

Исследование радиального распределения плотности тока в анодном пятне плазменной дуги

А.А.О.Аль-Шамки¹, А.Ф.Шепелев², В.И. Финаев¹, И.В.Пушнина¹

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

² Политехнический институт Донского государственного технического университета, Таганрог

Аннотация: в статье выполнен обзор источников с результатами исследования процессов дуговой сварки, обоснована актуальность исследований радиального распределения плотности тока в анодном пятне плазменной дуги. Приведены результаты исследования радиального распределения плотности тока по активному пятну на плоскостных водоохлаждаемых зондах, являющихся одним из электродов дуги, а также результаты исследований преобразования данных плоскостного зонда в радиальное распределение аксиально-симметричной функции. Экспериментально получены функции радиального распределения плотности тока и характеристики распределения плотности тока.

Ключевые слова: плазменная сварка, система управления, вольтамперная характеристика, защитный газ, схемы горелок, плазменная дуга, зондирование.

Актуальность и цель исследования. Управление дугой плазменной сварки можно отнести к сложным процессам. Для процесса плазменной сварки получить адекватную математическую модель, т.е. модель описывающую процесс сварки достаточно точно невозможно. Дуга плазменной сварки – это процесс горения, а процессы горения не имеют точного математического описания.

Целями исследования являются выполнение аналитического обзора результатов исследования процессов дуговой сварки, исследование радиального распределения плотности тока по активному пятну на плоскостных водоохлаждаемых зондах, исследование преобразования данных плоскостного зонда в радиальное распределение аксиально-симметричной функции выполнено программным путем.

Введение. Проблемы управления дуговой сваркой остаются актуальными, хотя в настоящее время имеется достаточно много сварочных аппаратов и систем управления [1 - 3] сварочными процессами, однако, задачи систем управления сварочными процессами остаются актуальными.

Действительно управление сварочным процессом является многокритериальным управлением. Сама по себе задача многокритериальная задача управления является сложной задачей и часто не имеющей однозначного решения, а учитывая, что система автоматического управления создается с учетом аналитической модели процесса, то это другая проблема. Сварочный процесс связан с горением, а для процессов горения аналитические модели не существуют. Можно посчитать количество выделяемого тепла, но это не будет иметь никакого отношения к управлению процессом сварки.

Если ставить задачу управления процессом сварки и разработки соответствующей системы автоматического управления (САУ) этим процессом, то надо исходить из определения и структуры автоматической системы управления, в составе которой имеется объект управления и регулятор [3, 4], как показано на рис. 1.

Вектор возмущений F можно попытаться как-то идентифицировать путем проведения экспериментов, а выходной параметр может быть скалярной величиной или векторной величиной и напрямую связан с качеством сварки. Управление в САУ реализуется в соответствии с выбранным критерием, управление может быть по отклонению, по состоянию или комбинированное управление.

Так как находить адекватные математические модели для реализации автоматического управления сваркой достаточно трудно, то следует уделить внимание постановке и экспериментов и обработке их результатов с целью поиска эвристических закономерностей, которые могут быть учтены при проектировании САУ процессом сварки.



Рис. 1. Общая структура системы автоматического управления: X - вектор управляющих воздействий; Z - вектор состояний; F - вектор возмущений; Y - вектор выходных параметров

Аналитический обзор результатов исследования процессов дуговой сварки. Рассматривать будем плазменную сварку, которая может происходить при разной степени сжатия дуги, при разной плотности тока, разной толщине свариваемого материала и при различных значениях других параметров. Как физический процесс, плазменная сварка может иметь модели, но, как было отмечено выше, проблема состоит в полноте модели, т.к. каждая модель, как объект-заменитель объекта-оригинала обладает самой разной степенью полноты, т.е. степенью адекватности реальному физическому процессу плазменной сварки. Убедиться в том, что найденная модель адекватна и с какой степенью адекватна реальному процессу можно только выполняя многочисленные эксперименты и обрабатывая их результаты.

Выполним аналитический обзор ряда научных работ, в которых исследованы процессы дуговой сварки.

В работе [5] рассмотрены варианты реализации процесса плазменной дуговой сварки, зондирования, управления и численного моделирования плазменного сквозного проплавления в средне толстой нержавеющей стали (9,5 – 12,5 мм). Исследовано сквозное проплавление с применением очень суженной дуги, чтобы произвести сквозное проплавление внутрь сварочной ванны. Показано, что стабильность сквозного проплавления - один из

критических факторов, влияющих на качество сварки. Отмечена необходимость более глубокого изучения сквозного проплавления способов управления процессами сварки для повышения их стабильности.

