

*Створення температурного поля на поверхні спрацьованого металевго колеса, коли температура в частині цієї зони перевищує температуру точки Кюрі / Шаблій О., Пулька Ч., Король О., Базар М. // Вісник ТНТУ. — 2012. — Том 65. — № 1. — С.208-219. — (математичне моделювання. математика. фізика).*

УДК 621.791.927.7

**О. Шаблій, докт. фіз.-мат. наук; Ч. Пулька, докт. техн. наук;  
О. Король; М. Базар**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **СТВОРЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНІ СПРАЦЬОВАНОГО МЕТАЛЕВОГО КОЛЕСА, КОЛИ ТЕМПЕРАТУРА В ЧАСТИНІ ЦЬОЇ ЗОНИ ПЕРЕВИЩУЄ ТЕМПЕРАТУРУ ТОЧКИ КЮРІ**

*Резюме.* Розроблено математичну модель для визначення джерел нагріву, коли температура на торці колеса перевищує температуру Кюрі, яка необхідна для одночасного нагрівання спрацьованого металевго колеса по всій робочій поверхні з метою нарощування його методом заливки рідкого металу в тигель і схоплення його з робочою поверхнею колеса, що дозволяє значно підвищити продуктивність і якість процесу та зменшити матеріальні й трудові затрати в порівнянні з існуючими методами відновлення металевих коліс.

*Ключові слова:* відновлення, граничні умови, пондемоторна сила, тигель, магнітна проникність, електромагнітне поле, напруженість, температура.

**O. Shablii, Ch. Pulka, O. Korol, M. Basar**

## **ESTABLISHMENT OF THE TEMPERATURE FIELD ON SURFACE METAL WHEELS WORN WHEN THE TEMPERATURE IN PART NEAR EXCEED THE TEMPERATURE CURIE POINT**

*The summary.* A mathematical model to determine the sources of heat when the temperature at the wheel ends exceeds the Curie temperature which is necessary for the simultaneous heating of the metal wheels worn throughout the working surface to increase it by pouring molten metal in the crucible and its grip on the wheel working surface that can significantly improve productivity and process quality and reduce material and labor costs compared with existing methods of recovery of metal wheels.

*Key words:* recovery, boundary conditions, pondemotorna force crucible, magnetic permeability, electromagnetic field intensity, temperature.

**Постановка проблеми.** На сьогодні ремонт поверхонь кочення металевих коліс у більшості здійснюється шляхом розточування та багатошарового наплавлення, виготовлення й посадки на колеса готових бандажів. Усі ці технологічні операції не вирішують проблеми до кінця або характеризуються значними енергетичними та матеріальними затратами. Застосування неперервно-послідовних технологій наплавлення коліс довготривале й не забезпечує якісного наплавлення, а виготовлення бандажів та їх посадка на колеса пов'язана з великими як матеріальними, так і часовими затратами.

При відновленні робочих поверхонь спрацьованих металевих коліс методом заливки рідкого металу в тигель [1, 2, 3, 4] вирішується ряд технологічних проблем. При цьому важливе значення має створення температурного поля у випадку, коли температура на торці спрацьованого металевго колеса перевищує температуру Кюрі, яка необхідна для одночасного нагрівання спрацьованого металевго колеса по всій робочій поверхні з метою нарощування його методом заливки рідкого металу в тигель і схоплення його з робочою поверхнею колеса. Залежно від температури нагрівання колеса можна досягти якісного схоплення основного металу з рідким з метою його нарощування за рахунок дифузійних процесів. Щоб досягти потрібної температури, необхідно розробляти математичні моделі для проектування нових нагрівальних систем, які б забезпечили одночасне нагрівання по всій зношеній поверхні колеса.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автори в роботах [5, 6, 7, 8] розробили

математичні моделі для проектування нагрівальних систем індукційного наплавлення тонких плоских деталей (дисків) товщиною 2...6 мм при частоті  $f=440$  кГц. Для товщин залізних коліс близько 110 мм та вагою майже 500 кг необхідно розробляти нові математичні моделі для проектування нагрівальних систем, які б забезпечили одночасне нагрівання масивних коліс, із використанням розроблених методів заливки рідкого металу в тигель [1, 2] з метою відновлення цих коліс. Аналіз та вивчення цих процесів за допомогою математичних і фізичних моделей значно скоротить кількість експериментів, що є важливо в плані економії матеріальних і трудових затрат.

