

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.791.754

И. В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, В. П. СИДОРОВ, д-р техн. наук,  
А. И. ЗАХАРЕНКО, инж.

Тольяттинский государственный университет  
E-mail: office@tltsu.ru

### Пространственное положение дуги, отклоняемой собственным магнитным полем

Приведены результаты исследования пространственного положения дуги на свариваемых кромках в условиях автоматической сварки корневого слоя шва неплавящимся электродом дугой, отклоняемой собственным магнитным полем. Приведены математическое описание изменения координаты центра пятна нагрева дуги во времени и зависимость угла отклонения сварочной дуги от оси электрода от расстояния токоподвода до оси электрода, сварочного тока и частоты коммутации тока.

Research results of the arc altitude on the groove faces under conditions of root layer machine nonconsumable welding by an arc deflected by the eigenfield are described. Mathematical formulation of the arc heating spot centre position changes in time is given, as well as dependence allowing for calculating welding arch deflection angle from the electrode axis, considering distance from the current contact jaw to the electrode axis, welding current and current switching frequency.

**Ключевые слова:** аргонодуговая сварка, пространственное положение дуги, магнитное поле

**Key words:** argon arc welding, arc altitude position, magnetic field

Основной областью применения процесса автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом дугой, отклоняемой собственным магнитным полем, является сварка корневого слоя шва в многослойных сварных соединениях. Специфика предлагаемого способа заключается в перемещении сварочной дуги по заданной траектории при неподвижном электроде без применения каких-либо дополнительных внешних воздействий. Перемещение дуги происходит за счет ее отклонения от оси неплавящегося электрода на некоторый угол, что достигается путем изменения параметров собственного магнитного поля дуги, в результате возникает эффект магнитного дутья, который в конечном счете и приводит к изменению пространственного положения дуги [1]. Параметрами магнитного поля дуги управляют путем периодического изменения места подключения тока к изделию<sup>1</sup>. Разработано оборудование для реализации данно-

го способа [2], а также проведены исследования с целью определения области рационального применения способа. Следующим шагом в разработке и исследовании процесса сварки дугой, отклоняемой собственным магнитным полем, является разработка адекватного физического и математического описания процесса для его дальнейшего моделирования.

Одной из основных задач моделирования процесса сварки в данном случае является точное предсказание размеров сварочной ванны. Поскольку форма проплавления свариваемых кромок напрямую определяется картиной температурного поля, то основная цель моделирования системы — описание основных закономерностей процессов, протекающих при сварке корня шва дугой, отклоняемой собственным магнитным полем, значительно влияющих на температурное поле в кромках, с учетом влияния параметров подготовки и сборки кромок под сварку, энергетических параметров процесса сварки. Для решения данной задачи необхо-

<sup>1</sup> А. с. 465291 (СССР).

димо составить адекватное описание взаимодействия сварочной дуги как источника нагрева и свариваемых кромок как нагреваемого элемента. Для этого потребуется решить три задачи, которые позволят описать условия, отличающие выделенную систему от других систем сварки:

- построить схему наведения дуги как источника теплоты;
- описать распределение теплоты в нагреваемых (свариваемых) кромках;
- описать пространственное положение дуги на свариваемых кромках.

Описание поведения дуги как источника теплоты при сварке корневого слоя шва с разделкой кромок, в том числе и неплавящимся электродом, подробно приведены в работе [3]. В этой же работе, а также в работах [4—6] приведены основные аспекты описания нагреваемых (свариваемых) кромок с учетом специфических условий, свойственных сварке корневого слоя шва, позволяющие, в частности, учесть влияние параметров подготовки и сборки кромок под сварку на температурное поле в них. Приведенные описания и схемы могут быть вполне применимы для моделирования процесса сварки корневого слоя шва дугой, отклоняемой собственным магнитным полем. Основным специфическим вопросом, требующим отдельного решения, является вопрос, связанный с описанием пространственного положения дуги на свариваемых кромках в условиях сварки корневого слоя шва дугой, отклоняемой собственным магнитным полем.

Рассмотрим процесс сварки, при котором подвод тока к изделию производится поочередно в двух точках на поверхности изделия, при этом точки токоподвода располагаются в одной плоскости, перпендикулярной поверхности изделия и оси стыка. В этих условиях дуга будет совершать периодические колебательные движения в пространстве, отклоняясь от оси электрода на некоторый угол  $\alpha$  в две противоположные стороны (рис. 1).