Также работа [6] посвящена исследованию плазменной дуговой сварки с сильно сжатой дугой для получения сквозного проплавления внутри расплавленного бассейна. Показано, что эффективность процесса плазменной дуговой сварки значительно выше по сравнению с традиционным процессом сварки вольфрамовым газом. Определено, что исследования должны быть связаны со стабильностью сквозного проплавления, теплопередачей и поведением потока текучей среды.

В работе [7] изложена «компенсирующая биэллиптическая» модель сложной формы сварного шва, объясняющая плавление электродов и образование сварных швов при дуговой сварке под напряжением переменного тока. Модель дает высокую степень точности при прогнозировании. Исследования показали, что плавление и проникновение электрода являются интегральными результатами дуговых явлений. Исследования выполнены для горизонтального развертывания для разработки или улучшения существующих моделей сварных швов.

В работе [8] показаны результаты численного моделирования тепловых явлений с движением зоны плавления в сварочном бассейне в процессе гибридной сварки с использованием YAG-лазера с электрической дугой в методе GMAW. Гибридная модель источника тепла разработана на основе классической модели Голдака для электрической дуги и интерполяционной модели для лазерного луча с учетом экспериментальных данных распределения луча YAG. Компьютерное моделирование поля температурного поля и поля скорости расплавленного материала выполняется в сварочном бассейне для разных расстояний между источниками тепла. Проведено сравнение численной расчетной геометрии

характерных зон суставов с макроскопическими изображениями поперечных сечений сварных швов для оценки пригодности разработанной численной модели в промышленных применениях.

Выполненный анализ показывает актуальность исследований радиального распределения плотности тока в анодном пятне плазменной дуги, т.к. адекватные аналитические модели плазменной сварки получить сложно, поэтому важна роль и результаты экспериментальных исследований, на основе которых можно проектировать системы управления сварочными процессами.

Результаты экспериментов. Плотность тока в активных пятнах дуги - один из параметров, который достаточно часто применяют для оценки воздействия на свариваемый металл [9, 10]. При проведении экспериментов применена методика, изложенная в работе [11], которая позволяет проводить исследования радиального распределения плотности тока по активному пятну на плоскостных водоохлаждаемых зондах, являющихся одним из электродов дуги. При применении этого метода можно получать более точные результаты, т.к. измерение плотности тока осуществляется непосредственно в активном пятне дуги, а размеры зазора между плоскостными зондами могут быть существенно меньшими, чем размеры линейного или точечного зонда.

На рис. 2 показана схема примененной экспериментальной установки, которая включает в себя сварочную установку, плоскостной зонд, контрольно-измерительную и регулируемую аппаратуру.

В качестве источника питания плазменной дуги применен источник установки УПС-804 УХЛ4. Напряжение дуги измеряли вольтметром класса 0,5, ток - амперметром класса 0,1. Распределение тока в зонде определяли на осциллографе с магазином добавочных сопротивлений и шунтов.

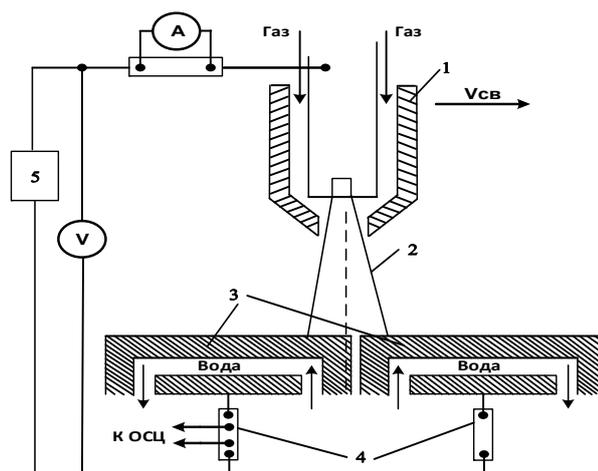


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для изучения распределения плотности тока по активному пятну: 1 - плазматрон; 2 - плазменная дуга; 3 - секции анода; 4 - шунты; 5 - источник питания

Скорость движения зондов составляла V_z - 4,2 м/с, скорость развертки - $V_p=0,25$ м/с. Скорость движения зондов выбиралась из условия термической стойкости анода. На рис. 3 приведен вид осциллограммы с характером изменения тока.

