

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.3.07

УДК 621.791

**Ю.Д. Щицын, И.А. Гилев, Д.С. Белинин,  
С.Д. Неулыбин, А.М. Баженов**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, г. Пермь, Россия

## **ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ РАБОТЕ ДВУХДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА НА ТОКЕ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ**

Представлены результаты исследования работы двухдугового плазмоторна с использованием двух дуг прямого действия на токе обратной полярности. Показана практическая возможность устойчивой работы плазмоторна в двухдуговом режиме на токе обратной полярности. Проведены сравнительные исследования распределения энергии при работе однодугового и двухдугового плазмоторна на токе обратной полярности. Проведена оценка теплопередачи в изделие, электрод и плазмообразующее сопло плазмоторна. Показано, что при одинаковой мощности теплонагруженные элементы плазмоторна (электрод-анод, плазмообразующее сопло) при работе в двухдуговом режиме испытывают меньшие нагрузки в сравнении с однодуговым режимом. Выявлены оптимальные режимы, обеспечивающие высокую стабильность работы плазмоторна в двухдуговом режиме.

Проведены исследования возможности сварки алюминиевых сплавов комбинированной двойной дугой на токе обратной полярности.

Установлено, что проплавливающая способность возрастает пропорционально мощности сжатой дуги плазмообразующее сопло – изделие.

При сварке двухдуговым плазмоторном улучшается качество катодной очистки поверхности в зоне сварки, что способствует получению бездефектных сварных швов. Использование двух дуг позволяет в широких пределах регулировать форму и размеры поперечного сечения сварного шва. При этом обеспечивается качественное формирование поверхности шва. На примере сварки алюминиевого сплава АМг-6 показаны преимущества сварки двухдуговым плазмоторном алюминиевых сплавов повышенной толщины.

**Ключевые слова:** двухдуговой плазмоторн, обратная полярность, плазменная сварка, алюминиевые сплавы, сжатая дуга, тепловложение, сопло, анод, катодная очистка, теплопередача, калориметрирование.

**Iu.D. Shchitsyn, I.A. Gilev, D.S. Belinin,  
S.D. Neulybin, A.M. Bazhenov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **PLASMA WELDING OF ALUMINUM ALLOYS WHEN TWO ARC PLASMA TORCH AT CURRENT REVERSE POLARITY**

The results of the research work of twin-arc torch using two arcs direct action on the current reverse polarity. Shown the feasibility of stable operation of the plasma torch in the twin-arc mode at current reverse polarity. Comparative studies of the distribution of energy in the single wire and twin-arc

torch at current reverse polarity. The estimation of heat transfer in the product, the electrode and the nozzle of the plasma torch plasma forming. It is shown that for the same power, the plasma torch teplovlonagruzhennye elements (anode electrode, plasma-forming nozzle) when operating in dual-arc mode, experience less load compared with a single mode. Optimal modes, providing high stability of the plasma torch in the twin-arc mode.

Investigations of possible welding of aluminum alloys combined double arch at current reverse polarity.

It was found that the penetrating power increases in proportion to the power of the compressed arc: sopro- plasma-generating product.

In twin-arc plasma torch welding quality is improved cathodic cleaning of the surface in the fusion zone, which contributes to a defect-free welds. The use of two arcs, allows a wide range to control the shape and dimensions of the cross section of the weld. This ensures the formation of high-quality weld surface. For example, welding of aluminum alloy AlMg-6 twin-arc welding The advantages of plasma torch aluminum alloys increased thickness.

**Keywords:** two arc plasmatron, reverse polarity, plasma welding, aluminum alloys, compressed arc, heat input, nozzle, anode, cathodic cleaning, heat transfer, calorimetry.

Рост производства алюминия на сегодняшний день составляет порядка 5–15 % в год. Соответственно растет объем применения сварных конструкций из алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности.

