

УДК 622

**В.В. Григоренко, О.Н. Киселёв, Ю.Н. Бобылев**

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ В СО<sub>2</sub>**

*Проведен анализ особенностей роботизированной дуговой сварки в среде CO<sub>2</sub>. Построены регрессионные модели зависимости критериев качества процесса формирования шва при сварке в CO<sub>2</sub> от показателей, характеризующих точность сборки заготовок под сварку.*

*Ключевые слова:* дуговая сварка, формирование шва, роботизированная сварка.

**Семинар № 13**

**П**роцесс формирования шва при дуговой сварке в среде CO<sub>2</sub> описывается большим числом показателей. Все эти показатели принято классифицировать по двум классам. По показателям, характеризующий конечный результат процесса сварки, т.е.: механические свойства шва, коррозионная стойкость, стоимость погонного метра шва и т.п.; и по показателям, которые определяют сам технологический процесс, и в свою очередь, подразделяются на технологические (например, параметры режима и т.п.) и конструкторские (например, параметры разделки и т.п.) рис.. 1.

Однако такая классификация не позволяет судить о взаимосвязи как между отдельными показателями, так и между группами показателей.

Поэтому анализ чувствительности штатной технологии к действию возмущений был проведен нами на основе классификации показателей согласно теории управления. Показатели были разбиты на входные и выходные. Поскольку технологический процесс проходит в несколько стадий, то входными параметрами стадии являются выходные параметры предыдущей стадии.

В предлагаемой классификации все показатели разделены на пять групп:

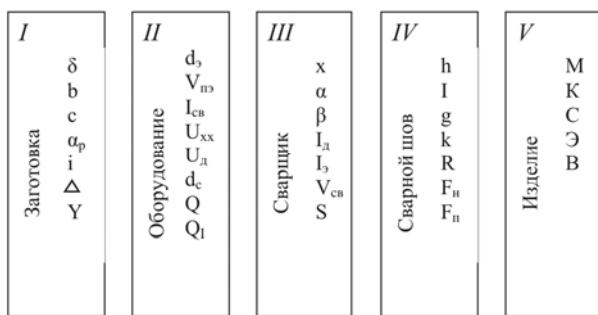
показатели, характеризующие изделие в целом; определяемые в ходе процесса сварки; описывающие сварной шов; задаваемые до сварки (например, настройка сварочного источника); обеспечиваемые подготовительным производством. Каждая из этих групп содержит свой набор показателей, рис. 2.

Такая классификация позволяет судить о связи между различными показателями и объяснять результат сварки и конкретные причины отклонений по конечному продукту. При замене человека-оператора роботом классификация останется прежней, но роль сварщика (и его место в классификации) отводится в таком случае манипулятору сварочной горелки.

На величину критериев качества оказывают влияние показатели, которые формируются в разных группах: заготовительного производства, сварочного оборудования, самого процесса сварки оператором. В последнее время создано сварочное оборудование, позволяющее выдергивать параметры режима с большой стабильностью. Однако, в случае дуговой сварки роботом это оборудование не дало ожидаемого эффекта, вследствие действия таких возмущений, которые



