

УДК 001.891.572

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДАМИ ЩО ПОКРТІТО ЕКЗОТЕРМІЧНОЮ СУМІШШЮ

С.О. Шевцов<sup>1</sup>, Д.А. Волков<sup>2</sup>

Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ  
<sup>1</sup>e-mail: sheser@rambler.ru, <sup>2</sup>e-mail: vda300577@ukr.net

Зростання продуктивності процесів зварювання є однією з головних задач, серед тих що постають перед розробниками зварювальних та наплавних матеріалів. Для покращення зварювально-технологічних властивостей електродів та покращення результатів зварювання було запропоновано використати ефект екзотермічних реакцій [1-2]. До складу матеріалів покриття електродів додається екзотермічна суміш в вигляді відповідних окислювачів та розкислювачів. При цьому, головні параметри режиму зварювання: сила зварювального струму ( $I_{зв}$ ), напруга холостого ходу джерела живлення ( $U_{х.х.}$ ), коефіцієнт маси покриття ( $K_p$ ) і відношення в покритті окислювача та розкислювача ( $\alpha$ ) також суттєво впливають на термодинамічні характеристики нагрівання та плавлення електродів с екзотермічною сумішшю в покритті, що в свою чергу впливає на характер переносу електродного металу, нагрів виробів і глибину проплавлення при зварюванні.

Ціль досліджень: на основі експериментальних даних моделювання функцій котрі визначають важливі характеристики зварювання, а також визначення оптимальних параметрів режимів дугового зварювання з використанням математичного апарату: математичної статистики, математичного аналізу, лінійної алгебри.

Для розв'язку поставленої задачі були проведені експериментальні дослідження основних режимів зварювання: сили зварювального струму ( $I_{зв}$ , змінна  $X_1$ ), напруга холостого ходу ( $U_{х.х.}$ , змінна  $X_2$ ), коефіцієнту маси покриття ( $K_p$ , змінна  $X_3$ ) и відношення вмісту окислювача та розкислювача ( $\alpha$ , змінна  $X_4$ ) на характеристики плавлення електродів с екзотермічною сумішшю в покритті: коефіцієнт наплавки ( $\alpha_n$ , вихідна функція  $Y_1$ ), коефіцієнт розплавлення електродного стрижня ( $\alpha_{р.ст.}$ , вихідна функція  $Y_2$ ), коефіцієнт втрат ( $\psi$ , вихідна функція  $Y_3$ ), коефіцієнт розбризкування електродного металу ( $\psi_{р.м.}$ , вихідна функція  $Y_3$ ), коефіцієнт виходу пригожого ( $K_r$ , вихідна функція  $Y_3$ ).

Залежність функцій оцінки якості зварювання від незалежних змінних  $X_i$  (факторів) визначалась в вигляді квадратичних функцій:

$$Y = b_0 + \sum_{i=0}^K b_i x X_i + \sum_{i<j}^K b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

Для оцінки всіх коефіцієнтів квадратичної моделі використовували результати експериментів (надалі – план), в котрому кожна змінна варіюється принаймні в трьох різних рівнях, відповідна матриця є не виродженою. Методом найменших квадратів були визначені коефіцієнти залежностей вигляду (1) при цьому було створену відповідну програму для ПЕОМ [3-4].

В результаті статистичної обробки отриманих моделей с довірчим інтервалом на рівні 95% було визначено, що моделі адекватні [5].

Після виключення незначущих коефіцієнтів функції якості прийняли вигляд:

$$Y_1 = -21,24 + 0,03X_1 + 0,28X_2 - 5,88X_3 + 10,72X_4 - 0,0006X_1X_2 + 0,0207X_1X_3 + 0X_1X_4 - 0X_2X_3 - 0,0146X_2X_4 - 1,33X_3X_4 + 0,000006X_1^2 - 0,00075X_2^2 + 3,412X_3^2 - 1,129X_4^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = -34,6028 + 0,122X_1 + 0,181X_2 + 18,31X_3 + 10,37X_4 - 0,0014X_1X_2 - 0,0065X_1X_4 - 0,173X_2X_3 + 0,0554X_2X_4 - 1,317X_3X_4 - 0,0000067X_1^2 - 0,00003401X_2^2 + 0,009259X_3^2 - 1,512X_4^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 162,51 - 0,547X_1 - 0,775X_2 - 134,89X_3 - 10,377X_4 + 0,00502X_1X_2 + 0,0001667X_1X_3 + 0,0057X_1X_4 + 1,83X_2X_3 - 0,38X_2X_4 + 4,25X_3X_4 - 0,00000067X_1^2 - 0,0000085X_2^2 - 134,89X_3^2 + 2,49083X_4^2 \quad (4)$$

$$Y_4 = 53,94 - 0,2069X_1 + 0,0184X_2 - 0,2634X_3 - 10,713X_4 + 0,0116X_1X_4 + 0,00357X_2X_3 + 0,00029183X_1^2 - 0,00004252X_2^2 + 0,0231X_3^2 + 0,9196X_4^2 \quad (5)$$

$$Y_5 = -26,943 + 0,4065X_1 + 0,5536X_2 + 73,15X_3 + 5,436X_4 - 0,0035X_1X_2 - 0,043X_1X_4 - 1,4166X_2X_3 + 0,2821X_2X_4 + 5,436X_4^2 \quad (6)$$