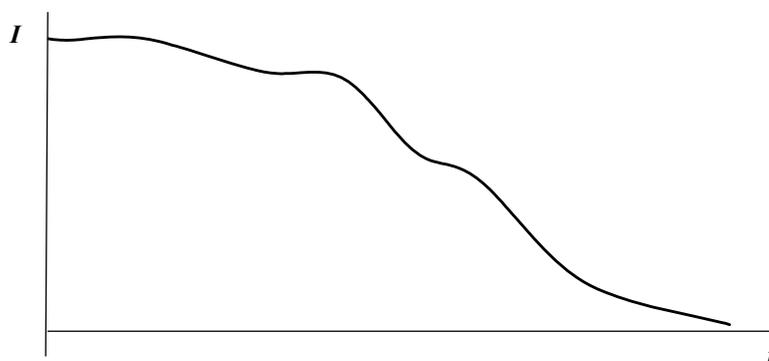


Рис. 3. Осциллограмма изменения тока

Функции радиального распределения тока показаны на рис. 4. Функция $F(x)$ – показывает, что при движении активного пятна дуги через зазор между зондами во втором зонде происходит рост тока. На рис. 5 показано определение распределения плотности тока $j(r)$.

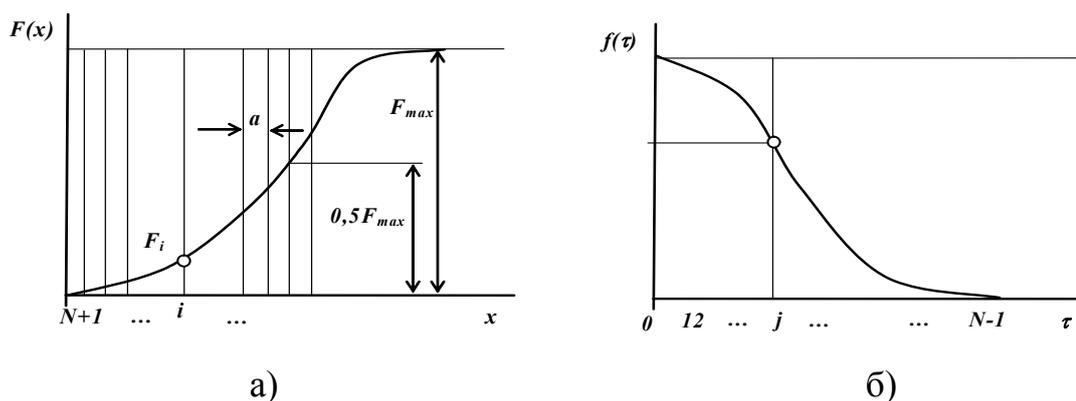


Рис. 4. Функции радиального распределения

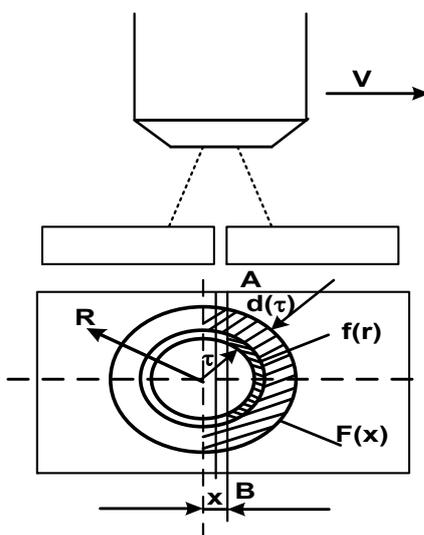


Рис. 5. Схема определения радиального распределения плотности тока

Радиус R - расстояние от оси дуги, при котором плотность тока убывает до нуля. Хорда AB - воздушный зазор, разделяющий зонды. Если дуга является аксиально симметричным источником, то значение $F(x)$ определяется через радиальную функцию $f(r)$, соответствующую радиальному распределению плотности тока.

Связь между функциями $F(x), f(r)$ определена выражением [12]:

$$F(x) = 2 \int_x^R f(r) r \cdot \arccos\left(\frac{x}{r}\right) dr, \quad (1)$$

где x - расстояние от оси дуги до зазора; R - радиус анодного пятна; r - текущий радиус элементарного кольца шириной d_r .