**Рис. 1. Общепринятая классификация показателей, характеризующих дуговую сварку**



**Рис. 2. Предлагаемая классификация показателей, характеризующих дуговую сварку:**  $\delta$  - толщина металла, мм;  $b$  - ширина зазора, мм;  $c$  - притупление кромок, мм;  $\alpha_p$  - угол разделки;  $\Delta$  - превышение кромки, мм;  $Y$  - положениестыка, мм;  $d_3$  - диаметр электрода, мм;  $V_{пэ}$  - скорость подачи электрода, мм/с;  $I_{cb}$  - сила свободного тока, А;  $U_{xx}$  - напряжение холостого хода источника, В;  $U_d$  - напряжение дуги, В;  $d_c$  - диаметр сопла, мм;  $Q$  - расход защитного газа, л/мин;  $Q_1$  - состав защитного газа;  $x$  - смещение электрода, мм;  $\alpha$  - угол наклона электрода к горизонтали;  $\beta$  - угол между электродом и стыком;  $I_d$  - длина дуги, мм;  $I_s$  - длина вылета электрода, мм;  $V_{cb}$  - скорость сварки, мм/с;  $S$  - конфигурация траектории перемещения электрода по стыку;  $h$  - глубина проплавления, мм;  $I$  - ширина шва, мм;  $g$  - высота усиления (выпуклость-вогнутость), мм;  $k$  - величина катета, мм;  $R$  - радиус перехода шва к основному металлу, мм;  $F_h$  - площадь наплавленного металла,  $\text{мм}^2$ ;  $F_n$  - площадь проплавления,  $\text{мм}^2$ ;  $M$  - механические свойства;  $K$  - коррозионная стойкость;  $C$  - стоимость;  $Э$  - эксплуатационные свойства;  $B$  - внешний вид

компенсировались сварщиком при ручной сварке. Так, изменение величины зазора в угловом соединении компенсировалось сварщиком изменением ориентации сварочной горелки в производстве, изменением вылета электрода, без перестройки сварочного оборудования.

При переходе от стадии к стадии между показателями может быть задана связь. Имеется достаточно литературных источников, описывающих такие связи [1, 2]. В работе [3] показано, что необходимые механические свойства обеспечиваются определенными геометрическими размерами сварного шва. Поэтому для изделий автомобильстроения, для которых основным требованиям является обеспечение механической прочности можно ограничиться требованием соблюдения геометрических размеров сварного шва, таких как: глубина прогревания, высота катета.

При роботизированной сварке основным возмущением следует считать показатели, формируемые заготовительным производством и задаваемые роботом, такие как: ширина зазора в стыке, уход сварочной горелки от линии стыка и углы ориентации горелки относительно изделия [4].

Имеющиеся в литературе методики расчета зависимости критериев от па-

раметров процесса, основанные на аналитических зависимостях, либо не используют в своем алгоритме показателей, являющихся возмущениями при дуговой роботизированной сварке, либо решают какую-либо частную задачу, т.е. не могут быть использованы для определения критичности технологии. Одним из возможных путей получений зависимостей является использование регрессионных уравнений взаимосвязи [5].

Для построения регрессионных моделей зависимости критериев качества процесса формирования при дуговой сварке в среде углекислого газа проволокой Св-08 Г2В диаметром  $d_3=1,6$  мм заготовок из низкоуглеродистой стали марки ВМСтЗсп толщиной  $\delta=4$ мм угловых швов в нижнем положении от показателей, характеризующих точность сборки заготовок под сварку и наведения сварочной горелки на стык роботом с целью определения критичности штатного технологического процесса сварки к действию возмущений, вызванных неточностями сборки и наведения, т.е. пределов изменения показателей, характеризующих точность сборки и наведения, для которых обеспечивается качественное нормирование шва без изменения режима сварки, была выполнена экспериментальная сварка образцов, имитирующих реальное сварное соединение конструкций на штатной технологии

$$I_{\text{св}} = 190-200 \text{ A}; U_d = 27-28 \text{ В}; V_{\text{св}} = 7,5 \text{ мм/с.}$$

Полезно вспомнить, что построение регрессионных моделей состоит из восьми стадий [6,7]: задание отклика (критерий качества); определение варьируемых факторов; назначение функции отклика; выбор уровней и интервалов варьирования факторов; составление матрицы плана эксперимента; проведение эксперимента;

Таблица I.

Фактор	Уровень			
	Ниж- ний	Верх- ний	Основ- ной	Интервал варьиро- вания
b, мм	0	2	1	1
x, мм	0	2	1	1
$\alpha, {}^\circ$	30	60	45	15
$\beta, {}^\circ$	60	90	75	15

расчет коэффициентов регрессии; проверка полученной модели на информативность и адекватность.