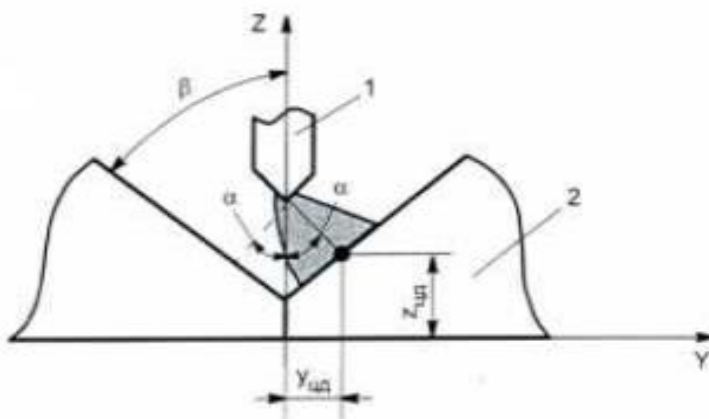


Рис. 1. Схема отклонения дуги от оси электрода: 1 — неплавящийся электрод; 2 — свариваемая кромка

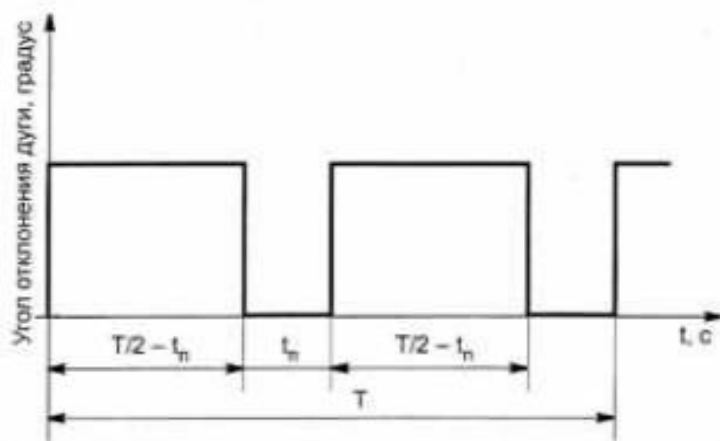


Рис. 2. Циклограмма изменения угла отклонения сварочной дуги от оси электрода

Пространственное положение пятна нагрева дуги на свариваемых кромках будем описывать положением центра пятна нагрева дуги с координатами  $x_{цд}$ ,  $y_{цд}$ ,  $z_{цд}$ , зависящими от угла отклонения сварочной дуги, который в свою очередь зависит от сварочного тока, расстояния от оси электрода до токоподвода и частоты изменения направления токоподвода. Положение центра пятна нагрева дуги на каждой из свариваемых кромок будет изменяться в соответствии с циклограммой, приведенной на рис. 2.

Первоначально дуга отклоняется от оси электрода на некоторый угол  $\alpha$  и горит на одну из свариваемых кромок. Это происходит в течение периода времени  $T/2 - t_n$  (см. рис. 2). Затем дуга в течение времени  $t_n$  горит по центру стыка, происходит отклонение дуги на угол  $\alpha$  в противоположную от первоначальной сторону и дуга горит на вторую свариваемую кромку. Это происходит в течение периода времени  $T/2 - t_n$ . Затем дуга в течение времени  $t_n$  вновь горит по центру стыка. Таким образом, за период времени  $T$  дуга совершает полный колебательный цикл, который затем многократно повторяется.

Руководствуясь правилами геометрии, можно утверждать, что в зависимости от угла отклонения дуги  $\alpha$  координаты  $x_{цд}$  и  $y_{цд}$  (см. рис. 1) точки центра пятна нагрева дуги в крайнем отклоненном положении могут быть вычислены по следующим зависимостям:

$$y_{цд} = \frac{L_d \sin \alpha \sin \beta}{\sin(180 - \beta - \alpha)}; \quad (1)$$

$$z_{цд} = \frac{L_d \sin \alpha \sin(90 - \beta)}{\sin(180 - \beta - \alpha)}. \quad (2)$$

где  $L_d$  — длина дуги, мм;  $\beta$  — угол разделки кромок, градус.