Это выражение приводится к уравнению Абеля [12]:

$$\varphi(x) = 2 \int_x^R \frac{f(r)dr}{\sqrt{r^2 - x^2}}, \quad (2)$$

Так как

$$\varphi(x) = -F(x). \quad (3)$$

то решение интегрального уравнения (2) относительно $f(r)$ будет иметь вид:

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_x^R \frac{\varphi(x)dx}{\sqrt{r^2 - x^2}} = -\frac{1}{\pi} \int_x^R \frac{F(x)dx}{\sqrt{r^2 - x^2}}, \quad (4)$$

Нахождение интеграла в уравнении (4) происходит численным методом [9, 13]. Ось X делится на зоны равной ширины, как показано на рис. 4.

Допустим, что $a=R/N$; $x=ia$; $r=ja$, причем $\varphi_i = \varphi(ia)$, $F_i = F(ia)$. Уравнение (2) приводим к виду:

$$f(r) = \frac{1}{\pi a^2} \sum_{i=j}^{N-1} (F_{i-2} + F_{i+1} + F_{i-1}) A_{j,i}, \quad (5)$$

где

$$A_{j,i} = \frac{\sqrt{(i+1)^2 - j^2}}{2i+1} - \dots - \frac{\sqrt{i^2 - j^2}}{2i+1}. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) использованы при составлении алгоритма преобразования экспериментальных данных $F(x)$ в радиальное распределение плотности тока $f(r)$.

Так как в (4) входит вторая производная, то при численном дифференцировании даже при незначительных ошибках в исходных данных, получается большой разброс расчетных значений $f(r)$, что может исказить картину действительного распределения $i(r)$ [9].

Так как экспериментальная кривая достаточно гладкая, то можно при разбиении оси x на большое число отрезков применить предварительное сглаживание экспериментальной кривой $F(x)$ опыта. Хорошие результаты

обеспечивает сглаживание многочленом первой степени по трем точкам [1, 6].

$$\begin{aligned}F_i &= (1/3) (F_{i-1} + F_i + F_{i+1}); \\F_{i-1} &= (1/6)(5F_{i-1} + 2F_i - F_{i+1}); \\F_{i+1} &= (1/6) (5F_{i+1} + 2F_i - F_{i-1});\end{aligned}\quad (7)$$

Преобразование данных плоскостного зонда в радиальное распределение аксиально-симметричной функции осуществляется алгоритмически. При обработке экспериментальных данных получены кривые радиального распределения плотности тока по пятну нагрева плазменного разряда. Изменяемые параметры - параметры режима, конструкции горелки, плазмообразующего газа. Полученные функции радиального распределения плотности тока в анодном пятне нагрева показаны на рис. 6.

Полученные кривые распределения можно аппроксимируются законом нормального распределения.

$$j(r) = j_{max} \exp(-Kr^2), \quad (8)$$

где j_{max} - максимальное значение плотности тока в пятне дуги, которое определялась из эмпирических кривых распределения; K - коэффициент сосредоточенности; r - текущий радиус.

Условный радиус активного пятна определялся по формуле [14]

$$r = \sqrt{\frac{3}{K}}, \quad (9)$$

где

$$K = \frac{\pi f_{max}}{F_{max}}. \quad (10)$$

Варьирование параметров режима плазменной сварки влияет на характер распределения плотности тока в пятне нагрева. Увеличение тока дуги приводит к возрастанию максимальной плотности тока j_{max} при

одновременном росте размера активного пятна, а коэффициент сосредоточенности снижается, как показано на рис. 6а, кривые 1, 2, рис. 7а.