На основании [8], за критерий качества сварки была принята глубина проплавления (H) и катет (K) вертикальной стенки. В качестве факторов варьирования были выбраны: ширина зазора (b); смещение электродов от линии стыка (x); угол наклона электрода к горизонту ( $\alpha$ ); угол между электродом и линией стыка ( $\beta$ ).

Из [7] следует, что может быть использована с достаточной степенью точности линейная модель функции отклика, для построения которой каждый фактор должен иметь два уровня. Значения уровней и интервалов варьирования приведены в табл. 1.

На основании измерений зазоров в реальных конструкциях максимальное значение ширины зазора принято вдвое большим, чем регламентируется [9]. Интервал варьирования смещения определяется совокупностью погрешностей базирования заготовки и воспроизведения траектории роботом. Поскольку в предварительных экспериментах была выявлена нежелательность смещения дуги на вертикальную стенку, вследствие прожога в интервале изменения ширины зазора, то минимальное смещение принято нулевым. Основные уровни углов ориентации сварочной горелки относительно стыка, принятые по рекомендациям [4, 10], а интервалы варьирования определяются предельной точностью манипулятора.

Таблица 2.

Номер опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	-	+	-	+
2	+	+	+	+
3	+	+	-	-
4	+	-	-	+
5	-	-	-	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	-	-	+	+

Для удобства записи условий эксперимента и обработки полученных данных, закодируем уровни факторов по формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - x_i^0}{\Delta x_i}, \quad (1)$$

где  $x_i$  - кодированное значение i-го фактора;  $\tilde{x}_i$  - натуральное значение i-го фактора;  $x_i^0$  - натуральное значение основного уровня i-го фактора;  $\Delta x_i$  - интервал варьирования i-го фактора.

В этом виде любой фактор изменяется от -1 до +1.

В качестве матрицы плана эксперимента примем ортогональный удобный факторный план для 4-х факторов  $-2^{4-1}$ . Матрица этого плана приведена в табл. 2. В таблице  $x_1, x_2, x_3, x_4$  - кодированные значения уровней факторов  $b, x, \alpha, \beta$  соответственно. В реальной конструкции все швы угловые, образующие тавровые и нахлесточные соединения, поэтому для моделирования технологического процесса использованные образцы таврового соединения, образующие образец пластины, вырубались на гильотинных ножницах из материала конструкции - стали Ст3. Одна из боковых граней стенки фрезеровалась для обеспечения перпендикулярности стенки и полки.

Толщина стенки и полки определялась толщинами элементов конструкции и составила 4 мм. Длина образца вычислялась по формуле

$$l = l_p + l_n + l_t \quad (2)$$

где  $l_p$  - длина рабочей части образца;  $l_n$  - длина припуска на переходной процесс;  $l_t$  - длина прихваток на концах образца.

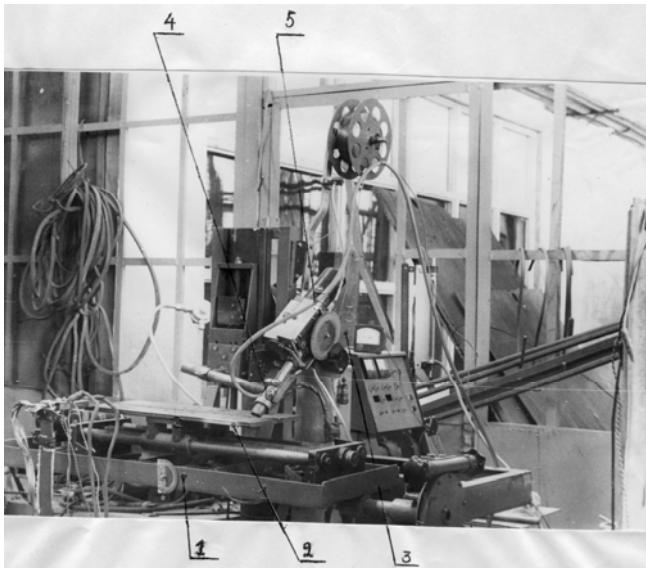
Длина рабочей части образца выбиралась из условия получения статистически достоверных результатов. Из [11] следует, что для получения требуемых данных необходимо произвести не менее 3-х измерений, т.е. сделать три шлифа поперечного сечения одного образца. Для удобства обработки образцов (надежности закрепления) необходимо не менее 50 мм рабочей длины образца [12].