В общем случае задача по описанию пространственного положения дуги будет заключаться в описании не только координаты центра пятна нагрева дуги в зависимости от угла ее отклонения, но и изменения этих координат во времени в соответствии с циклограммой на рис. 2. Математическое описание изменения координаты центра пятна нагрева дуги будет выглядеть следующим образом:

$$y_{\text{уд}} = \begin{cases} \frac{L_d \sin \alpha \sin \beta}{\sin(180 - \beta - \alpha)}; \\ T(N-1) \leq t \leq T(N-1) + \left(\frac{T}{2} - t_n\right); \\ 0; T(N-1) + \left(\frac{T}{2} - t_n\right) < t \leq T(N-1) + \frac{T}{2}; \\ T(N-1) + (T - t_n) < t \leq T(N-1) + T; \\ \frac{L_d \sin \alpha \sin \beta}{\sin(180 - \beta - \alpha)}; \\ T(N-1) + \frac{T}{2} \leq t \leq T(N-1) + (T - t_n); \end{cases} \quad (3)$$

$$z_{\text{уд}} = \begin{cases} \frac{L_d \sin \alpha \sin(90 - \beta)}{\sin(180 - \beta - \alpha)}; \\ T(N-1) \leq t \leq T(N-1) + \left(\frac{T}{2} - t_n\right); \\ T(N-1) + \frac{T}{2} \leq t \leq T(N-1) + (T - t_n); \\ c; T(N-1) + \left(\frac{T}{2} - t_n\right) < t \leq T(N-1) + \frac{T}{2}; \\ T(N-1) + (T - t_n) < t \leq T(N-1) + T; \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{\text{уд}} = vt, \quad (5)$$

где  $T$  — период цикла колебаний дуги, с;  $N$  — число повторений цикла колебаний дуги на текущий момент времени;  $v$  — скорость сварки, мм/с;  $t$  — время, прошедшее с момента начала сварки, с.

Период цикла колебаний дуги вычисляют исходя из установленной на источнике питания частоте изменения направления горения дуги  $f$ :

$$T = 1/f. \quad (6)$$

Число повторений цикла колебаний дуги на текущий момент времени  $t$  можно вычислить с округлением полученного результата до целого числа в большую сторону:

$$N = t/T. \quad (7)$$

Еще одним важным моментом в описании пространственного положения дуги на свариваемых кромках является определение угла отклонения сварочной дуги от оси электрода в зависимости от

текущих параметров процесса сварки. Для установления зависимости, позволяющей вычислить значение угла отклонения сварочной дуги, выполнены экспериментальные исследования по выявлению зависимости угла отклонения сварочной дуги от основных параметров процесса, таких как расстояние от токоподвода до оси электрода, сварочный ток, частота коммутации тока. Эксперименты выполняли по стандартной методике с построением плана трехфакторного эксперимента. Условия проведения эксперимента приведены в таблице. Функция отклика — угол отклонения дуги.

Эксперименты проводили с использованием экспериментальной установки, состоящей из источника питания для сварки дугой, отклоняемой собственным магнитным полем, сварочного трактора с закрепленными на нем горелкой для аргонодуговой сварки и разделенным токоподводом тока к изделию. Процесс сварки фиксировали на цифровую видеокамеру Panasonic NV DC 50. Угол отклонения дуги от оси электрода определяли путем обработки кадров видеосъемки на персональном компьютере с применением прикладных программ обработки видеоизображений.

В результате проведения эксперимента по плану полного трехфакторного эксперимента и обработки полученных данных с использованием регрессионного анализа получили уравнение регрессии в следующем виде:

$$\alpha = 21,94 - 9,56X_1 + 0,44X_2 - 1,44X_3, \quad (8)$$

где  $\alpha$  — текущий угол отклонения дуги от оси электрода.

Перейдя из безразмерной системы в размерную, получили следующую зависимость:

$$\alpha = 21,94 - 9,56\left(\frac{l-43}{37}\right) + 0,44\left(\frac{l-130}{70}\right) - 1,44\left(\frac{f-1,55}{1,45}\right), \quad (9)$$

где  $l$  — текущее значение расстояния от токоподвода до оси электрода, мм;  $f$  — текущее значение

Кодовое обозначение факторов	Фактор, размерность	Уровень варьирования			Шаг варьирования
		-1	0	+1	
X1	Расстояние до токоподвода, мм	6	43	80	±37
X2	Сварочный ток, А	60	130	200	±70
X3	Частота коммутации, Гц	0,1	1,55	3	±1,45

сварочного тока,  $A$ ;  $f$  — текущее значение частоты коммутации тока, Гц.