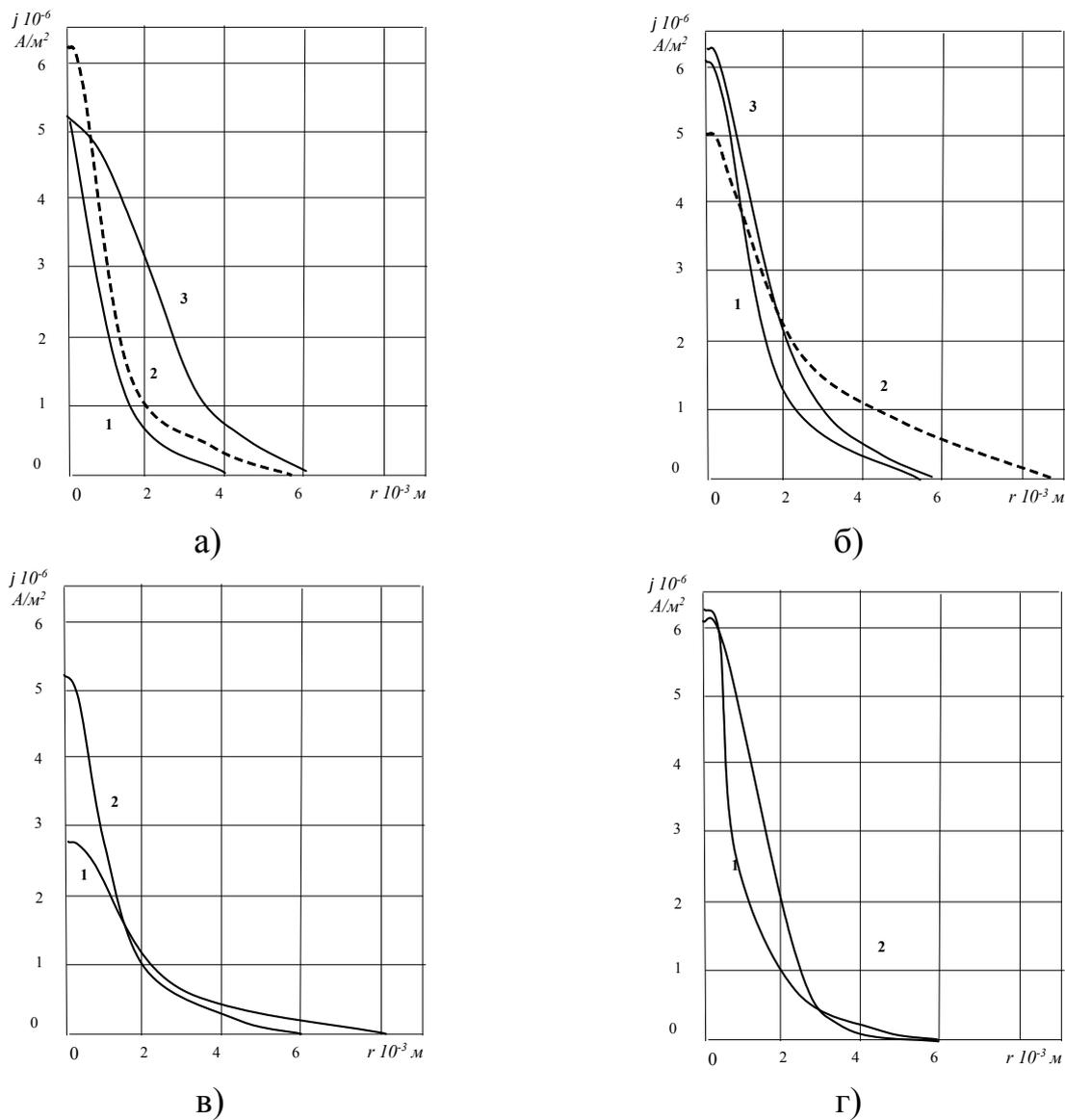


Рис. 6. Функции радиального распределения плотности тока в анодном пятне нагрева от: а), б) параметров режима - а) 1 – $I_{nl}=100\text{A}$; 2 - $I_{nl}=200\text{A}$; при $d_c=8\text{ мм}$; $g_{nl.z}=0,36\text{ г/с}$; 3 $d_c=10\text{ мм}$ при $I_{nl}=200\text{A}$, $g_{nl.z}=0,36\text{ г/с}$; б) $L_{c-u}=10\text{ мм}$; 2 – $L_{c-u}=20\text{ мм}$; при $I_{nl}=200\text{A}$; $d_c=8\text{ мм}$; $g_{nl.z}=0,36\text{ г/с}$; 3 - $g_{nl.z}=0,66\text{ г/с}$; при $I_{nl}=200\text{A}$; $d_c=8\text{ мм}$; $L_{c-u}=10\text{ мм}$; в) конструкции горелки - 1 для стабилизированной дуги; 2 для сжатой дуги; г) рода плазмообразующего газа - 1 - Ar ; 2 - CO_2 при $I_{nl}=200\text{A}$; $d_c=8\text{ мм}$; $L_{c-u}=10\text{ мм}$; $g_{nl.z}=0,36\text{ г/с}$.

При уменьшении диаметра сопла увеличивается j_{max} в активном пятне, диаметр активного пятна уменьшается, коэффициент сосредоточенности увеличивается, как показано на рис. 6а, кривые 2, 3, рис. 7б.