Длина припуска на переходной процесс определяется длиной сварочной ванны при переходе на квазистационарный режим. Согласно [13]  $l_n = 12$  мм. Длина прихваток для сборки составила по 5 мм с каждого края. Таким образом, общая длина образца составила 150 мм. Ширина пластин выбиралась из условия отсутствия влияния тепла, отраженного от края пластины. Ширина рассчитывалась по методике, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана [14]. Для определения отстояния края образца от линии стыка использовалась формула

$$\frac{2\pi\lambda S\Delta T}{q} = K_0 I b_1 \sqrt{\frac{b_1^2}{4} + \frac{b}{a}} \quad (3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м.град;  $S$  - теплосодержание, Дж;  $q$  - погонная энергия сварочной дуги, Дж<sup>\*</sup>мм<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $K_0$  - функция Бесселя 2 рода нулевого порядка;  $b_1$  - отстояние линии стыка от края образца, мм;  $\Delta T$  - допустимое изменение температуры, К;  $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $b$  - коэффициент тепlop передачи, Дж/м<sup>2</sup>К.

Численные значения величин принимались по рекомендациям [14, 15, 16]. На основании проведенного расчёта



**Рис. 3. Исследовательский стенд**

ширина полки принималась 150 мм, а стенки - 75 мм. Проверочный расчет для изменения температуры в зоне сварки от наличия края - не менее 1%.

Для реализации плана, см. табл. 2, были изготовлены 2 типа образцов: с нулевым зазором и зазором, равным 2 мм, что соответствует нижнему и верхнему уровням первого фактора.

Для моделирования сварки угловых и стыковых соединений в различных пространственных положениях и получения регрессионных зависимостей от параметров режима сварки был изготовлен исследовательский стенд.

Стенд выполнен на базе стального каркаса 1 с укреплённой на нём подвижной кареткой с устройством закрепления образца 2; стойки 3 со сварочной горелкой 4 и механизмом подачи электродной проволоки 5. Положение сварочной горелки относительно каретки задаётся двумя углами ориентации; углом наклона горелки к горизонтальной плоскости  $\alpha$  и углом между осью горелки и линиейстыка  $\beta$ , с помощью специальных фиксаторов. Про-

странственная ориентация рабочей поверхности каретки может быть любой (в нижнем, горизонтальном, потолочном и вертикальном положениях).

Перемещение каретки обеспечивается приводом с двигателем постоянного тока СД-150 (задаваемая скорость перемещения равна скорости сварки). Привод обеспечивает стабильность скорости сварки и скорости подачи при колебаниях нагрузки выходного вала.

Блок управления позволяет задавать направление и скорость перемещения каретки до 10 мм/с, регулировать скорость подачи электродной проволоки в пределах 10-30 мм/с с точностью 5%; измерять силу сварочного тока и напряжения дуги, выводить информацию на осциллограф. Предусмотрена блокировка источника питания от перемещения каретки или электродной проволоки.

