

## РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.3

**М.Г. Болотов**, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ПАРАМЕТРИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВУ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ПОРОЖНИСТИМ КАТОДОМ

*Шляхом застосування статистичних методів математичного планування експерименту проведено дослідження по визначенню основних параметрів керування процесом нагріву при дифузійному зварюванні із застосуванням плазми тліючого розряду, що горить у порожнистому катоді.*

**Ключові слова:** дифузійне зварювання, тліючий розряд, параметри керування, плазма.

*Путем применения статистических методов математического планирования эксперимента проведены исследования по определению основных параметров управления процессом нагрева при диффузионной сварке с применением плазмы тлеющего разряда, горящего в полой катоде.*

**Ключевые слова:** диффузионная сварка, тлеющий разряд, параметры управления, плазма.

*Through the application of statistical methods of mathematical planning of the experiment conducted a study to identify the main parameters of the process control heating by diffusion welding with the use of plasma of a glow discharge, burning through the hollow cathode.*

**Key words:** diffusion welding, glow discharge, parameters of control, plasma.

**Вступ.** Дифузійне зварювання – спосіб з'єднання деталей із різнорідних матеріалів без розплавлення за рахунок термомеханічного впливу на них протягом деякого проміжку часу.

Технологічні можливості дифузійного зварювання дозволяють широко використовувати цей процес у приладобудуванні та електронній промисловості під час створення металокерамічних вузлів, вакуум-щільних з'єднань із різнорідних матеріалів, напівпровідникових приладів. Також дифузійне зварювання знаходить застосування для виготовлення великогабаритних деталей складної форми, отримання яких способами механічної обробки (тиском, литтям) неможливо або неекономічно.

У зв'язку з різноманітністю форм виробів та сполучень матеріалів, що з'єднуються дифузійним зварюванням, на практиці набули широке застосування різні способи нагріву (радіаційний, індукційний, струмом, що проходить у полі нормального тліючого розряду), які відрізняються один від одного способом введення теплової енергії в зону з'єднання.

Дослідження, проведені в роботах [1; 2; 3; 4] показали високу ефективність застосування як джерела нагріву при дифузійному зварюванні тліючого розряду, що горить у порожнистому катоді, який забезпечує високі енергетичні показники процесу та підвищує технологічність дифузійного зварювання в цілому.

Якість з'єднання при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом, крім основних технологічних параметрів (температура, тиск, час витримки), визначається комплексом додаткових параметрів, таких як тиск газового середовища ( $P$ ), напруга на електродах ( $U$ ), діаметр катодної порожнини ( $D_k$ ) тощо.

Залежно від форми, розмірів і матеріалу виробу ці параметри можуть змінюватися у широкому діапазоні значень, що значною мірою ускладнює керування процесом нагріву.

**Постановка проблеми.** Традиційні методи досліджень пов'язані з експериментами, що вимагають великих витрат, сил і засобів, оскільки є "пасивними" – ґрунтованими на почерговому варіюванні окремих незалежних змінних в умовах, коли інші прагнуть зберегти їх незмінними.

Експерименти при зварюванні в твердій фазі, як правило, багатофакторні і пов'язані з оптимізацією умов проведення технологічних процесів. Тому у зв'язку з відсутністю реальної можливості повною мірою вивчити значну кількість об'єктів такого дослідження, з'являється необхідність у застосуванні статистичних методів планування експерименту.

Температура зони зварювання залежить від багатьох чинників, що значно ускладнює процес нагріву тліючим розрядом з порожнистим катодом, внаслідок чого рішення

цієї задачі вимагає вибору з усієї сукупності параметрів режиму найбільш оптимальних, тобто параметрів, найбільш тісно пов'язаних з температурою. Визначення цих параметрів традиційними способами у цьому випадку ускладнено, тому їх вибір здійснювали за допомогою оцінки коефіцієнтів при відповідних чинниках статичних моделей, побудованих за допомогою методів математичного планування експерименту [5].

**Методи та результати.** У модель заносилася сукупність параметрів з урахуванням можливості визначення їх кількісної оцінки.

