

УДК 621.791.927.7

О.І. Король, М.С. Базар, Л.І. Цимбалюк, к.ф.-м.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ТЕПЛОВИХ ДЖЕРЕЛ ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАГРІВАННІ ДЕТАЛІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

О.І. Korol, M.S. Basar, L.I. Tsybalyuk Ph.D., Assoc. Prof.

INVESTIGATION OF HEAT POWER DENSITY UNDER INDUCTION HEATING OF CYLINDRICAL-SHAPED PART

Розроблено математичну модель для визначення питомої потужності теплових джерел, яка необхідна для одночасного нагрівання спрацьованої деталі по всій її поверхні з метою нарощування її методом заливки рідкого металу в тигель і схоплення його з робочою поверхнею, що дозволяє значно підвищити продуктивність і якість процесу та зменшити матеріальні й трудові затрати в порівнянні з існуючими методами відновлення спрацьованих деталей циліндричної форми.

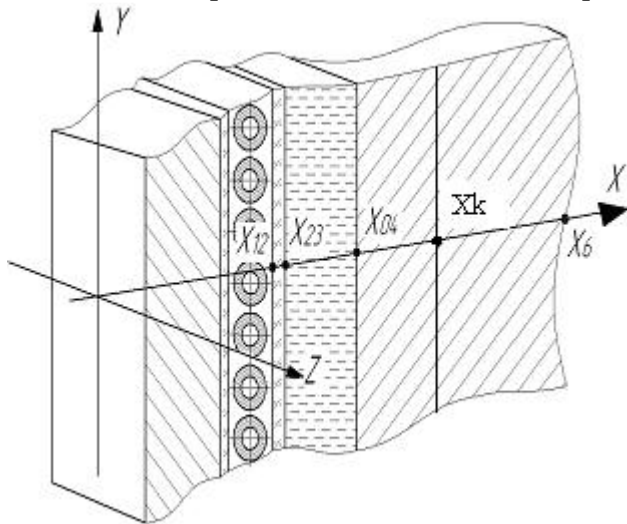


Рис. 1 Розрахункова схема: x_{12} – зона між індуктором та ізоляцією; x_{23} – зона між ізоляцією та розплавленим металом; x_{04} – зона між розплавленим металом та зношеною поверхнею циліндричної поверхні; x_6 – зона між поверхнею деталі та віссю

При індукційному способі нагріву (багатовитковий індуктор охоплює циліндричну деталь на еквідистантній віддалі навколо її спрацьованої поверхні) найбільша температура в деталі буде на її поверхні. Коли ця температура $T_4(x = x_{04})$ перевищує температуру Кюрі $T_k (\approx 755^\circ\text{C})$, область циліндричної деталі розбивається на дві зони $[x_{04}, x_k]$, $[x_k, x_6]$. В першій зоні $[x_{04}, x_k]$ температура перевищує температуру Кюрі T_k , формула для визначення питомої потужності теплових джерел для поверхневого нагріву має вигляд [1]

$$W_{41} = \frac{1}{2} \frac{k_{41}^2}{\gamma_{41}} H_{me4}^2 \frac{M_1^2 + M_2^2}{N_1^2 + N_2^2}, \quad (1)$$

де $k_{41} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu \gamma}{2}}$ – величина, обернена до величини проникнення магнітного поля в розплавлений метал, ω – кругова частота, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна постійна, μ – відносна магнітна проникність матеріалу, $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – питома провідність, сим/м , ρ – питомий опір, Ом·м.