Для исключения влияния подсоса воздуха в зону сварки через зазор, на обратную к сварному шву таврового соединения сторону наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 0.1мм (ГОСТ 618-73). С целью сохранения одинаковых термодинамических условий всей серии опытов фольга наклеивалась и на образцы с нулевым зазором. Для уменьшения влияния погрешностей установления значений факторов план эксперимента, табл. 2, рандомизирован при помощи таблицы случайных чисел [17]. Значение факторов эксперимента задавалось согласно кодам строки рандомизированного плана, табл. 3, в следующей последовательности. Вначале сварочная горелка ориентировалась в пространстве с помощью специальных шаблонов по углу наклона

Таблица 3  
**Рандомизированный план эксперимента  
(натуральные значения факторов)**

Номер опыта	$x_1 (b)$ , мм	$x_2 (x)$ , мм	$x_3(\alpha)$ , °	$x_4 (\beta)$ , °
1	0	0	60	90
2	0	0	30	60
3	2	2	60	90
4	2	0	60	60
5	0	2	30	90
6	0	2	60	60
7	2	0	30	90
8	2	2	30	60

Таблица 4  
**Результаты измерения глубины проплавления  
вертикальной стенки**

Номер опыта	$H^1$ , мм	$H^2$ , мм	$H^3$ , мм	$H^4$ , мм	$\bar{H}$ , мм	$\sigma_{\bar{H}}$ , мм <sup>2</sup>
1	3.06	2.89	2.74	2.79	2.87	0.015
2	2.18	2.27	2.01	1.96	2.10	0.013
3	4.64	4.61	4.41	4.34	4.50	0.016
4	3.78	3.89	3.61	3.69	3.74	0.010
5	2.22	2.11	2.37	2.38	2.27	0.013
6	5.68	5.54	5.33	5.41	5.49	0.018
7	4.89	4.76	4.57	4.66	4.72	0.014
8	3.02	2.94	3.21	3.36	3.11	0.017

её оси к рабочей поверхности и направлению перемещения каретки. Включением механизма подачи выставлялась длина вылета электрода, равная 19 мм. Затем на рабочую поверхность помещался образец с величиной зазора, соответствующей коду строки плаана. Направление осистыка было параллельным направлению оси перемещения горелки, причём смещение проекции конца вылета электрода от осистыка задавалось перемещением образца по каретке и смещением горелки вдоль стойки. После этого образец закреплялся, на холостом прогоне каретки проверялась стабильность смещения проекции конца электрода относительностыка, и каретка возвращалась в исходное положение. Для обеспечения одновременности включения источника питания, двигателей перемещения каретки и подачи электродной проволоки блок управления переводился в рабо-

чее состояние. По окончанию процесса сварки образец снимался, и операции повторялись уже для следующей строки плана.

Промаркованные образцы разрезались фрезой так, чтобы плоскость реза была перпендикулярна оси шва, в 2-х местах. Для получения микрошлифов их обрабатывали по методике работы [14], травили. Шлифы помешали на предметный столик металлографического микроскопа МБС-2, и с помощью окуляр-микрометра МОВ-1-15<sup>х</sup> измерялась величина катета  $u$  и глубина проплавления стенки  $H$ . Цена деления МБС - 0.05 мм. Результаты измерений проводились в каждом опыте четыре раза ( $u^1 \dots u^4$ ;  $H^1 \dots H^4$ ). Средние значения

в каждом опыте обозначены  $\bar{H}, \bar{u}$ .

Для построения регрессионной модели зависимости глубины проплавления от точности сборки и позиционирования заготовки результаты измерений глубины проплавления, табл. 4, обрабатывали с помощью методов регрессионного анализа.

