

УДК 621.791

**Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, П.С. Кучев,  
С.Д. Неулыбин, И.А. Гилев**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## **ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА ПО ОТБОРТОВКЕ ТОНКОСТЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Представлен опыт плазменной сварки тонкостенных соединений на токе прямой и обратной полярности. Проведены эксперименты по сварке с применением различных защитных газов, а также без защиты. Показана возможность производительной и качественной сварки тонкостенных соединений по отбортовке с использованием плазменных технологий.

**Ключевые слова:** плазменная сварка, обратная полярность тока, прямая полярность тока, защитный газ, пилообразный дефект.

**Y.D. Shicin, D.S. Belinin, P.S. Kuchev,  
S.D. Neulybin, I.A. Gilev**

Perm National Research Polytechnic University

## **PLASMA WELDING ON THIN-WALLED COMPOUNDS FLANGING**

The experience of plasma welding of thin-walled compounds on the forward and reverse polarity. Experiments using different gases and unprotected. The possibility of a productive and high-quality welding of thin-walled compounds of the flanging using plasma technology.

**Keywords:** plasma welding, reverse polarity, straight polarity, shielding gas, ramp defect.

Исследование процесса плазменной сварки по отбортовке тонкого металла (толщиной 0,8–1,2 мм) типа низколегированной стали 09Г2С интересно с точки зрения возможности применения его для изготовления тонкостенных сосудов. Основной операцией при изготовлении является выполнение сварного шва по периметру для соединения двух половин, подвергнутых глубокой вытяжке. К сварным соединениям предъявляются высокие требования по прочности и герметичности соединения.

Данная сталь имеет хорошую свариваемость, что позволяет использовать практически все виды сварки. Однако применение обычных способов сварки не обеспечивает выполнения высоких требований к сборке заготовок, к качеству подготовки кромок, необходимой точности ориентации сварочной горелки по стыку [1, 2].

Для сварки тонкостенных сосудов наиболее распространен процесс газоплазменной сварки по отбортовке. Однако и данный процесс не нашел широкого применения ввиду невысокой производительности. Зачастую для увеличения производительности процесса сварки увеличивают сварочный ток и скорость сварки, однако при увеличении скорости сварки и величины сварочного тока во время сварки по отбортовке происходит нарушение стабильного формирования сварочной ванны, что приводит к образованию дефекта, называемого «пилой» (рис. 1).



Рис. 1. Шов с дефектами

По данным работ [3, 4] причиной дефектного (пилообразного) формирования сварного шва является дискретность теплового и механического воздействия дуги на поверхность металла вследствие скачкообразного перемещения дуги, характерного для пространственно неустойчивых дуг.

Появление пилообразного формирования при заданной скорости сварки и толщине материала определяется в основном токами  $I_{\text{опт}}$  и  $I_{\text{п}}$ , степенью сжатия дуги и свойствами металла. Сварочный ток  $I_{\text{опт}}$  – максимальный ток, при котором сохраняется нормальное формирование шва при заданных значениях других параметров процесса сварки (в этом случае местные превышения закристаллизовавшегося металла

не превышают 10 % толщины металла);  $I_{\text{п}}$  – минимальный ток, при котором происходит волновое пилообразование с длиной волны  $\lambda$  и расстоянием от подошвы волны до ее вершины  $C$ .

При сохранении вертикального положения столба дуги характер формирования определяется не только действующими на ванну силами, но и геометрией ванны. После завершения начального нагрева образца и установления стационарного температурного поля происходит рост объема ванны с изменением нормального формирования на пилообразное, даже если остается неизменным ток и, следовательно, давление дуги. Пилообразное формирование при токах больших  $I_{\text{опт}}$  возникает через некоторое время после начала плавления металла. Это время зависит при заданной толщине металла от тока и скорости сварки. В областях между  $I_{\text{опт}}$  и  $I_{\text{п}}$  длина волны резко сокращается, а высота увеличивается [5].

В данной работе описаны результаты плазменной сварки по отбортовке тонкостенных изделий на токах прямой и обратной полярностей.