$$H_{me4} = \frac{N \cdot I_i \cdot \sqrt{2}}{a},$$

де N – кількість витків індуктора, що має форму гвинтової лінії, I_i – струм в індукторі, a – висота індуктора,

$$M_1 = (1 + \sqrt{\mu_{42}}) e^{-c(x)} \cos c(x) - (1 - \sqrt{\mu_{42}}) e^{-d(x)} \cos d(x);$$

$$M_2 = (1 + \sqrt{\mu_{42}}) e^{-c(x)} \sin c(x) - (1 - \sqrt{\mu_{42}}) e^{-d(x)} \sin d(x);$$

$$N_1 = (1 + \sqrt{\mu_{42}}) e^{-c(x_{04})} \cos c(x_{04}) + (1 - \sqrt{\mu_{42}}) e^{-d(x_{04})} \cos d(x_{04});$$

$$N_2 = (1 + \sqrt{\mu_{42}}) e^{-c(x_{04})} \sin c(x_{04}) + (1 - \sqrt{\mu_{42}}) e^{-d(x_{04})} \sin d(x_{04});$$

$$c(x) = (k_{42} - k_{41})x_k + k_{41} \cdot x; \quad d(x) = (k_{42} + k_{41})x_k - k_{41} \cdot x.$$

Питома потужність теплових джерел в зоні $[x_k, x_6]$ або $[x_k, \infty]$, де температура нижча від температури Кюрі, визначається за формулою [1]

$$W_{42} = \frac{1}{2} \frac{k_{42}^2}{\gamma_{42}} H_{me4}^2 \frac{M_{12}^2 + M_{22}^2}{N_1^2 + N_2^2} \quad (2)$$

де $k_{42} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_{42} \gamma_{42}}{2}}$ - величина, обернена до величини проникнення магнітного поля в розплавлений метал, $\mu_{42} = 1$ - магнітна проникність матеріалу деталі, $\gamma_{42} = \frac{1}{\rho_{42}} = 10^6 \text{ 1/}$

Ом·м, питома провідність деталі, в нашому випадку $\gamma_{41} = \gamma_{42} = \gamma_k$, ρ_{42} - питомий опір деталі, Ом·м, $M_{12} = 2e^{-k_{42}(x)} \cos k_{42}(x)$; $M_{22} = 2e^{-k_{42}(x)} \sin k_{42}(x)$; $c(x_{04}) = (k_{42} - k_{41})x_k + k_{41} \cdot x_{04}$; $d(x_{04}) = (k_{42} + k_{41})x_k - k_{41} \cdot x_{04}$.

Питому потужність теплових джерел у всій деталі циліндричної форми можна подати у вигляді [2]

$$W = W_{41} \cdot U_-(x_k - x) + W_{42} \cdot U_+(x - x_k), \quad (3)$$

де $U_-(x_k - x)$ і $U_+(x - x_k)$ - асиметричні одиничні функції, що визначаються за формулами

$$U_-(x_k - x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x_k - x \geq 0 \text{ або } x \leq x_k; \\ 0 & \text{при } x_k - x < 0 \text{ або } x > x_k \end{cases}; \quad U_+(x - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{при } x - x_k > 0 \text{ або } x > x_k \\ 0 & \text{при } x - x_k \leq 0 \text{ або } x \leq x_k \end{cases} \quad (4)$$

Користуючись формулами (1), (2) та представленням з допомогою одиничних функцій Хевісайда (3), знайдено питому потужність W теплових джерел у всій області деталі. При визначенні останньої через W_{41} і W_{42} враховано припущення, які були прийняті для забезпечення їх неперервності при переході через границю ($x = x_k$) між зонами, де температура вища від температури Кюрі та зоною з температурою нижчою від температури Кюрі. Користуючись формулами (3), обчислено питому потужність W теплових джерел в залежності від частоти струму, величини струму, кількості витків індуктора, а також продемонстровано можливість досягнення температури 1450 °С на торці поверхні деталі для різних параметрів індуктора та часу нагрівання. За допомогою розробленої математичної моделі проведено дослідження впливу низки факторів на величину температурного поля теплових джерел.

Література

1. Шаблій О.М. Створення температурного поля на торці спрацьованого металевого колеса коли температура перевищує температуру Кюрі [Текст] / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Король О.І., Базар М.С. // Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. - №1 - 2012. - С. 208 - 219.

2. Корн Г. Справочник по математике. [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. // - М.: Наука, 1973. - 831 с.