Однородность дисперсий проверялась по критерию Кохрена

$$G_p = \frac{\sigma_{u \max}^2}{\sum_{j=1}^8 \sigma_{uj}^2} \approx 0,155 \quad (4)$$

В результате восьми опытов при четырёхкратном измерении в каждом опыте получили  $G_T=0,4377$  [18]. Так как  $G_p < G_T$ , то дисперсии можно считать однородными, а за численное значение дисперсии воспроизводимости измерения глубины проплавления, принимается среднее арифметическое

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \sigma_{yj}^2 \approx 0.015 \text{мм}^2$$

Для анализа степени влияния выбранных факторов на величину глубины проплавления уравнение регрессии строим в виде:

$$H = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 \quad (5)$$

Значения коэффициентов в уравнении

$$a_0 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \bar{y}_j = 3.60 \text{мм}; \quad a_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{ij} \bar{y}_j; \quad (6)$$

$$a_1 = 0.39; \quad a_2 = -1.01; \quad a_3 = -0.07 \text{ мм/град}; \\ a_4 = -0.20 \text{ мм/град};$$

Для проверки значимости коэффициентов найдём величину доверительного интервала  $\Delta a_i$ :

$$\Delta a_i = \pm t_T \sigma_{\{a_i\}} \quad (7)$$

где  $t_T$  - табличное значение коэффициента Стьюдента, при принятом уровне значимости и числе степеней свободы ( $f$ );  $\sigma_{\{a_i\}}$  - ошибка в определении  $i$ -го коэффициента регрессии, вычисляемая по формуле

$$\sigma_{\{a_i\}} = \pm \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{nN}} \approx 0.22 \text{мм} \quad (8)$$

При равномерном дублировании опытов, число степеней свободы находится по выражению  $f = (n-1) \cdot N = 24$ , что при 5% уровне значимости даёт  $t_T = 2.06$ , и поэтому  $\Delta a_i = \pm 0.045$ . Итак, все коэффициенты по абсолютной величине больше доверительного интервала, что означает, что все  $a_i$  значимы.

Таким образом, уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$H = 3.60 + 0.39 \cdot x_1 - 1.01 x_2 - 0.07 x_3 - 0.20 x_4 \quad (9)$$

Дисперсия адекватности полученного уравнения

$$\sigma_{ao}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - f_j)^2}{N - (k + 1)} \quad (10)$$

где  $\bar{y}_j$  - среднее арифметическое значение величины проплавления в  $j$ -ом

опыте, см. табл.4;  $f_j$  - значение, вычисленное по модели для условий  $j$ -го опыта;  $N$  - число опытов;  $K$  - число факторов. Проверка адекватности проводилась по критерию Фишера  $F_p = \sigma_{ao}^2 / \sigma_y^2 \approx 2.7$ . Табличное значение критерия Фишера для условий нашего эксперимента равно  $F_T = 3.0$  [17]. Так как расчётное значение критерия меньше табличного, то можно считать полученную модель адекватной.

Построение уравнения регрессии для зависимости величины катета осуществлялось аналогично построению уравнения для глубины проплавления. В качестве исходных данных использовались результаты измерений, приведенные в табл. 5.

Расчётное значение критерия Кохрена равно

$$G_p = \sigma_{y \max}^2 / \sum_{j=1}^8 \sigma_{yj}^2 \approx 0.192$$

Так как расчётное значение критерия Кохрена меньше табличного, то дисперсия воспроизводимости будет равна

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \sigma_{yj}^2 \approx 0.024 \text{мм}^2$$

Для принятого вида уравнения регрессии

$$K = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad (11)$$

были найдены коэффициенты  $b_0 = 2.21$  мм;  $b_1 = -0.48$ ;  $b_2 = -0.84$ ;  $b_3 = 0.02$  мм/град;  $b_4 = 0.16$  мм/град. Проверка значимости полученных коэффициентов проводилась путём сравнения с доверительным интервалом, для чего была определена ошибка вычисления коэффициентов

$$\sigma_{\{b_i\}} = \pm \sqrt{\sigma_y^2 / nN} \approx 0.027 \text{мм}$$

Так как при 5%-ом уровне значимости табличное значение коэффициента Стьюдента  $t_T = 2.06$ , то доверительный интервал коэффициентов уравнения регрессии будет равен

