

УДК 537.8, 539.3

О.І. Король, Б.М. Береженко

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

## РОЗРАХУНОК ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ТЕПЛОВИХ ДЖЕРЕЛ ПРИ ІНДУКЦІЙНІМ НАГРІВАНІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

О.І. Korol, B.M. Berezhenko

### CALCULATION OF THERMAL SOURCES SPECIFIC CAPACITY UNDER INDUCTION HEATING CYLINDER PART

В роботі [1] побудовані математичні моделі індукційного нагріву, електропровідного шару, півпростору, біметалічного шару і нескінченного суцільного порожнинного циліндрів. Отримані розв'язки відповідних задач методами інтегральних перетворень для випадку, коли струмами заміщення в області електропровідного тіла нехтують. В роботі [2] запропоновано математичну модель і методику чисельного моделювання електромеханічних, теплових і механічних процесів в електропровідних тілах за індукційного нагріву з використанням методу скінчених елементів і методу зважених залишків.

Одним з ефективних способів відновлення експлуатаційних властивостей спрацьованих деталей циліндричної форми є нарощування спрацьованої робочої поверхні деталі розплавленим металом. Для цього необхідно попередньо підготовлену до нарощування поверхню нагріти до високої температури (близької до температури плавлення основного металу) для того, щоб відбулося надійне з'єднання розплавленого і основного металу. Виходячи з умов забезпечення необхідної точності, а також з економічних міркувань, найбільш прийнятливим є індукційний нагрів одночасно всієї робочої поверхні деталі. Для побудови раціональних режимів такого нагрівання потрібно побудувати відповідну математичну модель і на її основі провести необхідні дослідження. В даній роботі ми пропонуємо математичну модель і методику дослідження електромагнітних і температурних полів в процесах індукційного нагріву циліндричних деталей. Побудовано математичну модель процесу індукційного нагріву нескінченного суцільного циліндра індуктором скінченої довжини, отримано розв'язки задач для деяких часткових випадків методами інтегральних перетворень Фур'є для наближення, коли струмами зміщення для електропровідного тіла нехтують.

Розглянемо довгий суцільний циліндр радіуса  $R_0$ , вісь симетрії якого співпадає з віссю  $z$ . Циліндр поміщений в коаксіальний з ним індуктор радіуса  $R_1$  і довжиною  $2h$ .

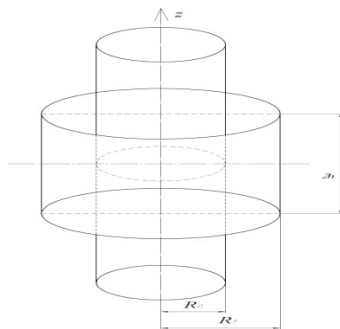


Рис. 1. Розрахункова схема:  $R_0$  - радіус циліндра,  $R_1$  - радіус індуктора,  $2h$  - висота індуктора.

Отримано формули для визначення питомої потужності теплових джерел при індукційному нагріві суцільного циліндра індуктором такої ж довжини. Потужність джерел тепловиділення знаходиться за формулою

$$Q(r) = \frac{\sigma}{2} E(r) \bar{E}(r) = \frac{\sigma (\mu_0 \mu \omega R_1 j_0)^2}{2 R_0^2 (e^2 + g^2)} [A^2(r) + B^2(r)],$$

де введено наступні позначення

$$A(r) = -[Y_1(k_0 R_1) \text{ber}_1(k^* r) + J_1(k_0 R_1) - \text{bei}_1(k^* r)],$$

$$B(r) = Y_1(k_0 R_1) \text{ber}_1(k^* r) - J_1(k_0 R_1) - \text{bei}_1(k^* r),$$

$$e = \mu k_0 a_{10} + \frac{\mu_0 k^*}{\sqrt{2}} (a_{10} + b_{01}), \quad g = \mu k_0 b_{10} + \frac{\mu_0 k^*}{\sqrt{2}} (b_{01} - a_{01}),$$

$$a_{mn} = ber_m(k^* R_0) J_n(k_0 R_0) - bei_m(k^* R_0) Y_n(k_0 R_0), \quad b_{mn} = bei_m(k^* R_0) J_n(k_0 R_0) + ber_m(k^* R_0) Y_n(k_0 R_0),$$

$k^* = \sqrt{\omega \mu \sigma}$ ,  $\sigma$  - питома об'ємна провідність  $j_0$  - густина струму в індукторі,  $R_0, R_1$  - радіус циліндра та індуктора,  $ber_n(x)$ ,  $bei_n(x)$  - функції Кельвіна,  $J_n(x)$ ,  $Y_n(x)$  - функції Бесселя.