**Метою роботи** є розроблення математичної моделі для визначення джерел нагріву, коли температура на торці колеса перевищує температуру Кюрі, яка необхідна для одночасного нагрівання по всій робочій поверхні спрацьованого металевого колеса.

**Постановка завдання.** За допомогою розробленої математичної моделі провести дослідження впливу ряду факторів на величину температурного поля теплових джерел.

**Методи та результати досліджень.** При такому способі нагріву (багатовитковий індуктор охоплює колесо на еквідистантній відстані кругом поверхні кочення колеса) найвища температура в колесі буде на поверхні кочення колеса [9, 10, 11]. Коли ця температура  $T_4(x = x_{04})$  перевищує температуру Кюрі  $T_k (\approx 755^\circ C)$ , область колеса розбивається на дві зони  $[x_{04}, x_k]$ ,  $[x_k, x_{56}]$ . У першій зоні  $[x_{04}, x_k]$  температура перевищує температуру Кюрі  $T_k$  і тут потрібно прийняти магнітну проникність  $\mu_{41} = 1$ , а його питомий опір  $\rho_{4k} = 10^{-6}$  Ом · м.

У цьому випадку глибина проникнення електромагнітного поля в матеріал колеса буде [12, 13]

$$\Delta_{41} = \Delta_k = \frac{0,5}{f}, \quad (1)$$

де  $f$  – частота струму,

$\Delta_k$  – глибина проникнення струму.

У другій зоні  $[x_k, x_{56}]$  електрофізичні властивості матеріалу колеса суттєво не змінюються, а глибина проникнення електромагнітного поля в такий матеріал визначається за формулою

$$\Delta_{42} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_{42} \cdot \gamma_{42}}}, \quad (2)$$

де  $f$  – частота струму;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнітна постійна;

$\mu_{42} = 1$  – магнітна проникність матеріалу колеса;

$\gamma_{42} = \frac{1}{\rho_{42}} = 10^6 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$ , питома провідність;

$\rho_{42}$  – питомий опір, Ом · м.

Амплітудні значення напруженостей електричного  $\dot{E}_{m41}$  і магнітного  $\dot{H}_{m41}$  полів у колесі мають вигляд:

у зоні  $[x_{04}, x_k]$

$$-\frac{d\dot{H}_{m41}}{dx} = \delta_{m41} = \gamma_{41} \cdot \dot{E}_{m41}, \quad (3)$$

де  $\gamma_{41} = \frac{1}{\rho_{41}} = 10^6$  1/ Ом · м, питома провідність;

$$-\frac{d\dot{H}_{m42}}{dx} = \delta_{m42} = \gamma_{42} \cdot \dot{E}_{m42}, \quad (4)$$

де  $\mu_{41} = 1$ , магнітна проникність;

у зоні  $[x_{\kappa}, x_{56}]$

$$-\frac{d\dot{H}_{m42}}{dx} = \delta_{m42} = \gamma_{42} \cdot \dot{E}_{m42}, \quad (5)$$

$$\frac{d\dot{E}_{m42}}{dx} = -i \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_{42} \cdot \dot{H}_{m42}, \quad (6)$$

де  $H_m$  і  $E_m$ ,  $\dot{H}_m$  і  $\dot{E}_m$  – дійсні й комплексні амплітуди напруженостей магнітного та електричного полів відповідно;

$\omega$  – кругова частота;

$\delta_{m42}$  – густина струму провідності.

