

УДК 537.8, 539.3

Олег Король; Ігор Окіпний, к.т.н., доц.; Богдан Береженко; Олег Гурик, к.т.н., доц.; Любов Цимбалюк, к.ф.-м.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

Анотація. За допомогою розробленої математичної моделі проведено дослідження залежності температури від частоти і сили струму в індукторі та тривалості нагрівання.

Ключові слова: індуктор, відновлення, граничні умови, технологічний тигель.

Oleh Korol; Ihor Okipnyi, Ph.D., Assoc. Prof.; Bohdan Berezhenko; Oleh Huryk, Ph.D., Assoc. Prof.; Lubov Tsymbaliuk, Ph.D., Assoc. Prof.

STUDY AND RESEARCH OF THE TEMPERATURE FIELD DURING RESTORATION OF CYLINDRICAL PARTS

Abstract. With the help of the developed mathematical model, a study of the dependence of the temperature on the frequency and strength of the current in the inductor and the duration of heating was carried out.

Keywords: inductor, recovery, boundary conditions, technological crucible.

Розглянемо спочатку процес індукційного нагріву деталі для проміжку часу $0 \leq t \leq t_k$. Тоді питома потужність джерел Джоулевого тепла описується функцією $W_0(x)$ і температурне поле в деталі описується диференціальним рівнянням [1]

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} = \frac{a}{\lambda} W_0(x). \quad (1)$$

На поверхні деталі $x=0$ має місце конвективний теплообмін із зовнішнім середовищем, а границю шару $x=H$ вважаємо теплоізованою, тобто

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} - hT^* = 0 \quad \text{при } x=0, \quad T^* = T - T_c, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x=H. \quad (3)$$

Тут $h = \frac{\alpha}{\lambda}$, α - коефіцієнт тепловіддачі, $T_c = \text{const}$ - температура зовнішнього середовища.

В початковий момент часу температура в деталі дорівнює температурі зовнішнього середовища $T^* = 0$ при $t = 0$. (4)

Розв'язок задачі шукаємо з використанням методу Фур'є. Подамо розв'язок однорідного рівняння у вигляді $T_1 = \theta(t) \cdot X(x)$.

Тепер розв'язок неоднорідного рівняння шукаємо у вигляді

$$T^* = \sum_{j=1}^{\infty} \theta_j(t) X_j(x). \quad (5)$$

Отримаємо:

$$\sum_{j=1}^{\infty} \frac{d\theta_j}{dt} X_j - a \sum_{j=1}^{\infty} \theta_j(t) \frac{d^2 X_j}{dx^2} = \frac{a}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} w_j X_j.$$

Для знаходження $\theta_j(t)$ отримуємо рівняння

$$\frac{d\theta_j}{dt} + av_j^2\theta_j = \frac{a}{\lambda}w_j, \quad (6)$$

розв'язок якого, що задовольняє початкову умову, має вигляд

$$\theta_j(t) = \frac{w_j}{\lambda v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t}).$$

Таким чином, розв'язок задачі (4) - (7) такий

$$T^*(x, t) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{w_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t}) (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x). \quad (7)$$

Розглянемо тепер процес нагріву на проміжку часу $t_k < t \leq \tau$. Тоді питома потужність джерел джоулевого тепла описується функцією $W(x) = W_1(x) \cdot U_-(x_k - x) + W_2(x) \cdot U_+(x - x_k)$ і температурне поле в деталі описується

$$\text{диференціальним рівнянням} \quad \frac{\partial T_1^*}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T_1^*}{\partial x^2} = W(x). \quad (8)$$

Граничні умови на T_1^* залишаються такими ж, як і в попередній задачі, тобто

$$\frac{\partial T_1^*}{\partial x} - hT_1^* = 0 \quad \text{при} \quad x = 0, \quad (T_1^* = T - T_c) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_1^*}{\partial x} = 0 \quad \text{при} \quad x = H, \quad (10)$$

а початкова умова прийме вигляд

$$T_1^* = T^*(x, t_k) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{w_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t_k}) (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x), \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (11)$$

Тобто початкова температура в деталі на другому етапі нагріву дорівнює температурі, яка була досягнута на кінець попереднього етапу нагріву.

Загальний розв'язок задачі запишеться так

$$T_1^*(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{\bar{w}_j}{\lambda v_j^2} + D_j e^{-av_j^2 t} \right) (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x).$$

$$\text{В результаті для постійних інтегрування знайдемо} \quad D_j = \frac{1}{\lambda v_j^2} \left[w_j (1 - e^{-av_j^2 t_k}) - \bar{w}_j \right]$$

і остаточно шуканий розв'язок прийме вигляд

$$T_1^*(x, t) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{\bar{w}_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t}) + \frac{w_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t_k}) e^{-av_j^2 t} \right] (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x). \quad (12)$$

З допомогою формули (12) знаходимо температуру в деталі в будь-який момент часу й у всіх точках деталі у випадку, коли температура в частині деталі перевищує температуру Кюрі, а також розв'язуємо цілу низку задач, пов'язаних з нагрівом деталі з метою створення температури, сприятливої для його нагріву.