Для знаходження температурних полів розв'язується задача нестационарної теплопровідності для індукційного нагріву із джерелами знайденої потужності.

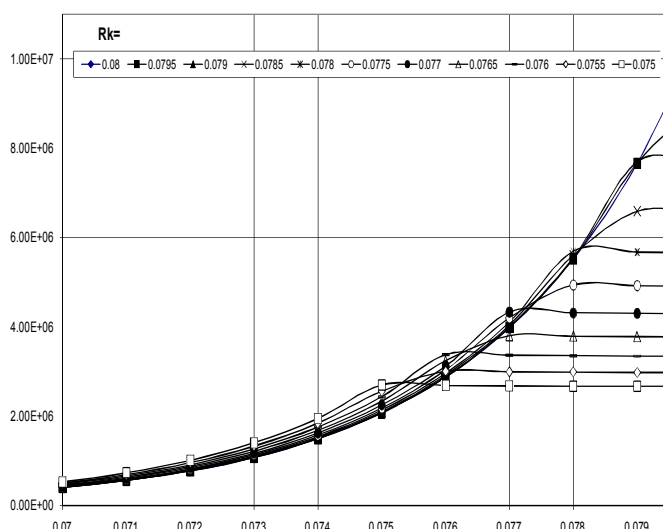


Рис. 2. Залежність потужності джерел тепла від радіуса циліндра.

В процесі індукційного нагріву циліндра відбувається зростання температури при поверхневого шару і в деякий момент часу появляється область температури в якій перевищує температуру Кюрі (близько 750-770 °C).

В такій області магнітна проникливість матеріалу різко падає і стає близькою до магнітної проникливості вакууму. В зв'язку з цим розглянемо випадок, коли можна вважати циліндр двохшаровим. В області (I)  $R_k \leq r \leq R_0$  магнітна проникливість і питома об'ємна провідність  $\mu_1$  і  $\sigma_1$ , а в області (II)  $0 \leq r \leq R_k$  - відповідно  $\mu_2$  і  $\sigma_2$ . В технічних розрахунках як правило приймають  $\mu_1 = \mu_0$ , а  $\mu_2 = \mu$ , де  $\mu$  - значення магнітної проникливості матеріалу до втрати ним феромагнітних властивостей. Значення питомої об'ємної провідності в технічних розрахунках приймають  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ .

### Література.

1. Пидстрыгач Я.С. Термоупругость электропроводных тел. [Текст] / Я.С. Пидстрыгач, Я. Й. Бурак, А.Р. Гачкевич, Л.В. Чернявская // – К.: Наукова думка, 1977. – 247 с.
2. Гачкевич О.Р. Математичне моделювання процесу індукційного нагрівання електропровідних тіл. [Текст] / О.Р. Гачкевич, Б. Д. Дробенко // Вісник Львівського університету – №8 – 2004, – С. 97 – 111.

На рисунку 2 приведено графіки залежності питомої потужності джерел тепла, віднесеної до квадрата густини струму в індукторі, від радіуса циліндра для різних значень  $R_k$ . Розрахунки виконані для циліндра радіусом  $R_0 = 0.08 \text{ м.}$ , радіус індуктора  $R_1 = 0.082 \text{ м.}$ ,  $\mu = 16\mu_0$ ,  $\sigma = \frac{1}{11 \cdot 10^{-8}} \frac{\text{См}}{\text{м}}$ . Із збільшенням товщини шару матеріалу, прогрітого вище температури Кюрі (зменшенням  $R_k$ ) питома потужність джерел зменшується і максимум тепловиділення переміщається вглиб циліндра.