Для решения проблем возникновения дефектов было предложено использовать плазменную сварку по отбортовке. Плазменная дуга обладает такими качествами, как высокая концентрация энергии и стабильность рабочих параметров. Использование плазменной сварки позволяет снизить требования к точности при сборке половин сосуда и снизить процент выхода дефектных изделий.

Для проведения исследований было изготовлено приспособление, позволяющее закреплять свариваемые образцы и имитировать возможные варианты сборки кромок, имеющие место при изготовлении сосудов: плотная сборка кромок, сборка кромок с зазором, превышение одной из кромок, сборка под углом друг к другу. Сварка осуществлялась на установке УПС-501У4 с источником питания ВДУ-504-ИУЗ. В качестве сварочной горелки использовался плазмотрон универсальный, разработанный на кафедре сварочного производства и технологии конструкционных материалов. В экспериментах использовались плазмообразующие сопла с диаметром канала 1,5–4,0 мм, сварочный ток  $I_{\text{св}} = 40 \dots 140$  А, скорость сварки  $V_{\text{св}} = 10 \dots 150$  м/ч, расход плазмообразующего газа (аргон)  $Q_{\text{пл}} = 0,8 \dots 2,5$  л/мин. При проведении предварительных экспериментов были найдены диапазоны стабильного формирования торцевых соединений. Основными параметрами режима сварки,

влияющими на стабильность формирования шва, являются: диаметр плазмобразующего сопла, расход плазмобразующего газа, сварочный ток, скорость сварки, расстояние от сопла до изделия. Влияние расхода защитного газа (например,  $\text{CO}_2$ ) на качество формирования шва незначительно. Гладкие качественные швы получены при низких скоростях сварки и малых токах. Причем при сварке на больших токах применялись плазмобразующие сопла с диаметром канала 3,5–4,0 мм. На прямой полярности обеспечиваются более высокие скорости сварки, чем при сварке на обратной полярности, при прочих равных условиях, что объясняется большим тепловложением в изделие.

Области стабильного формирования сварного шва по отбортовке представлены в табл. 1.

Таблица 1

Диапазон регулирования параметров  
для стабильного формирования шва

Диаметр плазмобразующего сопла $d_c$ , мм	Расход плазмобразующего газа $Q_{\text{пл}}$ , л/мин	Сварочный ток $I_{\text{св}}$ , А	Дуговой промежуток $h$ , мм	Скорость сварки $V_{\text{св}}$ , м/ч	
				Прямая полярность	Обратная полярность
1,5	1,5	30–40	3–4	12–18	10–14
2	1,5	40–50	3–4	16–22	12–18
3	1–1,5	50–80	3–5	25–50	20–30
3,5–4,0	0,8–1,2	80–120	5–8	50–110	45–85

Актуальной задачей является получение качественного шва на максимальных скоростях сварки. С увеличением скорости сварки высота и площадь поперечного сечения шва уменьшаются. Повышение скорости сварки требует увеличения сварочного тока. В случае плазменной сварки при высокой пространственной стабильности столба дуги в некоторых случаях также возможно пилообразное формирование торцевого сварного шва. Пилообразное формирование шва может начаться не только в условиях дискретного перемещения дуги из-за неустойчивого положения анодного пятна при сварке свободной дугой, но и при высокой пространственной устойчивости дуги, обеспечиваемой сжатием столба дуги в плазмотроне.

После проведения серии экспериментов были найдены оптимальные режимы формирования сварных соединений при плазменной сварке по отбортовке на токе прямой и обратной полярности (табл. 2).