Квадратичні форми (2–6) методами матричної алгебри [6] приведемо до канонічного вигляду:

$$Y - Y_c = \sum_{i=1}^K \theta_i z_i^2 \quad (7)$$

Згідно з теорію квадратичних форм визначаємо власні значення та відповідні їм власні вектори, це робили також створивши відповідний блок в програмі для ПЕОМ. В результаті отримали:

$$Y_1 - 10,659 = -1,225z_1^2 - 0,0008176z_2^2 + 0,000092063z_3^2 + 3,508z_4^2 \quad (8)$$

$$Y_2 - 12,9429 = -1,757z_1^2 - 0,0289z_2^2 + 0,0001023z_3^2 + 0,283549z_4^2, \quad (9)$$

$$Y_3 - 15,329 = -1,692347z_1^2 - 0,000154z_2^2 + 0,4472z_3^2 + 3,73148z_4^2, \quad (10)$$

$$Y_4 - 6,5978 = -0,00009705z_1^2 + 0,000253z_2^2 + 0,02328z_3^2 + 0,919616z_4^2, \quad (11)$$

$$Y_5 - 55,285 = 1,862723z_1^2 - 0,699921z_2^2 + 0,000249z_3^2 + 0,712395z_4^2, \quad (12)$$

де формули переходу до нової системи координат:

$$z_1 = -3,98784 - 0,0011988X_1 + 0,005917X_2 + 0,1423X_3 + 0,9898X_4;$$

$$z_2 = 146,2843 - 0,3479X_1 - 0,93749X_2 + 0,0020097X_3 + 0,004894X_4;$$

$$z_3 = 115,787 - 0,9375X_1 + 0,34795X_2 + 0,00215X_3 + 0,003526X_4;$$

$$z_4 = 1,04723 - 0,002916X_1 - 0,0002967X_2 - 0,98982X_3 + 0,1423X_4.$$

Функціональні залежності (19–22) задають поверхні типу міні-макс, координати вершин котрих приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Координати екстремальних точок і значення виходів в них

	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$
$X_{1c}$	159,45	31,7159	216,2137	275,1908	-39,5634
$X_{2c}$	98,87	76,659	64,4705	197,967	51,6231
$X_{3c}$	1,0609	2,0217	0,63357	-9,5763	1,64163
$X_{4c}$	3,4903	3,885	3,9216	4,0969	5,8635
$Y_c$	10,66	12,942	15,329	6,59	55,285

Після проведення оптимізації отриманих результатів, визначили найоптимальніші показники процесу зварювання, та значення вхідних параметрів при котрих ці показники досягаються.

Висновки:

1. Визначені оптимальні параметри режиму ручного дугового зварювання, котрі забезпечують отримання максимального значення коефіцієнту наплавки при мінімальних витратах електродного металу.

2. Установлено функціональний зв'язок між параметрами режимів зварювання та характеристиками плавлення електродів с екзотермічною сумішшю в покритті.

3. Розроблено математичну модель і побудовані рівняння що описують цю модель. Це дозволило визначити наступні оптимальні режими зварювання:  $I_{зв} = 290...310$  А,  $U_{х.х.} = 60$  В. Для даного режиму при  $K_{п} = 0,7$  та  $d_{ст} = 5$  мм показники плавлення мають наступні значення:  $\alpha_{р.ст.} = 11,9...12,1$  г/(А·ч),  $\alpha_{н} = 12,9...13,2$  г/(А·ч),  $\psi = 13,0...13,5$  %,  $K_{г} = 65...66$  %,  $\psi_{р.м.} = 4,7...4,8$  %.

4. Приведений метод можна використовувати в інших випадках дугового зварювання, для визначення оптимальних режимів.

## Література

1. Походня, И. К. Сварочные материалы: Состояние и тенденции развития / И. К. Походня // Автоматическая сварка. – 2003. – №3.– ISSN 0005-111X.

2. Карпенко, В. М. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов, Г. Б. Билык // Сварочное производство.–1980.–№ 9.

3. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софина О. Ю., Шушура О. М. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислення.: Навчальний посібник, 2013

4. Вентцель А. Д. Курс теории случайных процессов /Вентцель А. Д.–М.:Наука, 1996.

5. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление/ Пискунов Н. С. – М., 1972.

6. Холькин А.М. Высшая математика. Часть 1. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии: Учебник / А.М. Холькин. – Мариуполь: ПГТУ, 2016.