Так з допомогою формули (12) досліджено температуру в деталі (рис. 1) при тривалості нагрівання $\tau = 600\text{с}$, кількості витків індуктора $N = 7$ для різних значень частоти струму в процесі досягнення на поверхні циліндричної деталі температури 1450°C . З графіків видно, що в наведених випадках температура в деталі починає зростати при $x = 0,30\text{ м}$, а координата точки на стику деталі й осі дорівнює $x = 0,3675\text{ м}$, тобто в цій точці температура ще не збільшується, але вже потрібно вживати заходи для недопущення її зростання, бо після заливання розплавленого металу в утворений тигель температура в деталі може збільшуватися. З рисунка 2 видно, що температура на

поверхні деталі зростає при збільшенні тривалості нагрівання. Так, якщо в індукторі із частотою $f = 1000$ Гц та струмом $I_i = 1800$ А, $N = 7$ за час 100с досягається температура 900°C на поверхні, тоді як при $x = 0,115$ м вона дорівнює тільки 50°C . Тоді як при $\tau = 700$ с найбільша температура $T = 1520^\circ\text{C}$, а $T = 50^\circ\text{C}$ досягається при $x = 0,245$ м.

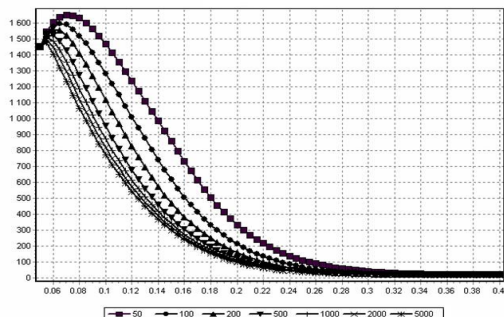


Рисунок 1 – Залежність температури в деталі T_4 від біжучої координати при тривалості нагрівання $\tau = 600$ с і при різних значеннях частоти струму f в процесі досягнення на ободі деталі температури $T_4 = 1450^\circ\text{C}$, коли індуктор має $N = 7$ витків

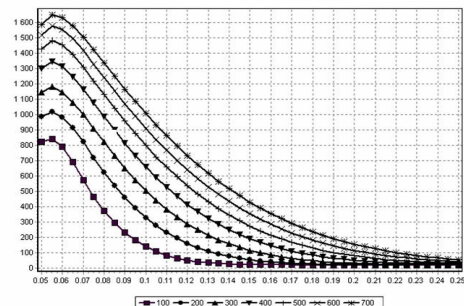


Рисунок 2 – Залежність температури в деталі T_4 від біжучої координати при різних значеннях тривалості нагрівання τ на частоті $f = 1000$ Гц при струмі $I = 2000$ А, коли індуктор має $N = 7$ витків

Проведено дослідження температурного поля у випадку, коли в усій області зношеної робочої поверхні деталі циліндричної форми, температура перевищує температуру Кюрі. Температура створюється в деталі з метою зменшення градієнта температури після заливання розплавленого металу в створений тигель з метою нарощування деталі та покращення дифузії розплавленого металу в матеріал тіла обертання. Знайдено алгоритм визначення температурного поля в деталі, що створюється індуктором, проведено його дослідження в процесі досягнення на поверхні температури 1450°C при різних часах нагрівання та різних частотах. Отримано формули для визначення потужності теплових джерел, що витрачається власне в деталі на її нагрівання. Та досліджено її залежно від частоти струму, сили струму й часу нагрівання. Показано, що зі зростанням частоти потужність і сила струму знижується, направляючись до якоїсь (знайденої) величини (тобто проходить насичення). Зі зменшенням часу нагрівання необхідна потужність і сила струму зростають. Установлено, що для розроблення технологій нарощування спрацьованих робочих поверхонь деталей циліндричної форми з метою ремонту необхідно нагріти його підготовлену торцеву частину до $1300\text{--}1450^\circ\text{C}$ з метою підготовки технологічного тигеля до заливання в нього розплавленого металу та подальшого остигання основного металу разом із залитим металом у тигель. Причому при $1450\text{--}1600^\circ\text{C}$ як залитий рідкий метал, так і підготовлений на границі між ними основний метал будуть у рідкому стані й у складі рідкого металу й аустеніту. Тобто будуть створені умови для їхнього взаємного перемішування та дифузії, що буде сприяти їхньому дійсному з'єднанню. Таке попереднє нагрівання необхідно використовувати для реалізації технології виготовлення бандажа з необхідним натягом.

Перелік посилань

1. Король О. І. Математична модель визначення температурного поля при відновленні деталей циліндричної форми / О. Король // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 75. — № 3. — С. 223-231.