Таблица 2

Режимы формирования швов на токе прямой и обратной полярности

Скорость сварки $V_{св}$ , м/ч	Диаметр плазмообразующего сопла $d_c$ , мм	Прямая полярность			Обратная полярность		
		$I_p$ , А	$\lambda$ , мм	$C$ , мм	$I_p$ , А	$\lambda$ , мм	$C$ , мм
12	3,5	24	5–8	1,4–1,8	30	4–6	1,2–1,4
46	3,5	50	5–8	1,0–1,2	65	4–6	1,0–1,2
100	3,5	80	5–8	0,6–0,8	100	4–6	0,8–1,0

Параметры, влияющие на давление дуги и защитного газа на жидкую ванну, приводят при токе  $I_p$  к уменьшению длины ванны. При этом происходит снижение тока  $I_p$ , и вследствие уменьшения объема сварочной ванны уменьшается высота волны. Длина волны не зависит от скорости оплавления, или зависит незначительно, а высота волны при токах  $I_p$  снижается. Снижение высоты обусловлено также уменьшением погонной энергии дуги, а уменьшение объема сварочной ванны – ростом скорости оплавления при токе  $I_p$ .

Влияние расхода защитного газа (например, аргон,  $CO_2$ ) на качество формирования шва менее выражено. Выбор защитного газа диктуется условием минимальной стоимости процесса.

В результате предварительных экспериментов было установлено, что сварка по отбортовке «жесткой» плазменной дугой (малый диаметр сопла,  $d_c < 2$  мм, повышенный расход плазмообразующего газа  $Q_p > 2,5$  л/мин, высокие токи  $I_{св} > 100$  А) затруднена. Процесс отличается нестабильностью, вероятностью формирования пилообразного сварного шва, чередованием сваренных участков с глубоким прожогами кромок. Практически получить качественный протяженный шов на таких режимах не удавалось.

Увеличение диаметра плазмообразующего сопла  $d_c > 3,5$  мм и снижение расхода плазмообразующего газа до  $Q_p = 0,8...1,2$  л/мин при сохранении значений сварочного тока на уровне  $I_{св} = 100$  А позволило получить швы высокого качества при высокой скорости сварки (рис. 2).

Сварка выполнялась на токе прямой и обратной полярности. Причем при прочих равных условиях сварочный ток при сварке на прямой полярности был ниже, чем при сварке на обратной. Это объясняется большим тепловложением в изделие при сварке на прямой полярности [6].

Хорошее качество защиты зоны сварки и стабильное формирование шва обеспечивается применением в качестве защитного газа аргона ( $Q_3 = 3 \dots 5$  л/мин) или углекислого газа ( $Q_3 = 4 \dots 8$  л/мин).

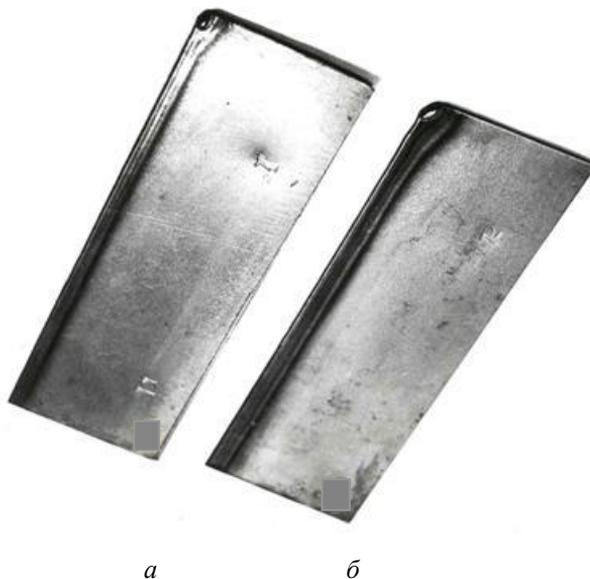


Рис. 2. Сварное соединение, выполненное на прямой (а) и обратной (б) полярности

Важным преимуществом плазменной сварки по отбортовке является то, что изменение длины плазменной дуги в широких пределах (почти в два раза – 4–10 мм) не приводит к нарушению стабильности формирования сварного шва. С учетом характера производства (массовое производство) выбор сварочных материалов, в частности защитного газа, должен производиться из условия наименьших затрат. Для снижения затрат в качестве защитного газа можно рекомендовать применение  $CO_2$ .