Для изготовления и ремонта изделий из алюминиевых сплавов широко используются сварочные технологии. Наибольшее применение получили дуговые способы сварки: аргонодуговая сварка плавящимся и неплавящимся электродом [1]. Однако использование дуговых технологий сопряжено с рядом проблем: низкая производительность при сварке повышенных толщин; дефектность сварных швов; неравнопрочность сварных соединений и основного металла; трудности при изготовлении габаритных конструкций с различными пространственными расположениями сварных швов; высокие требования к подготовке свариваемого металла; высокие требования к присадочному материалу; специальные требования к производственным условиям (температура, влажность, скорость движения воздуха и пр.) [2]. Кроме того, ряд трудностей возникает в монтажных условиях: при толщинах более 10–15 мм требуется предварительный прогрев зоны соединения; трудность качественной подготовки металла под сварку.

Решить многие проблемы сварки алюминиевых сплавов позволяет плазменная сварка постоянным током обратной полярности [3]. Ряд преимуществ (высокий эффективный КПД нагрева, локальность нагрева, возможность активного управления мощностью дуги) обеспечивает повышение производительности процессов сварки в 2–3 раза; снижение затрат на механическую обработку при подготовке стыков под

сварку и обработку швов после сварки в 3–5 раз; снижение расхода сварочных материалов в 3–5 раз; обеспечение возможности 100%-ной автоматизации процессов [4]. Кроме того, мощная катодная очистка металла в процессе плазменной сварки на обратной полярности обеспечивает получение качественных сварных швов при снижении требований к подготовке металла под сварку [5, 6].

Дальнейшее повышение производительности сварочных процессов при высоком качестве сварных соединений из алюминиевых сплавов связано с разработкой комбинированных способов, предполагающих использование двух и более источников нагрева в зоне сварки.

На сегодняшний день исследован комбинированный вариант сварки алюминиевых сплавов с использованием двухдугового плазмотрона: одна дуга прямой полярности горит между вольфрамовым электродом и соплом (дежурная дуга), вторая дуга обратной полярности (основная) горит между плазмообразующим соплом и обрабатываемым изделием. Ток основной дуги 60–65 А, ток дежурной дуги изменялся в пределах 30–200 А [7].

Недостатками способа являются высокая теплонагруженность плазмообразующего сопла вследствие того, что сопло является анодом от двух дуг, ограниченная регулировка мощности дуги связана с тем, что дуга, горящая с сопла-анода плазмотрона на изделие, маломощная.

Целью данной работы являлось исследование способа плазменной сварки алюминиевых сплавов с использованием двух дуг прямого действия обратной полярности.

Основными параметрами, влияющими на проплавляющую способность плазменной дуги, являются величины и соотношения токов двух дуг, расхода плазмообразующего газа, диаметра и длины канала сопла.

Плазменная сварка проводилась с использованием двух независимых дуг обратной полярности. Первая дуга подключена на обратной полярности и горит с электрода-анода плазмотрона на изделие, вторая дуга, также на токе обратной полярности горит с сопла плазмотрона на изделие. Структурная схема комбинированной плазменной дуги представлена на рис. 1. Оценивалось тепловложение при работе двух дуг в изделие и элементы плазмотрона.

Питание дуг 9 и 10 осуществлялось от двух отдельных источников питания 7 и 8 соответственно. Дуга прямого действия 9 горит между медным водоохлаждаемым анодом 1 и изделием 6. Дуга прямого действия 10 горит между соплом-анодом 2 и изделием 3.