С увеличением длины дугового разряда j_{max} уменьшается, диаметр активного пятна увеличивается. Величина коэффициента сосредоточенности при этом снижается, как показано на рис. 6б, кривые 1, 2, рис. 7в.

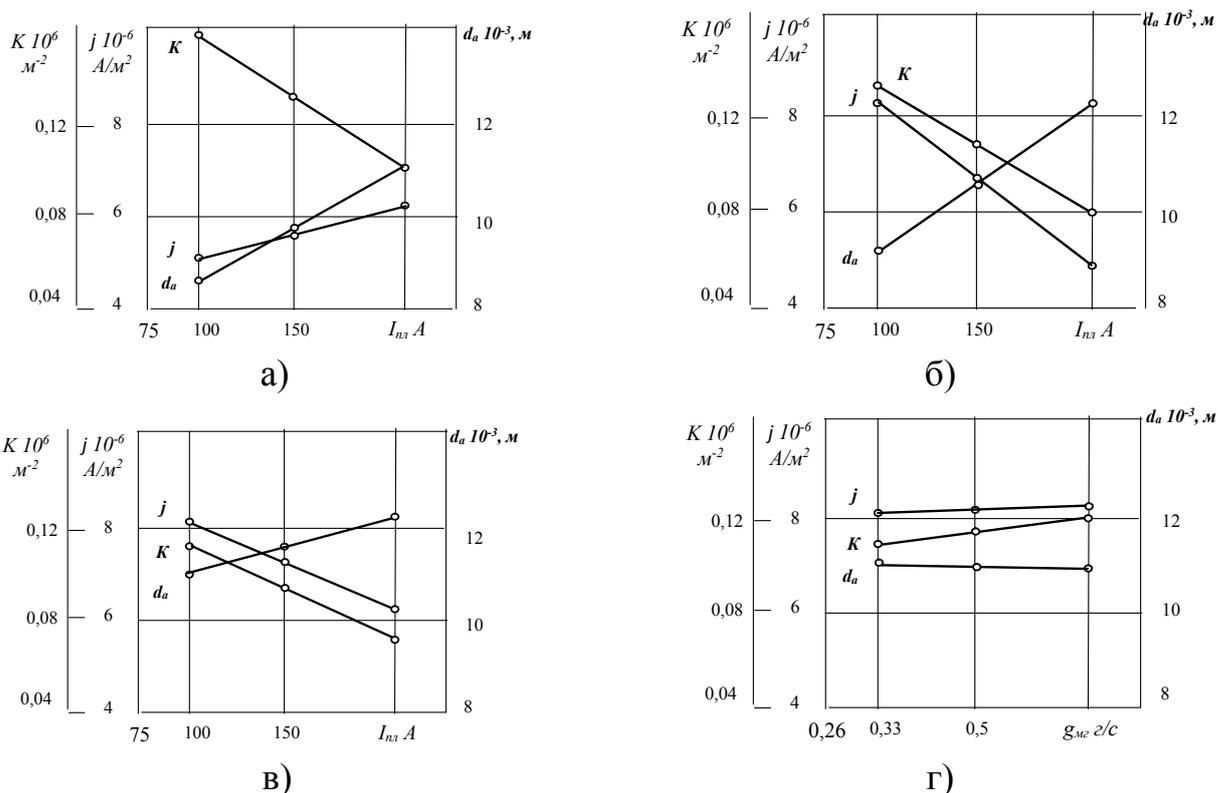


Рис. 7. Характеристики распределения плотности тока в зависимости от тока: а) при $d_c=8$ мм; $g_{nl,z} - 0,33$ г/с; $L_{c-u}=10$ мм; б) от диаметра формирующего сопла при $I_{nl}=200$ А; $g_{nl,z}=0,66$ г/с; $L_{c-u}=10$ мм; в) от длины дугового разряда при $I_{nl}=200$ А; $d_c=8$ мм; $g_{nl,z}=0,33$ г/с; г) от расхода плазмообразующего газа при $I_{nl}=200$ А; $d_c=8$ мм; $L_{c-u}=10$ мм.

При увеличении расхода плазмообразующего газа увеличивается значение j_{max} , а диаметр активного пятна уменьшается. Коэффициент сосредоточенности повышается незначительно, что следует из рис. 6б, кривые 2, 3, рис. 7г.