Як параметр оптимізації призначили температуру в зоні нагріву. Варійованими факторами приймали: величину тиску в розрядній камері  $P(x_1)$ , напругу на електродах  $U(x_2)$ , величину активного опору в колі розряду  $R(x_3)$  і діаметр катодної порожнини  $D_k(x_4)$ .

Відомості про їх вплив на процес нагріву тліючим розрядом у порожнистому катоді отримували експериментально шляхом виміру температури зони нагріву в процесі її теплонасичення через кожних 60 секунд з моменту запалення розряду і по досягненню граничного теплового стану.

Інтервали варіювання факторів та їх числові значення на верхньому і нижньому рівнях наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

*Рівні та інтервали варіювання факторів*

Рівні та інтервали	Фактори			
	$x_1, Па$	$x_2, В$	$x_3, кОм$	$x_4, мм$
Основний рівень	30	1100	15	50
Інтервали варіювання $\Delta x$	10	300	10	10
Верхній рівень ( $x_1 = +1$ )	40	1400	25	60
Нижній рівень ( $x_1 = -1$ )	20	800	5	40
Функція відгуку – температура нагріву деталей				

Застосовували повний факторний експеримент, матриця якого має вигляд  $2^4$  (табл. 2).

Таблиця 2

*Матриця планування експериментів*

Номер досліду	Рівні факторів				Параметр оптимізації $y, К$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
1	–	–	–	+	$y_1$
2	+	–	–	–	$y_2$
3	–	+	–	–	$y_3$
4	+	+	+	+	$y_4$
5	–	–	–	–	$y_5$
6	+	–	+	–	$y_6$
7	–	+	+	–	$y_7$
8	–	+	–	+	$y_8$
9	+	+	–	–	$y_9$
10	–	–	+	+	$y_{10}$
11	–	–	+	–	$y_{11}$
12	+	+	+	–	$y_{12}$
13	+	–	–	+	$y_{13}$
14	+	+	–	+	$y_{14}$
15	+	–	+	+	$y_{15}$
16	–	+	+	+	$y_{16}$

Модель, яка відповідає цій таблиці, матиме вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4. \quad (1)$$

Коефіцієнти при відповідних факторах рівняння розраховувалися за формулою, рекомендованою в роботі [6].

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N}, j = 0, 1, \dots, k; \quad (2)$$

де  $\sum_{i=1}^N x_{ji}$  – алгебраїчна сума елементів вектор – стовпця кожного фактора;

$i$  – номер досліду;  $j$  – номер фактора;  $N$  – число дослідів.

Коефіцієнт  $b_0$  знаходили як середнє арифметичне значення параметра оптимізації,  $b_0 = 258,125$ ;  $b_1 = 26,9$ ;  $b_2 = 79,4$ ;  $b_3 = -73,125$ ;  $b_4 = -23,125$ .

Оскільки коефіцієнти при незалежних змінних вказують на силу впливу фактора, тобто чим більше чисельна величина коефіцієнта, тим сильніше фактор впливатиме на параметр оптимізації, то можна зробити висновок, що найбільш впливовим параметром є напруга на електродах. Зі збільшенням значення цього фактора параметр оптимізації (температура в зоні зварювання) збільшується.

Найбільш негативно на процес нагріву тліючим розрядом у порожнистому катоді впливає активний опір у колі розряду, оскільки зі збільшенням цього параметра температура зменшується, про що свідчить від’ємне значення цього коефіцієнта.

Наочно вплив кожного з факторів, що варіюються, на параметр оптимізації демонструють графіки, що наведені на рисунку 1.