Таблица 5  
Результаты измерения величины катета стенки

Номер опыта	$y^1$ , мм	$y^2$ , мм	$y^3$ , мм	$y^4$ , мм	$\bar{y}$ , мм	$\delta_y^2$ , $\text{мм}^2$
1	1.16	0.96	0.94	0.88	0.96	0.037
2	1.61	1.64	1.84	1.85	1.74	0.011
3	2.12	2.21	2.49	2.46	2.32	0.037
4	1.92	1.94	2.01	1.69	1.89	0.014
5	1.94	1.94	1.69	1.69	1.89	0.014
6	2.59	2.68	2.97	2.84	2.77	0.021
7	2.68	2.68	2.84	2.84	2.77	0.021
8	3.76	3.88	3.78	4.02	3.86	0.011
9	3.88	3.88	4.02	4.02	3.86	0.011
10	0.73	1.03	1.67	1.09	0.88	0.031
11	3.48	3.34	3.02	3.16	3.25	0.031

$$\Delta b_i = \pm t_{T_i} \sigma \{b_i\} = 0.060 \text{мм}$$

Поскольку абсолютная величина только одного коэффициента меньше доверительного интервала, то в уравнении значимы все коэффициенты, кроме  $b_3$ .

Таким образом, уравнение регрессии имеет вид

$$K = 2.21 - 0.48x_1 - 0.84x_2 + 0.16x_4$$

Дисперсия адекватности полученного уравнения равна

$$\sigma_{ao}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - f_j)^2}{N - (k + 1)} \approx 0.016 \text{мм}$$

Расчётное значение критерия Фишера  $F_p = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{ao}^2} \approx 1.5$  меньше табличного, равного  $F_p = 8.6$ , поэтому полученную модель можно считать адекватной.

В двух регрессионных моделях  $H = 3.60 + 0.39x_1 - 1.01x_2 - 0.07x_4 - 0.2x_3$ ,  $K = 2.21 - 0.48x_1 - 0.84x_2 + 0.16x_4$ ; все факторы приведены к единичному интервалу, поэтому их коэффициенты характеризуют степень влияния фактора на значение критерия качества [5, 19].

Из приведенных уравнений видно, что наибольшее влияние на величину глубины проплавления и катета стенки оказывает смещение электрода ( $x_2$ ): увеличение смещения вызывает умень-

шение обоих критериев. Следующим по значимости является ширина зазора ( $x_1$ ), при этом увеличение ширины зазора ведёт к увеличению глубины проплавления и к уменьшению величины катета вертикальной стенки.

Что касается ориентации сварочной горелки относительно стыка, то в выбранных интервалах их варьирования влияние на критерии качества незначительно: в модель катета угол

горизонта даже не включён, а влияние угла между электродом и стыком в 2-3 раза меньше влияния ширины зазора.

Из этого следует, что штатная технология критична к ширине зазора и смещению горелки от линии стыка. Поскольку ограничения на глубину проплавления и величину катета известны [20], то, используя полученные модели, можно определить предельные значения по ширине зазора и величине смещения: для  $H_{min} \geq 0.75$  [20]:  $B_{max} = 2.0 \text{ мм}$ ,  $x_{max} = 2.0 \text{ мм}$ ; для  $K_{min} \geq 3 \text{ мм}$  [21]:  $B_{max} = 1.0 \text{ мм}$ ,  $x_{max} = 0.87 \text{ мм}$ .

Из этого следует, что основные ограничения обусловлены необходимостью получения нужной величины катета, так как требуемая глубина проплавления обеспечивается во всем диапазоне варьирования факторов в эксперименте

Можно отметить, что величина допустимой ширины зазора, определяемая по модели для катета совпадает с нормативными требованиями для сборки заготовок тавровых соединений [21]. Следовательно, при выполнении требований по сборке необходимо только точно позиционировать деталь на манипуляторе.