Была сделана попытка подобрать режимы сварки без подачи защитного газа плазмотроном без каких-либо конструктивных изменений. В результате проведенных исследований были подобраны режимы сварки без подачи защитного газа, обеспечивающие удовлетворительное качество сварного соединения (рис. 3). Параметры режима были следующие:  $d_c = 4$  мм,  $I_{св} = 80$  А,  $Q_{п} = 1,4$  л/мин,  $h = 5$  мм,  $V_{св} = 90$  м/ч, полярность прямая. Поверхность шва покрыта тонким

слоем трудноудаляемого шлака, несколько ухудшающим внешний вид шва, однако геометрические размеры шва (высота и ширина) удовлетворяют требованиям, а проверка на герметичность показала 100%-ную плотность швов. При данных положительных моментах при плазменной сварке без подачи защитного газа требуется периодическая очистка элементов плазматрона от оксидов свариваемого металла.



Рис. 3. Сварное соединение выполненное без защитного газа:  
*a* – внешний вид соединения; *б* – макрошлиф

После проведенных исследований было установлено, что плазменная сварка по отбортовке на прямой полярности тока возможна без применения защитного газа, а при использовании обратной полярности тока сварку можно осуществлять на плохо подготовленных образцах, также возможна менее точная сборка стыка, чем при прямой полярности.

Качество сварных швов оценивалось внешним осмотром, изготовлением макрошлифов и замером геометрических размеров шва (рис. 4), проверкой на герметичность (керосиновая проба). Кроме того, контролировалась прочность сварного шва на разрыв. Все швы, сваренные на оптимальных режимах, имели усилие разрыва (на 1 мм длины шва) не менее 6 кг/мм (минимально допустимый предел 5 кг/мм) [7]. В табл. 3 приведены режимы сварки, позволяющие получить качественные сварные соединения по отбортовке при высокой производительности процесса.

Таблица 3

Параметры режима плазменной сварки

Диаметр плазмообразующего сопла $d_c$ , мм	Расход плазмообразующего газа $Q_{п}$ , л/мин	Сварочный ток $I_{св}$ , А	Дуговой промежуток $h$ , мм	Расход защитного газа $Q_3$ , л/мин	Скорость сварки $V_{св}$ , м/ч
Прямая полярность					
3,5	1,0	120	6	5 (аргон)	100
3,5	1,0	110	6	6 (CO <sub>2</sub> )	80–90
Обратная полярность					
3,5	1,2	90	6	5 (аргон)	80
4,0	1,4	80–90	4–5	Без защиты	90

