Igor Sinani, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Welding Production and Technology of Construction Materials"

Dmitriy Belinin, Post-graduate Student

Sergey Neulybin, Student