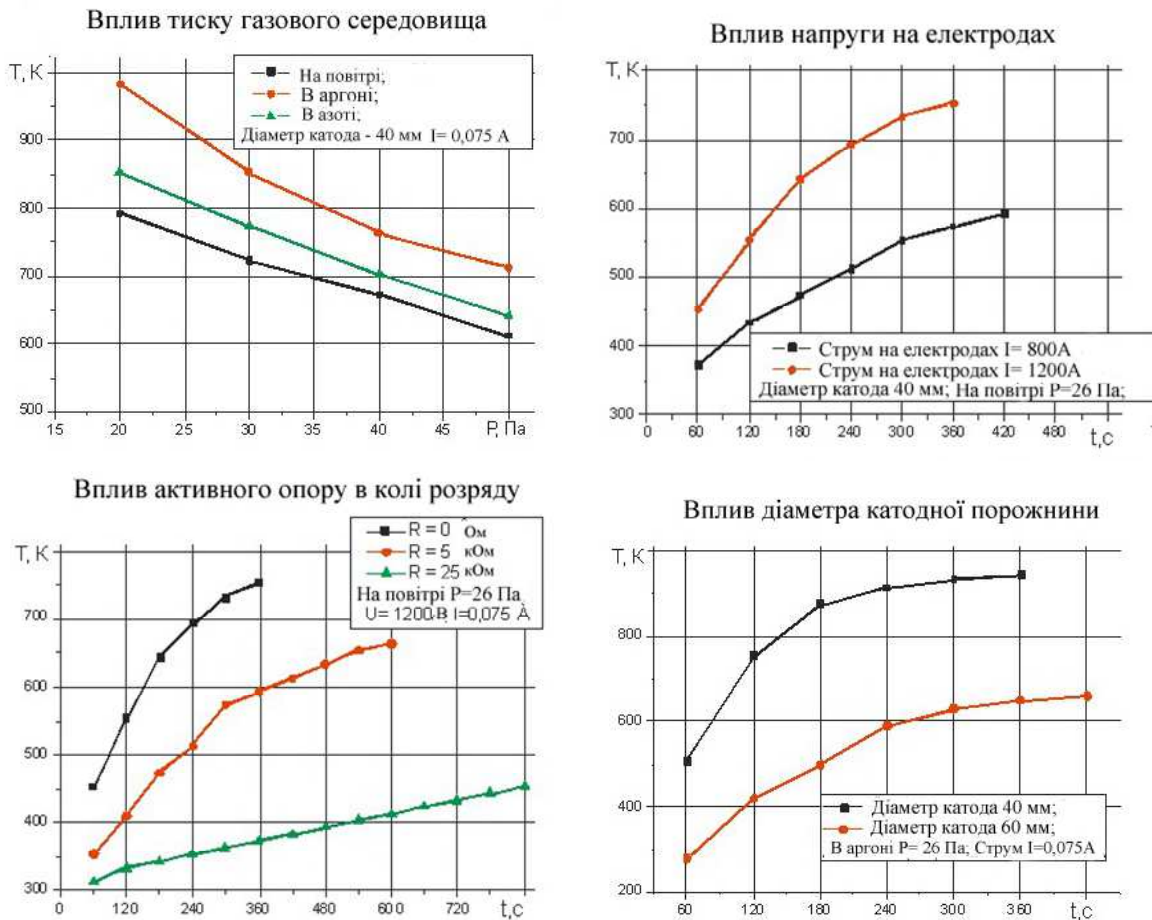


Рис. 1. Характер впливу факторів, що варіюються (тиск газового середовища, напруга на електродах, діаметр катодної порожнини, активний опір у колі розряду) на функцію відгуку (температуру в зоні нагріву)

Таким чином, з урахуванням розрахунків, виконаних за формулою (2), регресійна модель набуває вигляду:

$$y = 258 + 27x_1 + 79x_2 - 73x_3 - 23x_4. \quad (3)$$

Розрахунок параметрів оптимізації  $y'$  в цьому рівнянні показав значну погрішність відносно експериментальних даних (таблиця 3). Це означає, що аналізований процес є складною системою, яку не можна описати лінійною моделлю. Тому для чистоти розрахунків необхідно враховувати не лише лінійні члени  $b_1x_1$ , але й парні взаємодії факторів.