Оскільки функції стану  $\dot{E}_{m41}$ ,  $\dot{H}_{m41}$ ,  $\dot{E}_{m42}$ ,  $\dot{H}_{m42}$ , є швидко затухаючими, бо глибина з проникнення в метали (сталі) невелика, то замість  $x_{56}$  можна прийняти  $x_{56} \approx \infty$ , а чотири граничні умови й умови спряження між зонами мають такий вигляд:

$$\dot{H}_{m41} = \dot{H}_{m41e} = H_{m41e} \text{ при } x = x_{04}, \quad (7)$$

$$\dot{E}_{m41} = \dot{E}_{m42}, \quad \dot{H}_{m41} = \dot{H}_{m42} \text{ при } x = x_{\kappa}; \quad (8)$$

$$\dot{E}_{m42}(x \rightarrow \infty) = 0 \text{ або } \dot{H}_{m42}(x \rightarrow \infty) = 0. \quad (9)$$

Розв'язок системи рівнянь (3), (4) має вигляд:

у зоні  $[x_{04}, x_{\kappa}]$

$$\dot{H}_{m41} = A_{41} \cdot e^{-k_{41}(1+i)x} + B_{41} \cdot e^{k_{41}(1+i)x}; \quad (10)$$

$$\dot{E}_{m41} = \frac{k_{41}(1+i)}{\gamma_{41}} \left[ A_{41} \cdot e^{-k_{41}(1+i)x} - B_{41} \cdot e^{k_{41}(1+i)x} \right]. \quad (11)$$

У зоні колеса  $[x_{\kappa}, x_{56}]$ , де температура нижча від температури Кюрі, розв'язок системи рівнянь (5), (6) запишемо так:

$$\dot{H}_{m42} = A_{42} \cdot e^{-k_{42}(1+i)x} + B_{42} \cdot e^{k_{42}(1+i)x}, \quad (12)$$

$$\dot{E}_{m42} = \frac{k_{42}(1+i)}{\gamma_{42}} \left[ A_{42} \cdot e^{-k_{42}(1+i)x} - B_{42} \cdot e^{k_{42}(1+i)x} \right]. \quad (13)$$

де  $k_{41} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu\gamma}{2}}$  – величина, обернена до величини проникнення магнітного поля в розплавлений метал,

$$k_{41} = k_{42}.$$

У розв'язках (10)–(13) перші доданки відносяться до прямих хвиль, а другі – до відбитих хвиль. Тому, що повинні виконуватись умови (9), то це можливо тільки у випадку, коли прийняти  $B_{42} = 0$ . Тобто відбиті хвилі в зоні  $[x_\kappa, \infty]$  не повинні бути.

Скориставшись також умовами неперервності (8) для тангенціальних складових напруженостей електричного і магнітного полів при переході з зони де температура вища від температури Кюрі в зону з температурою, меншою від температури Кюрі, тобто при  $x = x_\kappa$ , отримаємо

$$\begin{aligned} A_{41} \cdot e^{-k_{41}(1+i)x_\kappa} + B_{41} \cdot e^{k_{41}(1+i)x_\kappa} &= A_{42} \cdot e^{-k_{42}(1+i)x_\kappa} \\ A_{41} \cdot e^{-k_{41}(1+i)x_\kappa} - B_{41} \cdot e^{k_{41}(1+i)x_\kappa} &= \frac{\gamma_{41} \cdot k_{42}}{\gamma_{42} \cdot k_{41}} e^{-k_{42}(1+i)x_\kappa}. \end{aligned} \quad (14)$$

У нашому випадку  $\mu_{41} = 1$ , а  $\gamma_{41} = \gamma_{42} = \gamma_\kappa$ . Розв'язавши два рівняння (14) відносно  $A_{41}$  і  $B_{41}$  і визначивши їх через  $A_{42}$ , отримаємо

$$\begin{aligned} A_{41} &= \frac{A_{42}}{2} \left( 1 + \sqrt{\mu_{42}} \right) \cdot e^{-(k_{42}-k_{41})(1+i)x_\kappa} \\ B_{41} &= \frac{A_{42}}{2} \left( 1 - \sqrt{\mu_{42}} \right) \cdot e^{-(k_{42}+k_{41})(1+i)x_\kappa}. \end{aligned} \quad (15)$$