Применение горелки для стабилизированной дуги показывает, что стабилизированная плазменная дуга имеет меньшую по сравнению с

плазменной дугой максимальную плотность тока в активном пятне при одних и тех же параметрах режима, как показано на рис. 6в. При увеличении тока дуги происходит увеличение диаметра активного пятна и снижение коэффициента сосредоточенности, как показано на рис. 8.

Исследование влияния рода плазмообразующего газа показало, что при одних и тех параметрах режима сварка максимальная плотность тока наблюдается при использовании в качестве плазмообразующего газа CO_2 (см. рис. 6 г).

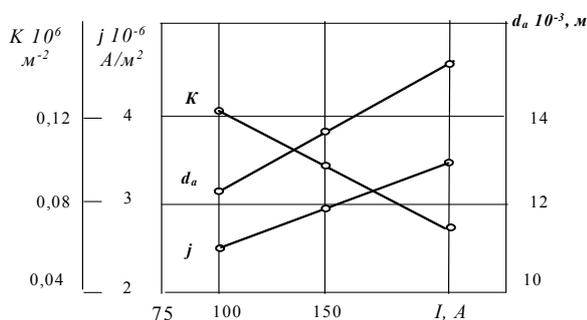


Рис. 8. Характеристика распределения плотности тока от тока при применении горелки для стабилизированной дуги при $d_c=8$ мм; $g_{пл.г}=0,33$ г/с; $L_{c-u}=10$ мм.

Диаметр активного пятна и коэффициент сосредоточенности при использовании в качестве плазмообразующего газа CO_2 меньше по сравнению с применением газа Ar (см. табл. 1), что связано с разными теплофизическими свойствами плазмообразующего газа.

Таблица 1

Характеристики распределения плотности тока

Характеристики	Плазмообразующий газ	
	CO_2	Ar
$J10^6, \text{A/m}^2$	5,06	3,76
$K 10^6, \text{m}^{-2}$	0,08	0,06
$da 10^{-3}, \text{m}$	12,14	14,14

Примечание $I=200$ А; $d_c=8$ мм; $g=0,33$ г/с; $L_{c-u}=20$ мм; прямая полярность.

Применение в качестве плазмообразующего газа CO_2 обладающего большой тепло- и электропроводностью, способствует сжатию активного пятна, повышению плотности тока в нем и, следовательно, электромагнитного давления дуги на жидкий металл в сварочной ванне, что увеличивает проплавляющую способность дуги.

Выводы. Выполненные исследования и полученные экспериментальные данные представляют интерес для реализации системы автоматического управления процессом плазменной сварки.

Эксперимент показал, что для плазменной и стабилизированных дуг при применении CO_2 , независимо от размеров и формы канала сопла, катода, материала электродов и параметров режима, статические вольтамперные характеристики при токах до 80 - 100 А имеют нелинейный, а при токах – 100 - 400 А линейный участок.

Применение поперечного зондирования плазменной дуги при уменьшении диаметра формирующего сопла вызывает увеличение расхода плазмообразующего газа из-за роста радиальных потерь тепловой энергии, что вызывает рост градиента потенциала столба дуги. Присадочная проволока и пары расплавленного металла оказывают охлаждающее действие на столб плазменной дуги, а это вызывает рост градиента потенциала. В плазменной дуге с газом CO_2 диаметр токопроводящего капала в меньшей степени зависит от длины дуги, чем в свободной и стабилизированной дугах.

Применение газа CO_2 в качестве плазмообразующей среды способствует сжатию активного пятна и повышает максимальную плотность тока в нем.

Литература

1. Установка для плазменной сварки УПС 804 УХЛ4.
URL: weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding/293-plasma-welding-facility.
 2. Гаврилов А.И., Мин Мин Тун, Ситу Аунг Сое, Тхет Аунг.
Адаптивная система управления сварочным оборудованием // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2385.
 3. Мещеряков В.М., Косенко Е.Е., Косенко В.В., Крымский В.С. Обзор способов сварки элементов кузовов автомобилей // Инженерный вестник Дона, 2018, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4702.
 4. Справочник по теории автоматического регулирования/Под ред. Красовского А.А. – М.: Наука, 1987. - 712 с.
 5. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang. Plasma arc welding Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. Journal of Manufacturing Processes. Volume 23, August 2016, pp. 315-327.
 6. Das Benjamin, Yadaiah N., Ozah Rupshree, Chowdhury Sohini, Mondal Arpan Kumar, Muralidhar M. A Perspective Review on Estimation of Keyhole Profile during Plasma Arc Welding Process. Material today: proceedings. Volume 5, Issue 2, Part 1, 2018, pp. 6345-6350.
 7. Choudhury Sanatan, Sharma Abhay, Mohanty Uttam Kumar, Kasai Ryu, Komura Masaharu, Tanaka Manabu, Suga Tetsuo Mathematical model of complex weld penetration profile: A case of square AC waveform arc welding. Journal of Manufacturing Processes. Volume 30, December 2017, pp. 483-491.
 8. Piekarska Wiesława, Kubiak Marcin, Vaško Milan Numerical Estimation of the Shape of Weld and Heat Affected Zone in Laser-arc Hybrid Welded Joints. Procedia Engineering. Volume 177, 2017, pp. 114-120.
-