З урахуванням парних взаємодій чинників модель набирає такого вигляду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_{12} + b_{13}x_{13} + b_{14}x_{14} + b_{23}x_{23} + b_{24}x_{24} + b_{34}x_{34} \quad (4)$$

Розрахунок парних коефіцієнтів моделі робили згідно з (2),  $b_{12} = 5,625$ ;  $b_{13} = -11,875$ ;  $b_{14} = -6,875$ ;  $b_{23} = -39,375$ ;  $b_{24} = -1,875$ ;  $b_{34} = 0,688$ .

Розрахункові значення параметра оптимізації з урахуванням парних взаємодій факторів  $y''$  наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

## Результати експериментів

Номер досліджу	Рівні факторів				Експериментальне значення параметра оптимізації $y$ , К	Розрахункове значення параметра оптимізації $y'$ , К	Значення параметра оптимізації з урахуванням парних взаємодій факторів $y''$ , К
	$x_1$ , Па	$x_2$ , В	$x_3$ , кОм	$x_4$ , мм			
1	20	800	4	60	443	476	437
2	40	800	4	40	543	576	546
3	20	1400	4	40	683	680	697
4	40	1400	20	60	483	490	487
5	20	800	4	40	473	522	467
6	40	800	20	40	453	428	454
7	20	1400	20	40	503	532	495
8	20	1400	4	60	663	634	660
9	40	1400	4	40	813	734	799
10	20	800	20	60	383	328	394
11	20	800	20	40	423	374	422
12	40	1400	20	40	543	586	594
13	40	800	4	60	483	530	489
14	40	1400	4	60	733	688	734
15	40	800	20	60	413	328	399
16	20	1400	20	60	463	486	454

Для перевірки гіпотези про адекватність моделі використали критерій Фишера, який ґрунтується на порівнянні двох дисперсій – залишкової і дисперсії неадекватності [5].

Обчислення залишкової дисперсії, що характеризує розкид вимірних  $y_u$  відносно середньої арифметичної  $y_u^=$ , робили за формулою:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{u=1}^N |y_u - y_u^=|^2}{N-1}; \quad (5)$$

де  $N-1$  – число ступенів вільності дисперсії  $S_0^2$ ,  $N-1 = 16 - 1 = 15$ ;  $y_u =$  визначається як:

$$y_u^= = \frac{1}{N} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{16}). \quad (6)$$

Потім розраховували дисперсію неадекватності, що характеризує діапазон зміни експериментальних значень  $y_u$  відносно  $y_u^{\wedge}$ :

$$S_1^2 = \frac{\sum_{u=1}^N |y_u - y_u^{\wedge}|^2}{N - d}, \quad (7)$$

де  $y_u^{\wedge}$  – розрахункові значення параметра оптимізації;

$d$  – кількість факторів.

Адекватність моделі визначали як:

$$F_0 = \frac{S_0^2}{S_1^2}. \quad (8)$$

Порівняння розрахункового значення критерію Фішера з табличним [7] показав, що гіпотеза про адекватність моделі не відкидається.

Незалежну оцінку значущості кожного коефіцієнта проводили шляхом побудови довірчого інтервалу. У нашому випадку довірчі інтервали для усіх коефіцієнтів дорівнюватимуть один одному.

Передусім знаходимо дисперсію коефіцієнта регресії:

$$S^2_{(bj)} = \frac{S^2_{(y)}}{N}. \quad (9)$$

З формули видно, що дисперсії усіх коефіцієнтів дорівнюють один одному, оскільки вони залежать тільки від помилки досліду і числа дослідів.

Довірчий інтервал знаходимо за формулою:

$$\Delta b_j = \pm t S_{(bj)}, \quad (10)$$

де  $t$  – табличне значення критерію Стюдента [8];

$S_{(bj)}$  – квадратична помилка коефіцієнта регресії що визначається як:

$$S_{(bj)} = +\sqrt{S^2_{(bj)}}. \quad (11)$$

Підставляючи отримані значення у формулу (9), визначили, що абсолютна величина усіх коефіцієнтів більше величини довірчого інтервалу, тобто усі коефіцієнти значимі.

### Висновки

1. За допомогою статистичних методів математичного планування експериментів встановлено, що серед досліджуваних параметрів на процес нагріву в тліючому розряді з порожнистим катодом найбільший вплив здійснюють напруга на електродах і опір у колі розряду.