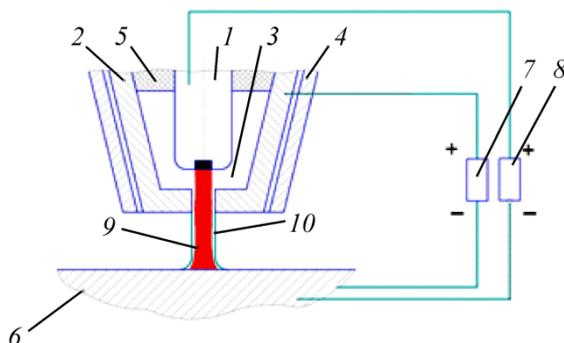


Рис. 1. Структурная схема комбинированной плазменной дуги: 1 – электрод-анод; 2 – плазмообразующее сопло (кольцевой анод); 3 – плазмообразующая камера; 4 – защитное сопло; 5 – изолятор; 6 – изделие; 7 – источник питания дуги сопло – изделие; 8 – источник питания дуги электрод – изделие; 9 – сжатая дуга электрод – изделие; 10 – сжатая дуга сопло – изделие

Работы выполнялись в следующей последовательности: проведены сравнительные исследования распределения энергии при работе однодуговым и двухдуговым плазмотроном на токе обратной полярности. Методом калориметрирования оценивалась тепловая мощность, вводимая в изделие, электрод и плазмообразующее сопло плазмотрона. В качестве изделия использовался медный водоохлаждаемый имитатор. В табл. 1 и 2 представлены результаты измерений тепловложения в элементы плазмотрона и изделие при работе однодуговым и двухдуговым способами подключения плазмотрона.

Таблица 1

Тепловложение в элементы плазмотрона и изделие при работе однодуговым плазмотроном

$I_1$	$P_{из}$	$P_{пл}$	$\Sigma P_d$	$P_a$	$P_{с1}$
50,00	270,97	252,00	1200,00	175	77,00
100,00	1490,32	840,00	2900,00	342	498,00
150,00	2845,16	1596,00	5100,00	525	1071,00
200,00	4470,97	2688,00	7200,00	976	1712,00
250,00	5900,00	3397,06	8625,00	1204	2193,00
300,00	6800,00	4261,76	10500,00	1620	2640,00

В результате проведенных исследований установлено следующее: тепловложение в электрод-анод плазмотрона при работе в двухдуговом режиме определяется теплопередачей от дуги, горячей

с электрода плазмотрона на изделие, при этом вторая дуга не оказывает влияния на тепловложение в электрод-анод. Установлено, что тепловложение в плазмообразующее сопло при работе в двухдуговом режиме не превышает тепловложения при работе плазмотрона в однодуговом режиме. Тепловложение в изделие при работе плазмотрона в двухдуговом режиме примерно равно работе плазмотрона в однодуговом режиме при одинаковой мощности дуг. Тепловложение в сопло-анод плазмотрона увеличивается пропорционально току второй дуги.

Таблица 2

Тепловложение в элементы плазмотрона и изделие при работе двухдуговым плазмотроном

$I_2$	$I_1$	$P_{из}$	$P_{пл}$	$\Sigma P_d$	$P_{д, 2-й}$	$P_a$	$P_{с1}$	$P_{с2}$	$P_{а-с}$
50	<u>60,00</u>	1083,87	840	2300	1100	175	77,00	665	588
100	60,00	1625,81	1260	3500	2200	175	77,00	1085	1008
150	60,00	3251,61	1680	4800	3450	175	77,00	1505	1428
100	<u>150,00</u>	4064,52	2268	7850	2600	525	1071,00	1743	672
150	150,00	4877,42	2772	9450	3750	525	1071,00	2247	1176
180	<u>150,00</u>	5690,32	3276	10560	4500	525	1071,00	2751	1680

*Примечание.*  $I_1$  – ток дуги, горящей с электрода на изделие, А;  $I_2$  – ток дуги, горящей с сопла на изделие, А;  $P_{изд}$  – тепловложение в изделие, Дж;  $P_{пл}$  – тепловложение в плазмотрон, Дж;  $P_d$  – мощность дуги, Дж;  $P_{сум}$  – суммарное тепловложение в плазмотрон и изделие, Дж;  $P_{д, 2-й}$  – мощность второй дуги, Дж;  $P_a$  – тепловложение в электрод-анод, Дж;  $P_{с1}$  – тепловложение в сопло от первой дуги, Дж;  $P_{с2}$  – тепловложение в сопло от двух дуг, Дж;  $P_{а-с}$  – тепловложение в сопло-анод, Дж.