9. Киселев Ю.А., Погора В.К. Исследование радиального распределения плотности теплового потока в опорных пятнах плазменной режущей дуги / ИФЖ, 1990, Т. 56, №6. - С. 892 - 896.

10. Домбровский Ю.М. Согласование характеристик источника питания и дуги при плазменном нагреве со сканированием / Сварочное производство. 1997, №8. - С. 22 – 24.

11. Заяров Ю.В., Сысолятин А.А., Боженко Б.Л. Газодинамическое воздействие на дугу при плазменной сварке / Сварочное производство, 1995, №11. - С. 20 - 21.

12. Боженко Б.Л. Теория сварочных процессов: Учебное пособие. - Новочеркасск, НГТУ, 1996. - 119 с.

13. Wang C.S.WuL., Ren W.J., Zhang X.Y. Plasma arc welding Process, sensing, control and modeling. Journal of Manufacturing Processes. Volume 16, Issue 1, January 2014. - PP. 74 - 85.

14. Куликов В.П. Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. - 463 с.

References

1. Ustanovka dlya plazmennoy svarki UPS 804 UKHL4. [Installation for plasma welding of UPS 804 UHL4]. URL: weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding/293-plasma-welding-facility.

2. Gavrilov A.I. Min Min Tun, Situ Aung Soe, Thet Aung. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2385.

3. Meshcheryakov V.M., Kosenko E.E., Kosenko V.V., Krymsky V.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4702.

4. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo regulirovaniya. [Handbook of Automatic Control Theory]. Pod red. Krasovskogo A.A. M.: Nauka, 1987. 712 p.

5. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang. Plasma arc welding Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. Journal of Manufacturing Processes. Volume 23, August 2016, pp. 315-327.

6. Das Benjamin, Yadaiah N., Ozah Rupshree, Chowdhury Sohini, Mondal Arpan Kumar, Muralidhar M. A Perspective Review on Estimation of Keyhole Profile during Plasma Arc Welding Process. Material today: proceedings. Volume 5, Issue 2, Part 1, 2018, pp.6345-6350.

7. Choudhury Sanatan, Sharma Abhay, Mohanty Uttam Kumar, Kasai Ryu, Komura Masaharu, Tanaka Manabu, Suga Tetsuo Mathematical model of complex weld penetration profile: A case of square AC waveform arc welding. Journal of Manufacturing Processes. Volume 30, December 2017, pp. 483-491.

8. Piekarska Wiesława, Kubiak Marcin, Vaško Milan. Procedia Engineering. Volume 177, 2017, pp. 114-120.

9. Kiselev YU.A., Pogora V.K. IFZH, 1990, V. 56, №6. pp. 892 - 896.

10. Dombrovskiy YU.M. Soglasovaniye kharakteristik istochnika pitaniya i dugi pri plazmennom nagreve so skanirovaniyem. Svarochnoye proizvodstvo. 1997, №8. pp. 22 – 24.

11. Zayarov YU.V., Sysolyatin A.A., Bozhenko B.L. Svarochnoye proizvodstvo, 1995, №11. pp. 20 - 21.

12. Bozhenko B.L. Teoriya svarochnykh protsessov. [Theory of welding processes]. Uchebnoye posobiye. Novocherkassk, NGTU, 1996. 119 p.

13. Wang C.S.WuL., Ren W.J., Zhang X.Y. Journal of Manufacturing Processes. Volume 16, Issue 1, January 2014. pp. 74 - 85.

14. Kulikov V.P. Tekhnologiya svarki plavleniyem i termicheskoy rezki. [Technology of fusion welding and thermal cutting]. uchebnik. Minsk: Novoye znaniye; M.: INFRA-M, 2016. 463 p.