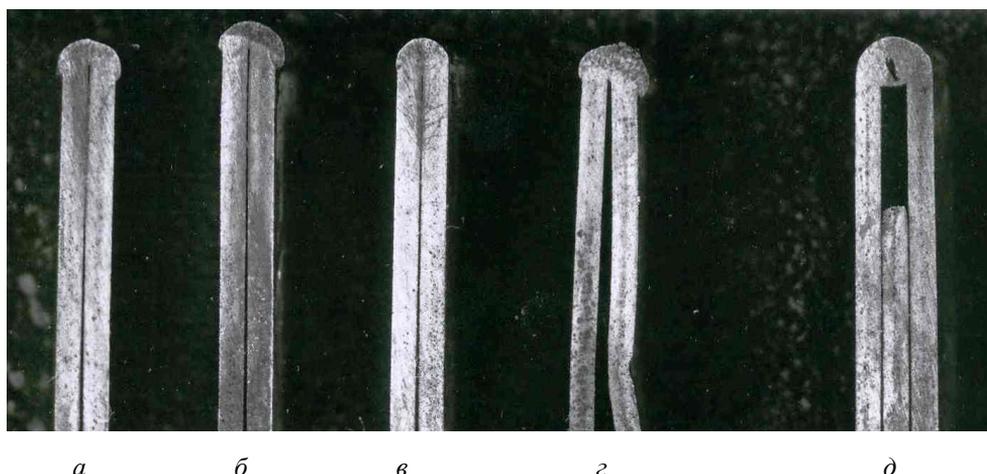


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений:  $a - d_c = 3,5$  мм,  $Q_{п} = 1,0$  л/мин,  $I_{св} = 90$  А,  $h = 6$  мм,  $Q_3$  (аргон) = 4 л/мин,  $V_{св} = 50$  м/ч, полярность обратная;  $б - d_c = 3,5$  мм,  $Q_{п} = 1,0$  л/мин,  $I_{св} = 120$  А,  $h = 6$  мм,  $Q_3$  (аргон) = 5 л/мин,  $V_{св} = 80$  м/ч, полярность обратная, превышение кромок при сборке 1,0 мм;  $в -$  то же, угол между свариваемыми кромками при сборке  $10^\circ$ ;  $г - d_c = 3,5$  мм,  $Q_{п} = 1,2$  л/мин,  $I_{св} = 90$  А,  $h = 6$  мм,  $Q_3$  (аргон) = 4 л/мин,  $V_{св} = 90$  м/ч, полярность прямая;  $д - d_c = 3,5$  мм,  $Q_{п} = 1,0$  л/мин,  $I_{св} = 120$  А,  $h = 6$  мм,  $Q_3$  (аргон) = 5 л/мин,  $V_{св} = 80$  м/ч, полярность обратная, зазор между кромками при сборке 1,2 мм

Таким образом, нами исследована и разработана технология плазменной сварки по отбортовке тонколистового металла типа сталь 09Г2С на токе прямой и обратной полярности, позволяющая получать качественные сварные соединения на высокой скорости сварки.

Рекомендуемые режимы сварки металла толщиной 0,8 мм: полярность прямая, диаметр плазмобразующего сопла  $d_c = 3,5$  мм; расход плазмобразующего газа  $Q_{\text{п}} = 0,8 \dots 1,2$  л/мин; сварочный ток  $I_{\text{св}} = 80 \dots 90$  А; дуговой промежуток  $h = 6$  мм; расход защитного газа ( $\text{CO}_2$ )  $Q_3 = 5 \dots 6$  л/мин; скорость сварки  $V_{\text{св}} = 80 \dots 100$  м/ч.

Показана принципиальная возможность плазменной сварки по отбортовке на токах прямой и обратной полярности с применением различных защитных газов, а также без использования защитного газа. Однако при этом ухудшается внешний вид изделия и требуется частая чистка плазмобразующего сопла, что затруднительно при массовом производстве изделий.

Процесс обладает всеми свойствами, предъявляемыми к массовым способам сварки: доступностью, экономичностью, высокой производительностью и качеством.

### **Список литературы**

1. Wood N., Williams Y. Davies P. Lathain and Twinning. Automatic and robotic welding at BSCS. Cwenfetin Peess Works // Metal construction. – 1980. – P. 36–29.
2. Зевакин М.Ф. Станки для сварки канистр // Автоматическая сварка. – 1971. – № 6. – С. 22–25.
3. Шнеерсон В.Я. Особенности формирования швов при сварке сжатой дугой отбортованных соединений // Автоматическая сварка. – 1982. – № 7. – С. 11–15.
4. Шнеерсон В.Я. Оптимизация режима плазменной сварки отбортованных соединений // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. – 1979. – № 5. – С. 5–12.
5. Синельников Н.Г., Гладков Э.А. Устойчивость процесса формирования швов торцевых соединений // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 3. – С. 58–64.
6. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка. Диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42–45.
7. Шнейдер Б.И., Погребиский Д.М. Испытания на разрыв сварных соединений тонкой фольги // Автоматическая сварка. – 1975. – № 10. – С. 23–26.

Получено 25.04.2014

**Шицын Юрий Дмитриевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru

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

**Кучев Павел Сергеевич** (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: kучев.p@gmail.com

**Неулыбин Сергей Дмитриевич** (Пермь, Россия) – инженер кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru

**Гилев Иван Александрович** – магистрант гр. ТСП-11м Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: navokain@mail.ru

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

**Belinin Dmitry Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru

**Kuchev Pavel Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: kучев.p@gmail.com

**Neulybin Sergei Dmitryevich** (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department “Welding technology and production of construction materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru

**Gilev Ivan Alexandrovich** (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: navokain@mail.ru