Далее оценивали возможность плазменной сварки алюминиевого сплава АМг-6 двухдуговым способом. В качестве рабочего инструмента использовался универсальный плазмотрон и блок плазменной сварки, разработанные на кафедре сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета. Питание двух дуг осуществлялось от двух источников. В качестве защитного и плазмообразующего газа применялся аргон. Свариваемым изделием служили пластины толщиной 10 мм. В результате определены благоприятные режимы плазменной сварки двухдуговым плазмотроном на токе обратной полярности. Параметрами режима являлись ток дуги, диаметр плазмообразующего сопла, скорость сварки, расход плазмообразующего и защитного газов, рас-

стояние от среза сопла до изделия, представленные в табл. 3. Контрольными параметрами являлись глубина и ширина наложения валиков.

Таблица 3

Режимы плазменной сварки на обратной полярности

Варианты сварки	$I_1$	$I_2$	$d_c$	$v_{св}$	$Q_{п}$	$Q_3$	$h_{с-и}$
1	150	–	6,5	15,7	5,2	4,2	5
2	150	150	6,5	15,7	5,2	4,2	5
3	180	–	6,5	23	5,2	4,2	5
4	180	120	6,5	23	5,2	4,2	5

*Примечание.*  $I_1$  – сила тока сжатой дуги, горящей с электрода-анода плазмотрона на изделие, А;  $I_2$  – сила тока сжатой дуги, горящей с сопла-анода плазмотрона на изделие, А;  $d_c$  – диаметр плазмобразующего сопла, мм;  $v_{св}$  – скорость сварки, м/ч;  $Q_{п}$  – расход плазмобразующего газа, л/мин;  $Q_3$  – расход защитного газа, л/мин;  $h_{с-и}$  – расстояние от среза сопла до изделия.

На рис. 2 и 3 показаны макроструктурные исследования алюминиевых образцов.

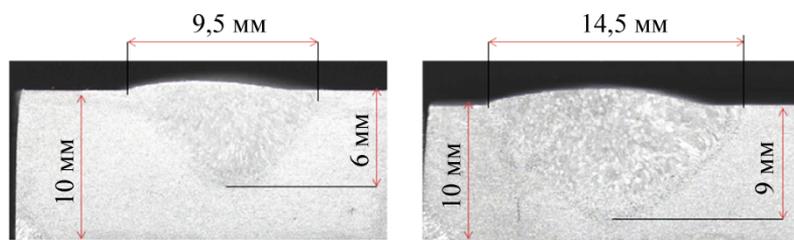


Рис. 2. Макроструктура ( $\times 2$ ) алюминиевых образцов (1, 2):  
 а – однодуговой режим работы,  $I = 150$  А; б – двухдуговой режим,  
 $I_1 = 150$  А,  $I_2 = 150$  А

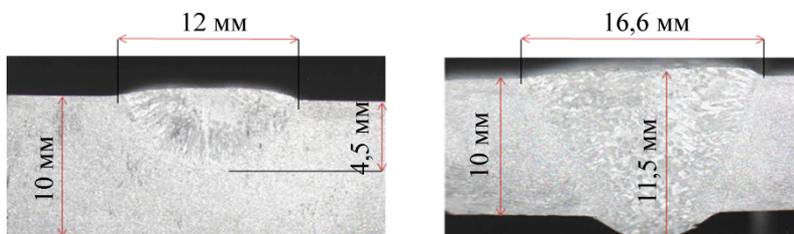


Рис. 3. Макроструктура ( $\times 2$ ) алюминиевых образцов (3, 4):  
 а – однодуговой режим работы,  $I = 180$  А; б – двухдуговой режим,  
 $I_1 = 180$  А,  $I_2 = 120$  А

В результате исследований макроструктуры установлено, что использование комбинации дуг при сварке током обратной полярности позволяет увеличить ширину и глубину проплавления, обеспечить качественное формирование сварного шва. При использовании плазменной сварки током обратной полярности с комбинацией двух дуг удается увеличить ширину зоны катодного воздействия более чем в 1,5 раза по сравнению с использованием одной дуги прямого действия обратной полярности.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность устойчивой работы плазмотрона с двумя дугами прямого действия при сварке током обратной полярности, горящими с электрода плазмотрона на изделие и с плазмообразующего сопла на изделие.