2. Встановлено, що зі збільшенням активного опору в розрядному колі температура нагріву значно знижується. Як було показано в [2], введення активного опору в коло розряду не є обов'язковим, оскільки він має достатню стійкість і при жорсткій характеристиці джерела. Тому доцільним є управління розрядом зміною напруги холостого ходу джерела. Це значно спрощує управління процесом нагріву при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом і усуває появу втрат на зовнішньому опорі.

### Список використаних джерел

1. Болотов Г. П. Дослідження стійкості тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2008. – № 36. – С. 100.
2. Болотов Г. П. Порівняльна оцінка ефективності джерел енергії для дифузійного зварювання у вакуумі / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2010. – № 42. – С. 144-147.

3. Болотов Г. П. Розрахункове визначення температури нагріву деталей при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2009. – № 40. – С. 23-29.

4. Болотов М. Г. Ефективність нагріву при зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом / М. Г. Болотов, Т. Р. Ганєєв // Вісник ЧДТУ. – 2012. – № 55. – С. 126-131.

5. Новик Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении / И. С. Новик. – М.: МИСИС, 1972. – 105 с.

6. Растринин Л. А. Статистические методы поиска / Л. А. Растринин. – М.: Наука, 1968.

7. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений / Л. Яноши. – М.: Мир, 1968.

8. Айвазян С. А. Статистическое исследование зависимостей / С. А. Айвазян. – М.: Metallurgia, 1966.

УДК 621.791.75

**М.В. Миронова**, канд. техн. наук

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

## О ВРАЩЕНИИ КАПЛИ НА ТОРЦЕ ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Моделированием с использованием зондового метода уточнен механизм и причины, обуславливающие вращение капли электродного металла. Установлено, что скорость вращения капли возрастает при увеличении тока через каплю и индукции продольного магнитного поля.*

**Ключевые слова:** дуговая наплавка, продольное магнитное поле, скорость вращения капли.

*Моделиванням з використанням зондового методу уточнено механізм і причини, що зумовлюють обертання краплі электродного металу. Встановлено, що швидкість обертання краплі зростає при збільшенні струму через краплю і індукції подовжнього магнітного поля.*

**Ключові слова:** дугове наплавлення, подовжнє магнітне поле, швидкість обертання краплі.

*The mechanism and the reasons, determining rotation electrode metal drops, are refined by modeling with using probe method. The increase of drop rotation velocity with increasing current through the drop and induction of longitudinal magnetic field is stated.*

**Key words:** arc surfacing, longitudinal magnetic field, drop rotation velocity.

**Постановка проблемы.** Производительность дуговой наплавки определяется производительностью расплавления электродной проволоки. Для получения этого эффекта перспективным является применение внешних (управляющих) магнитных полей, воздействующих на каплю, дугу и жидкий металл сварочной ванны. Магнитное управление имеет преимущества по сравнению с механическими способами управления, поскольку оно осуществляется без непосредственного контакта управляющих устройств с зоной сварки (наплавки) и его применение не требует существенных изменений стандартного оборудования и техники сварки (наплавки). При воздействии продольного магнитного поля (ПРМП) повышается эффективность процесса дуговой наплавки под флюсом: значительно повышается коэффициент расплавления электродной проволоки ( $\alpha_p$ ), уменьшаются глубина и площадь проплавления металла и доля участия основного металла в наплавленном.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Повышение  $\alpha_p$  проволоки при сварке и наплавке в ПРМП в работах [1] объясняют улучшением условий теплопередачи через каплю за счет уменьшения толщины капли в направлении оси электрода при ее вращении под действием электромагнитных сил от взаимодействия радиальной составляющей плотности тока в капле с осевой составляющей индукции ПРМП. Однако в работе [2] было высказано предположение, подкрепленное детальным изучением строения магнитного поля в зоне капли на торце электрода из ферромагнитного материала, что капля вращается в противоположную сторону, относительно направления вращения, которое капля должна иметь по соображениям, высказанным в работе [1]. Не изве-