Проверку адекватности полученной зависимости (9) проводили путем сопоставления рассчитанных по ней углов отклонения дуги и аналогичных данных, полученных в ходе проведения натуральных экспериментов по методике работы [7]. Установили, что применение предлагаемой зависимости для расчета угла отклонения дуги позволяет получить результаты, не имеющие значимых расхождений с данными эксперимента (поскольку дисперсионное отношение ни в одном из опытов не превышало значения критерия Фишера).

## ВЫВОДЫ

1. Разработано математическое описание изменения координат центра пятна нагрева дуги во времени в условиях автоматической сварки корневого слоя шва неплавящимся электродом дугой, отклоняемой собственным магнитным полем.

2. Получена зависимость, позволяющая рассчитать угол отклонения сварочной дуги от оси электрода в зависимости от расстояния от токопод-

вода до оси электрода, сварочного тока и частоты коммутации тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление пространственным положением дуги в процессе сварки корня шва за счет ее собственного магнитного поля / В. П. Сидоров, И. В. Смирнов, Н. Е. Машнин и др. // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства. Тольятти: ТГУ, 2006. Ч. 1. С. 144—147.
2. Повышение пространственной устойчивости дуги на кромках при сварке корня шва / В. П. Сидоров, И. В. Смирнов, Н. Е. Машнин и др. // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства. Тольятти: ТГУ, 2006. Ч. 1. С. 141—144.
3. Смирнов И. В. Формирование корневого слоя шва при односторонней сварке стальных конструкций: Дис. ... канд. техн. наук. Тольятти: ТГУ, 2005. 169 с.
4. Смирнов И. В., Сидоров В. П. Методика расчета температурных полей при сварке корня шва неплавящимся электродом // Сварка и контроль—2004. Пермь, 2004. Т. 2. С. 205—211.
5. Смирнов И. В. Метод учета размеров и формы разделки на процесс распространения тепла в кромке при сварке // Компьютерное моделирование и информационные технологии в науке, инженерии и образовании. Пенза, 2003. С. 151—154.
6. Смирнов И. В. Особенности распространения тепла при сварке корня шва в стыковом соединении с V-образной разделкой кромок // Сварка — XXI век. Тольятти, 2002. С. 153—158.
7. Судник В. А., Ерофеев В. А., Радаи Д. Адекватность компьютерной имитации процессов сварки // Компьютерные технологии в соединении материалов. Тула: ТулГУ, 1999. С. 5—21.

УДК 621.791.754

Г. А. ФЕДОРЕНКО, канд. техн. наук, И. В. ИВАНОВА, инж.,  
К. А. СИНЯКОВ, канд. техн. наук  
Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ — ВТУЗ)  
E-mail: lmz-vtuz@mail.wplus.net

## Совершенствование технологического процесса сварки в защитных газах на ветру

Рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты формирования защитных струй и их поведения в сносящих воздушных потоках с целью разработки технологических процессов сварки на ветру.

Theoretical data and experimental results of the shielding jets formation and their behaviour in the blowing off air streams are considered aimed at designing welding process in the wind.

**Ключевые слова:** технологический процесс, газовая защита, горелки, деформация, эффективность

**Key words:** technological process, gas protection, torch, deformation, efficiency factor

Общеизвестно, что многие исследователи интенсивно занимались вопросами сварки в защитных газах на ветру с конца 60-х до начала 80-х годов прошлого столетия [1—5]. Однако горелки, на которых пытались создать эти технологические процессы, обес-

печивали эффективную газовую защиту и качество шва при скорости ветра не более 2,5—3 м/с [4]. Большие скорости ветра требовали сокращения вылета электрода до значений, неприемлемых в производственных условиях [1, 2]. В то же время сварка покрытыми

электродами обеспечивала допустимое качество швов при значительно больших скоростях ветра [4]. При этом комплекс вопросов, которые необходимо было решить, прежде чем выходить на освоение процесса, касался горелок, приборов для измерения ско-