

2. Показано зв'язок критеріїв оптимізації з оптимальними критеріями Вебера в полі гравітаційних та відцентрових сил.

1. *Промышленная технология лекарств. Т1 / Под ред. В.И. Чуешова. – Харьков: Изд-во НФАУ МТК, 2002. – 557 с.* 2. *Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело-жидкость. – Львів: Изд-во Львов. ун-та, 1970. – 187 с.* 3. *Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів подрібнення твердої сировини під час розчинення та екстракції в полі гравітаційних або відцентрових сил // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 515. – С. 104–116.* 4. *Білонога Ю.Л., Білонога Д.М. Критерій оптимізації гравітаційного процесу екстракції в системі тверде тіло-рідина або рідина-рідина // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 480. – С. 3–6.*

УДК 621.791.763

М.В. Большаков, Г.М. Лукіна

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТАКТНОГО ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

© Большаков М.В., Лукіна Г.М., 2005

Описано математичні моделі контактного точкового зварювання і наближений метод розрахунку параметрів режиму зварювання сталі 20 за критерієм мінімізації розкиду розмірів ядра.

The mathematical models of resistance spot welding and a crude method of welding technique calculating are described. The welding parameters by minimization of nugget dimensions scatter have been optimized.

Під час розробки технологій контактної точкового зварювання параметри режиму підбирають: з літературних джерел [1, 2], розрахунковими методами на основі математичних моделей або користуючись рівнянням теплового балансу. У першому випадку використовують сумісний розв'язок диференціальних рівнянь електричного потенціалу і теплопровідності:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial r} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{j^2 \rho}{c\gamma}. \quad (2)$$

У зв'язку зі складною температурною залежністю питомого опору (ρ), теплопровідності (λ) і теплоємності (c) рівняння (1) і (2) аналітично не розв'язуються, а вимагають числових методів, наприклад, застосування методу кінцевих різниць [2], коли зварний простір розбивають на кінцеві об'єми розміром Δh^3 , а час нагрівання (охолодження) розбивають на малі інтервали Δt і вважають, що в межах Δt температура комірки не змінюється. Отже, процес на короткий час зупиняється. У цей час уточнюються значення густини струму і теплофізичних величин. Для побудови температурного і електричного полів послідовно розв'язують низку алгебраїчних рівнянь відповідно до кількості комірок та інтервалів часу. Математична точність числового розв'язку ітераційних задач за допомогою комп'ютера залежить від кількості точок простору та інтервалів часу.

Для наближеної оцінки параметрів режиму контактної точкового зварювання можна використовувати рівняння теплового балансу

$$Q = Q_{кор} + Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (3)$$

де Q – загальна кількість тепла, яке виділяється в деталях і перехідних контактах; $Q_{кор}$ – корисне тепло, яке витрачається на нагрівання центрального стовпчика діаметром d_T , стиснутого електродами; Q_1 – втрати тепла на нагрівання деталей поза цим стовпчиком; Q_2 – втрати тепла в електроди; Q_3 – втрати тепла за рахунок випромінювання:

$$Q_{кор} = \frac{\pi d_T^2}{4} 2\delta c \gamma T_{nl}, \quad (4)$$

де δ – товщина металу.

За заданої товщини δ величина Q_1 залежить від діаметра кола, в межах якого наприкінці зварювання є помірне підвищення температури. Середню температуру цього кільця вважають такою, що дорівнює $0,25T_{nl}$. Відстань x_0 , на якій спостерігається підвищення температури, залежить від часу зварювання $t_{зв}$ і коефіцієнта температуропровідності a :

$$x_0 = 4\sqrt{at_{зв}}.$$

Для двох деталей завтовшки δ

$$Q_1 = k_1 \pi x_0 (d_T + x_0) 2\delta c \gamma \frac{T_{nl}}{4}, \quad (5)$$

де $2\pi x_0 (d_T + x_0) \delta$ – об'єм кільця; $k_1 \approx 0,8$ – коефіцієнт, який враховує, що середня температура кільця є трохи нижчою за $0,25T_{nl}$.