Підставивши останні вирази для  $A_{41}$  і  $B_{41}$  з (15) у вираз для напруженості магнітного поля (10) та використавши граничну умову (7), для визначення коефіцієнта  $A_{42}$  знайдемо формулу

$$A_{42} = \frac{2H_{me4}}{\left( 1 + \sqrt{\mu_{42}} \right) e^{-c(x_{04})(1+i)} + \left( 1 - \sqrt{\mu_{42}} \right) e^{-d(x_{04})(1+i)}} \quad (16)$$

де  $c(x_{04}) = (k_{42} - k_{41})x_\kappa + k_{41} \cdot x_{04}$ ;

$$d(x_{04}) = (k_{42} + k_{41})x_\kappa - k_{41} \cdot x_{04}.$$

Підставивши вираз для  $A_{42}$  з (16) у формули для  $A_{41}$  і  $B_{41}$  (15), а останній – у формулу для знаходження напруженості електричного поля (11), отримаємо

$$\dot{E}_{m41} = \frac{k_{41}(1+i)\dot{H}_{me4}}{\gamma_{41}} \frac{\left( 1 + \sqrt{\mu_{42}} \right) e^{-(1+i)c(x)} - \left( 1 - \sqrt{\mu_{42}} \right) e^{-(1+i)d(x)}}{\left( 1 + \sqrt{\mu_{42}} \right) e^{-(1+i)c(x_{04})} + \left( 1 - \sqrt{\mu_{42}} \right) e^{-(1+i)d(x_{04})}}, \quad (17)$$

в якій введено позначення  $c(x) = (k_{42} - k_{41})x_{\kappa} + k_{41} \cdot x$ ;

$$d(x) = (k_{42} + k_{41})x_{\kappa} - k_{41} \cdot x.$$

Як бачимо з формули (17), напруженість електричного поля є комплексною величиною. Представимо напруженість електричного поля у вигляді суми активної і реактивної складових. Для цього скористаємося формулою, яка зв'язує показникову комплексну функцію з тригонометричним її представленням. Наприклад,

$$e^{-(1+i)c(x)} = e^{-c(x)} (\cos c(x) - i \sin c(x)).$$

Використавши таке представлення до виразу (17), отримаємо

$$\begin{aligned} \dot{E}_{m41} &= \frac{k_{41}(1+i)\dot{H}_{m41e}}{\gamma_{41}} \times \\ &\times \frac{(1+\sqrt{\mu_{42}})e^{-c(x)}(\cos c(x) - i \sin c(x)) - (1-\sqrt{\mu_{42}})e^{-d(x)}(\cos d(x) - i \sin d(x))}{(1+\sqrt{\mu_{42}})e^{-c(x)}(\cos c(x_{04}) - i \sin c(x_{04})) + (1-\sqrt{\mu_{42}})e^{-d(x)}(\cos d(x_{04}) - i \sin d(x_{04}))} \end{aligned}$$

Погрупувавши в другому множнику останнього виразу в чисельнику і знаменнику дійсну й уявну частини, перепишемо його так:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{m41} &= \frac{k_{41}(1+i)\dot{H}_{m41e}}{\gamma_{41}} \frac{(1+\sqrt{\mu_{42}})e^{-c(x)} \cos c(x) - (1-\sqrt{\mu_{42}})e^{-d(x)} \cos d(x) - \dots}{(1+\sqrt{\mu_{42}})e^{-c(x)} \cos c(x_{04}) + (1-\sqrt{\mu_{42}})e^{-d(x)} \cos d(x_{04}) - \dots} \\ &\frac{\dots - i \left[ (1+\sqrt{\mu_{42}})e^{-c(x)} \sin c(x) - (1-\sqrt{\mu_{42}})e^{-d(x)} \sin d(x) \right]}{\dots - i \left[ (1+\sqrt{\mu_{42}})e^{-c(x)} \sin c(x_{04}) + (1-\sqrt{\mu_{42}})e^{-d(x)} \sin d(x_{04}) \right]} \end{aligned}$$