2. Установлено, что в отличие от однодугового режима работы плазмотрона при предлагаемой схеме подключения тепловложение распределяется на электрод и кольцевой анод, что позволяет значительно снизить нагрузку на электрод.

3. Проведено исследование плазменной сварки алюминиевого сплава АМг-6 с использованием двухдугового плазмотрона на токе обратной полярности.

4. Показано, что использование комбинации дуг при сварке током обратной полярности позволяет увеличить ширину и глубину проплавления в 1,5–2,5 раза, также увеличивается зона катодной очистки, отсутствуют дефекты, обеспечивается качественное формирование сварного шва.

5. Данный способ плазменной сварки двухдуговым плазмотроном на токе обратной полярности можно порекомендовать для сварки алюминиевых и магниевых сплавов.

### **Список литературы**

1. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов / отв. ред. В.Н. Замков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1990. – 512 с.

2. Щицын Ю.Д. Плазменная сварка алюминиевых сплавов // Вестник Пермского государственного технического университета. Сварка. – Пермь, 2002. – С. 231–245.

3. Николаев В.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П. Свариваемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.

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

5. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – Ч. 1. – 73 с.

6. Плазменная сварка алюминиевых сплавов повышенных толщин / Ю.Д. Щицын, И.Л. Синани, Д.С. Белинин, П.С. Кучев, В.Ю. Щицын // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 27–31.

7. Редчиц А.В., Овчинников В.В. Повышение энергетической эффективности плазменной сварки // Сварочное производство. – 2004. – № 8. – С. 21–23.

### References

1. Gurevich S.M., Castles V.N. Spravochnik po svarke tsvetnykh metallov [Manual welding non-ferrous metals]. Kiev: Naukova dumka, 1990. 512 p.

2. Shchitsyn Iu.D. Plazmennaiia svarka aliuminievykh splavov [Plasma welding of aluminum alloys]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Svarka*, 2002, pp. 231-245.

3. Nikolaev V.A., Fridliander I.N., Arbuzov Iu.P. Svarivaemye aliuminievye splavy [Weldable aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiiia, 1990. 296 p.

4. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Features plasma processing of metals current reverse polarity]. *Svarka i diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42-45.

5. Shchitsyn Iu.D. Plazmennye tekhnologii v svarochnom proizvodstve [Plasma technology for welding]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004. Vol. 1. 73 p.

6. Shchitsyn Iu.D., Sinani I.L., Belinin D.S., Kuchev P.S., Shchitsyn V.Iu. Plazmennaiia svarka aliuminievykh splavov povyshennykh tolshchin [Plasma welding of aluminum alloys, high-tol communities]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2014, no. 1, pp. 27-31.

7. Redchits A.V., Ovchinnikov V.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti plazmennoi svarki [Improving the energy efficiency of plasma welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 8, pp. 21-23.

Получено 29.06.2015

### **Об авторах**

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

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

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

**Баженов Александр Михайлович** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: navokain@mail.ru.

### **About the authors**

**Iuri D. Shchitsyn** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department “Welding Technology and Production of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

**Ivan A. Gilev** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department “Welding Technology and Production of Structural Materials” Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ivan.giliev@mail.ru.

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

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

**Aleksandr M. Bazhenov** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department “Welding Technology and Production of Structural Materials” Perm National Research Polytechnic University; e-mail: navokain@mail.ru.