Втрати в електроди можна визначити, якщо допустити, що температура в контактній електрод-деталь дорівнює

$$T_{ед} = 0,5T_{nl}, \quad (6)$$

а середня температура нагрітої ділянки електрода завдовжки x_0 дорівнює

$$T_e' = 0,25T_{ед}, \quad (7)$$

а його об'єм

$$V_1 = k_2 \frac{\pi d_T^2}{4} x_0, \quad (8)$$

де k_2 – коефіцієнт форми електрода; для сфери $k_2 = 2$, для плоского $k_2 = 1,5$.

Отже,

$$Q_2 = 2k_2 \frac{\pi d_m^2}{4} x_0 c' \gamma' \frac{T_{nl}}{8}, \quad (9)$$

де c' і γ' – теплоємність і густина металу електрода.

Величиною Q_3 можна знехтувати.

У зв'язку зі швидким падінням контактної опору до нуля в тепловому розрахунку використовують значення опору гарячих деталей

$$R_{zap} = A_1 k \rho_T \frac{4\delta_1}{\pi d_e^2} + A_2 k \rho_T \frac{4\delta_2}{\pi d_n^2}, \quad (10)$$

де $d_n \approx d_e + 1,7\delta$; A_1 і A_2 – коефіцієнти, які залежать від співвідношень $d_e/2\delta_1$ і $d_n/2\delta_2$; δ_1 і δ_2 – товщина верхньої та нижньої деталі; ρ_1 і ρ_2 – питомий опір верхньої та нижньої деталей відповідно, за середніх температур (для сталі $T_1 \approx 1200$ °C, $T_2 \approx 1500$ °C і для сплавів алюмінію $T_1 \approx 450$ °C, $T_2 \approx 630$ °C).

За законом Джоуля – Ленца зварювальний струм визначається за виразом

$$I_{зв} = \sqrt{\frac{Q}{m_3 R_{зар} t_{зв}}}, \quad (11)$$

де $m_3 = 1, 2, \dots, 1, 4$ – коефіцієнт, який враховує зміну опору під час зварювання.

Однак навіть правильно розраховані або вибрані параметри зварювання ще не гарантують оптимальності технологічного процесу. Чутливість зварювання до нестабільності параметрів істотно залежить від глибини саморегулювання, що обумовлено взаємодією зварних точок з джерелом живлення, параметри якого при оптимізації підбирають за мінімальною чутливістю процесу до технологічних збурень. Стійкість точкового зварювання до нестабільності технологічних збурень залежить від внутрішнього опору машини. Це впливає з виразу, отриманого диференціюванням залежності потужності тепловиділення в деталях N від опору деталей $R_{зв}$:

$$N = \frac{U_{xx} R_{зв}}{(R_{вн}^2 + R_{зв}^2) + X_{вн}^2}, \quad (12)$$

де $R_{вн}$ і $X_{вн}$ – активний та індуктивний опір машини, а повний опір машини:

$$Z_{вн} = \sqrt{(R_{вн}^2 + X_{вн}^2)}. \quad (13)$$

При $Z_{вн} = R_{зв}$ відхилення опору деталей не викликає зміни потужності, що дає змогу підвищити якість зварних з'єднань.

Відомо, що міцність точкового з'єднання залежить від діаметра точки D і глибини проплавлення [2]. Проплавлення не може виходити на поверхню і бути меншим за $0,2\delta$. Зв'язок проплавлення з енергетичними характеристиками процесу не є лінійним, і для підвищення точності оцінки сумарної дії різних збурень ці дії доцільно оцінювати відхиленням середньої температури \bar{T} в зоні ядра, тобто критерій стабільності зварювання можна записати у вигляді

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta d_i^2}{\left(1 - \frac{\Delta \bar{T}_i}{[\Delta \bar{T}]}\right)^2}, \quad (14)$$

де m – кількість збурень; $\Delta \bar{T}_i$ і $[\Delta \bar{T}]$ – відхилення середньої температури відповідно під дією i -го збурення та того, що викликає проплавлення до $0,2\delta$ або вихід проплавлення на поверхню деталі.