Ввівши (для компактності запису) позначення

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

$$M_2 = (1 + \sqrt{\mu_{42}})e^{-c(x)} \sin c(x) - (1 - \sqrt{\mu_{42}})e^{-d(x)} \sin d(x); \quad (18)$$

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

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

де  $c(x) = (k_{42} - k_{41})x_{\kappa} + k_{41} \cdot x$ ;

$$d(x) = (k_{42} + k_{41})x_{\kappa} - k_{41} \cdot x;$$

$$c(x_{04}) = (k_{42} - k_{41})x_{\kappa} + k_{41} \cdot x_{04};$$

$$d(x_{04}) = (k_{42} + k_{41})x_{\kappa} - k_{41} \cdot x_{04},$$

отримаємо

$$\dot{E}_{m41} = \frac{k_{41} (1+i) \dot{H}_{me4}}{\gamma_{41}} \frac{M_1 - iM_2}{N_1 - iN_2}. \quad (19)$$

Перемноживши в другому множнику останнього виразу чисельник і знаменник на вираз, спряжений до знаменника, а також перемноживши комплексні числа, отримаємо

$$\dot{E}_{m41} = \frac{k_{41} \dot{H}_{me4}}{\gamma_{41}} \times \frac{[(M_1 N_1 + M_2 N_2) - (M_1 N_2 - M_2 N_1)] + i[(M_1 N_2 - M_2 N_1) + (M_1 N_1 + M_2 N_2)]}{N_1^2 + N_2^2} \quad (20)$$

За допомогою останнього представлення напруженості електричного поля легко визначити його активну й реактивну складові. Активна складова – це дійсна частина напруженості, а реактивна – це вираз при уявній величині  $i$ .

Напруженість електричного поля у вигляді (20) є індукованою в металевому колесі. Найважливішим є той факт, що ця напруженість викликає (індукує) джерело нагріву. Також дуже важливим є факт, що джерело нагріву зосереджується при поверхневій зоні, а поза цією зоною теплота поширюється через теплопровідність матеріалу. Тому в нашому випадку процес повинен бути швидкоплинним, щоб встигнути його виконати, не роз'єднавши колесо з віссю. Питома потужність теплових джерел визначається через напруженість електричного поля за допомогою формули

$$W_{41} = \frac{\gamma_{41}}{2} \dot{E}_{m41} \dot{E}_{m41}^*, \quad (21)$$

в якій  $\dot{E}_{m41}^*$  є комплексно спряжена величина до напруженості електричного поля, тобто з допомогою (20) знаходимо

$$\dot{E}_{m41}^* = \frac{k_{41} \dot{H}_{me4}}{\gamma_{41}} \times \frac{[(M_1 N_1 + M_2 N_2) - (M_1 N_2 - M_2 N_1)] + i[(M_1 N_2 - M_2 N_1) + (M_1 N_1 + M_2 N_2)]}{N_1^2 + N_2^2} \quad (22)$$

Підставляючи вирази (20) і (22) у формулу (21), визначимо питому потужність теплових джерел, які будуть нагрівати підготовлену поверхню кочення колеса.

Після виконання алгебраїчних дій формула для визначення питомої потужності теплових джерел для поверхневого нагріву набуде вигляду

$$W_{41} = \frac{1}{2} \frac{k_{41}^2}{\gamma_{41}} H_{me4}^2 \frac{M_1^2 + M_2^2}{N_1^2 + N_2^2}. \quad (23)$$

Нагадаємо, що величини  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $c(x)$ ,  $d(x)$ ,  $c(x_{04})$ ,  $d(x_{04})$  визначаються за формулами (18). Координата  $x_k$  буде знайдена з допомогою рівняння для знаходження температури в колесі, яке буде отримано нижче.