### Выводы

Проведен анализ особенностей роботизированной дуговой сварки в сре-

де СО<sub>2</sub>. Построены регрессионные модели зависимости критериев качества процесса формирования шва при сварке в СО<sub>2</sub> от показателей, характеризующих точность сборки заготовок под сварку. Проведены оценки адекватности моделей, давшие положительные результаты. ГИАБ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лосев В.М., Сас А.В., Гладков Э.А.* Вопросы идентификации моделей в дуговой сварке - Труды/МВТУ, 1981, №363, с. 101-110
2. *Касаткин О.Г., Зайффарт П.* Интерполяционные модели для оценки фазового состава зоны термического влияния при дуговой сварке низколегированных сталей. - Автоматическая сварка, 1984, №11, С.7-11
3. *Моношков А.М. и др.* о прочности электросварных труб малого диаметра. - Сварное производство, 1971, №11, с.23-24
4. *Тимченко В.А., Дубовецкий СВ., Федотов П.Ф.* Оценка технологичности сварных конструкций как объектов роботизированной дуговой сварки. - Автоматическая сварка, 1985, №5, с.29-39
5. *Бродский В.В.* Введение в факторное планирование эксперимента. - М.: Наука, 1976, с.223.
6. *Федоров В.В.* Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов) - М.: Наука, 1971. – 312 с.
7. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: (справочное издание)/В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др. - М.: Металлургия, 1982. - 752с.
8. *Дубовецкий С.В., Сергацкий Г.И., Касаткин О.Г.* Оптимизация режима сварки угловых швов в СО<sub>2</sub> в различных пространственных положениях. - Автоматическая сварка, 1982, № 5, с.34-38.
9. Сварка в машиностроении: Справочник в 4 томах. /Ред. кол.: Г.А. Николаев, /пред./ и др. - М.: Машиностроение, 1979, т.4 /Под ред. Ю.Н. Зорина. 1979. - 520 с.
10. *Дубовецкий С.В., Сергацкий Г.И., Касаткин О.Г.* Оптимизация режима сварки в СО<sub>2</sub> - Автоматическая сварка, 1980, № 12, с.30-35.
11. *Веселая Г.Н., Егорова Н.В.* О математических моделях технологических процессов полученных по данным пассивного эксперимента. - В кн.: Проблемы планирования эксперимента /Под ред. Г.К.Круга, М.: Наука, 1969, с.24-28.
12. *Прохоров Н.Н.* Технологическая прочность металлов при сварке. - М.: НТО Машпром, Общество, университет, 1960.
13. *Прохоров Н.Н.* Физические процессы в металлах при сварке. Т.1.. -М.: Металлургия, 1968. - 698 с.
14. *Теоретические основы сварки* /Под ред. В.В.Фролова - М.: Высшая школа, 1970. - 582 с.
15. *Ерохин А.А.* Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. - М.; Машиностроение, 1973, - 448 с.
16. *Рыкаллин Н.Н.* Расчет тепловых процессов при сварке. - М.: Машиностроение, 1951, - 296 с.
17. *Статистические методы в инженерных исследованиях* (лабораторный практикум): Учеб. пособие /В.П.Бородюк, А.П. Вощинин, А.З.Иванов и др.; - М.: Высшая школа, 1983. - 218 с.
18. *Волченко В.Н.* Вероятность и достоверность оценки качества металлографии. - И.: Металлургия, 1979. - 88 с.
19. *Спирилонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1981. - 184 с.
20. *Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П.* Технология и оборудование сварки плавлением. - М.: Машиностроение, 1977,- 432 с.
21. *Сварка в машиностроении: Справочник в 4 томах.* /Ред. кол.: Г.А.Николаев /пред./ и др. - М.: Машиностроение, 1979, т. 3 /Под ред. В.А. Винокурова. 1979. - 567 с.

### Коротко об авторах

Григоренко В.В. – кандидат технических наук,  
Киселёв О.Н. – кандидат технических наук,  
Бобылев Ю.Н. – кандидат технических наук,  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, [ud@mstu.ru](mailto:ud@mstu.ru)