Для знаходження оптимальної величини $Z_{вн}$ необхідно встановити залежність параметрів розкиду S від розмірів ядра, яка може бути записана у вигляді квадратичного полінома:

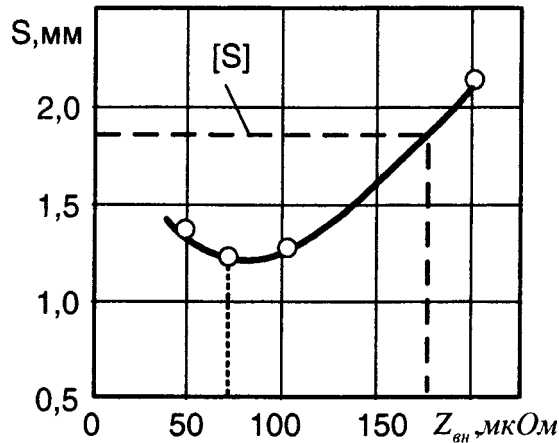
$$S = S_0 + k_1 Z_{вн} + k_2 Z_{вн}^2, \quad (15)$$

де S_0 , k_1 , k_2 – коефіцієнти, для знаходження яких потрібно провести обчислювальні експерименти з оцінки розкиду розмірів ядра за різних значень внутрішнього опору машини, $Z_{вн} = (0,5; 1,0; 1,5)R_{зар}$.

Спочатку потрібно з'ясувати значення напруги короткого замикання U_{xx} для отримання номінальних розмірів ядра за відсутності збурень. Коефіцієнти S_0 , k_1 , k_2 визначаються за допомогою розв'язку системи рівнянь, які отримують підстановкою у рівняння (15) значень критерію S .

На рисунку показано залежність критерію стабільності розмірів ядра від внутрішнього опору зварювальної машини під час зварювання сталі 20 завтовшки $1,8+1,8$ мм струмом 10 кА, тривалістю імпульсу 0,3 с і зусиллям стискання 3 кН. Цю залежність отримано за відхилень зусилля стискання $3S_F = 1$ кН, товщини деталі $3S_0 = 0,1$ мм, діаметра електрода $3S_d = 1$ мм, електроопору в контакті

електрод-деталь $3S_{ед} = 30$ мкОм. Відхилення середньої температури ядра, що викликає пропалювання або непроварювання становить $[\Delta\bar{T}] = \pm 250$ °С, а опір деталі $R_{зв} = 100$ мкОм. Стабільність зварювання визначалась за $Z_{вн} = 50, 100$ і 200 мкОм.



Залежність стабільності розмірів ядра від внутрішнього опору точкових машин

Оптимальне значення $Z_{вн}^{опт} \approx 70$ мкОм, за якого $S_{опт} = 1,1$ мм.

Отже, висока стабільність точкового зварювання забезпечується під час зварювання на машинах з внутрішнім опором, меншим за 200 мкОм.

Висновки. 1. Запропоновано наближені методи розрахунку параметрів режиму точкового контактного зварювання.

2. Встановлено, що навіть використання оптимальних параметрів режимів, а саме – зварювального струму, часу імпульсу і зусилля стискання, не гарантує отримання якісних зварних з'єднань внаслідок впливу зовнішніх збурень.

3. Істотний вплив на розміри зварної точки справляє внутрішній опір точкової машини (переважно опір її вторинного контуру).

4. Встановлено, що висока стабільність точкового зварювання сталі 20 завтовшки 1,8+1,8 мм забезпечується на машинах з внутрішнім опором, меншим за 200 мкОм.

1. Гуляев А.И. *Технология точечной и рельефной сварки сталей.* – М.: Машиностроение, 1978. – 246 с. 2. Гельман А.С. *Технология и оборудование контактной сварки.* – М.: Машгиз, 1960. – 368 с.