Ще раз нагадаємо, що питома потужність теплових джерел визначається в зоні, де температура вища від температури Кюрі, тобто при  $[x_{04} \leq x \leq x_k]$ . Визначимо питому

потужність теплових джерел у зоні  $[x_k, x_6]$  або  $[x_k, \infty]$ , де температура нижча від температури Кюрі. Для цього використаємо вираз для напруженості електричного поля (13), в якому прийнято  $B_{42} = 0$  (тому що  $\dot{E}_{m42}$  на нескінченності може бути нескінченно великим).

Тоді отримаємо

$$\dot{E}_{m42} = \frac{k_{42}(1+i)}{\gamma_{42}} A_{42} \cdot e^{-k_{42}(1+i)x} \quad (24)$$

Невідомий коефіцієнт  $A_{42}$  знайдемо з допомогою умови (7) та (12) (при  $B_{42} = 0$ ) з урахуванням (15), (16). Тоді вираз для напруженості електричного поля в цій зоні буде знайдений за допомогою (24) та (16) і матиме вигляд

$$\dot{E}_{m42} = \frac{k_{42}(1+i)}{\gamma_{42}} \frac{2 \cdot H_{me4} \cdot e^{-k_{42}(1+i)x}}{\left(1 + \sqrt{\mu_{42}}\right) \cdot e^{-(1+i)c(x_{04})} + \left(1 - \sqrt{\mu_{42}}\right) \cdot e^{-(1+i)d(x_{04})}} \quad (25)$$

Останній вираз запишемо у вигляді (при цьому використаємо метод тригонометричного представлення комплексних чисел, використаний вище)

$$\dot{E}_{m42} = \frac{k_{42}(1+i)H_{me4}}{\gamma_{m4}} \frac{M_{12} - iM_{22}}{N_1 - iN_2} \quad (26)$$

де  $M_{12} = 2e^{-k_{42}(x)} \cos k_{42}(x)$ ,  $M_{22} = 2e^{-k_{42}(x)} \sin k_{42}(x)$ ;

$N_1$  і  $N_2$  визначаються за допомогою формул (19).

Перетворимо формулу (26) аналогічно до того, як ми це зробили з (19). Тоді вона набуде вигляду

$$\dot{E}_{m42} = \frac{k_{41} \dot{H}_{me4}}{\gamma_{me4}} \times \frac{\left[ (N_1 M_{12} + N_2 M_{22}) - (N_2 M_{12} - N_1 M_{22}) \right] + i \left[ (N_1 M_{12} + N_2 M_{22}) + (N_2 M_{12} - N_1 M_{22}) \right]}{N_1^2 + N_2^2}$$

Отже, питома потужність теплових джерел у цій зоні визначиться за допомогою формули

$$W_{42} = \frac{1}{2} \dot{E}_{m42} \dot{E}_{m42}^* \quad (27)$$

і матиме такий вигляд:

$$W_{41} = \frac{1}{2} \frac{k_{42}^2}{\gamma_{42}} H_{me4}^2 \frac{M_{12}^2 + M_{22}^2}{N_1^2 + N_2^2} \quad (28)$$

Тоді питома потужність теплових джерел у всьому колесі може бути представлена у вигляді

$$W_{412} = W_{41} \cdot U_-(x_k - x) + W_{42} \cdot U_+(x - x_k), \quad (29)$$

де  $U_-(x_k - x)$  і  $U_+(x - x_k)$  – асиметричні одиничні функції, які визначаються за алгоритмами

$$U_-(x_k - x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x_k - x \geq 0 \text{ або } x \leq x_k ; \\ 0 & \text{при } x_k - x < 0 \text{ або } x > x_k \end{cases} \quad (30)$$

$$U_+(x - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{при } x - x_k \geq 0 \text{ або } x \geq x_k . \\ 0 & \text{при } x - x_k < 0 \text{ або } x < x_k \end{cases} .$$

Користуючись формулами (23) і (27) та представлення з допомогою одиничних функцій Хевісайда, за формулою (29) знайдемо питому потужність теплових джерел у всій області колеса  $W_{412}$ . При визначенні останньої через  $W_{41}$  і  $W_{42}$  потрібно врахувати допущення, 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 (29, 30), проведено обчислення питомої потужності теплових джерел  $W_{412}$  залежно від частоти струму, величини струму, кількості витків індуктора, а також продемонстровано можливість досягнення температури 1450 °С на торці колеса для різних параметрів індуктора та часу нагрівання.



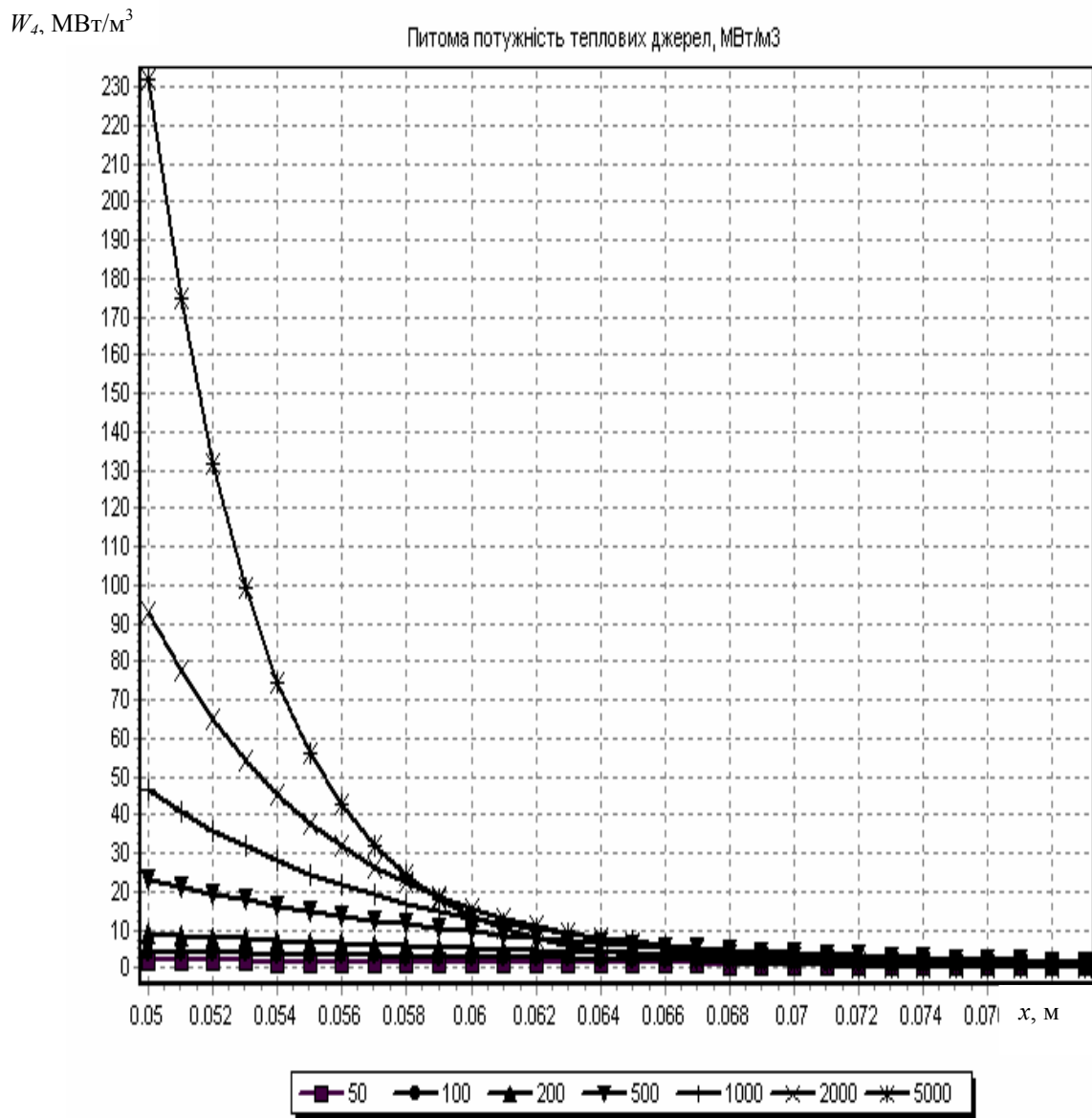


Рисунок 1. Залежність питомої потужності теплових джерел у колесі  $W_4$  від біжучої координати при тривалості нагрівання  $\tau = 600$  с і при різних значеннях частоти  $f$  при струмі  $I = 1000$  А, коли індуктор має  $N = 7$  витків

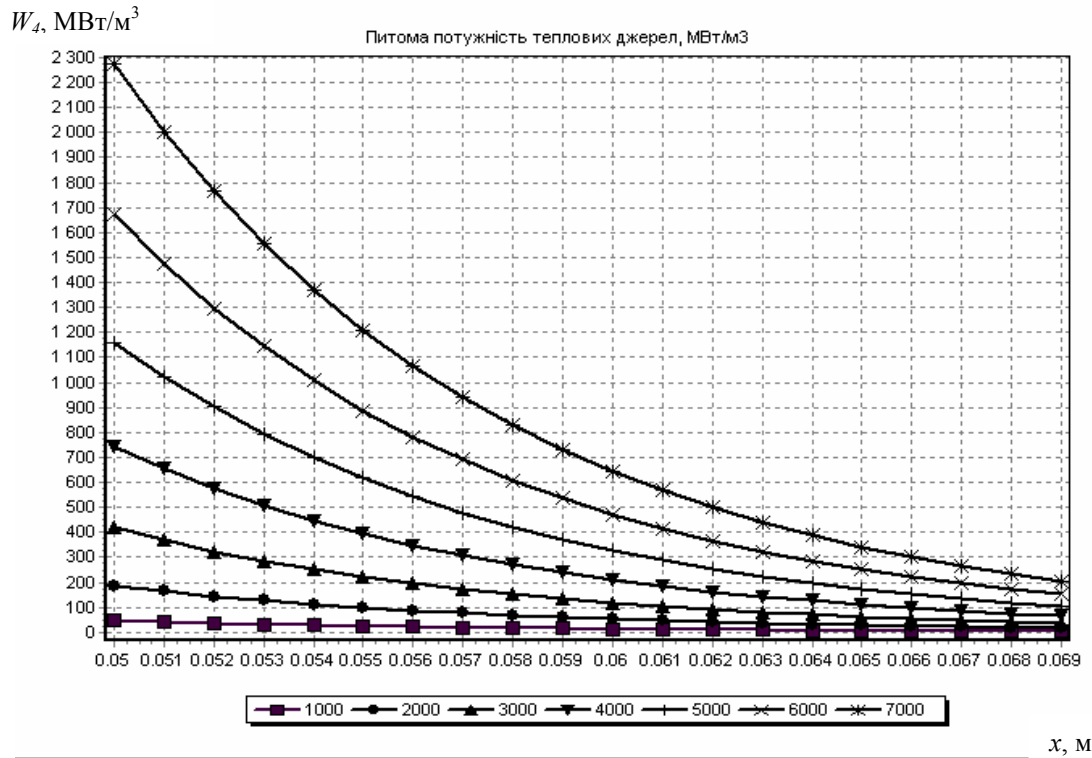


Рисунок 2. Залежність питомої потужності теплових джерел у колесі  $W_4$  від біжучої координати  $x$  при тривалості нагрівання  $\tau = 600$  с і при різних значеннях струму  $I$ , на частоті  $f = 1000$  Гц, коли індуктор має  $N = 7$  витків

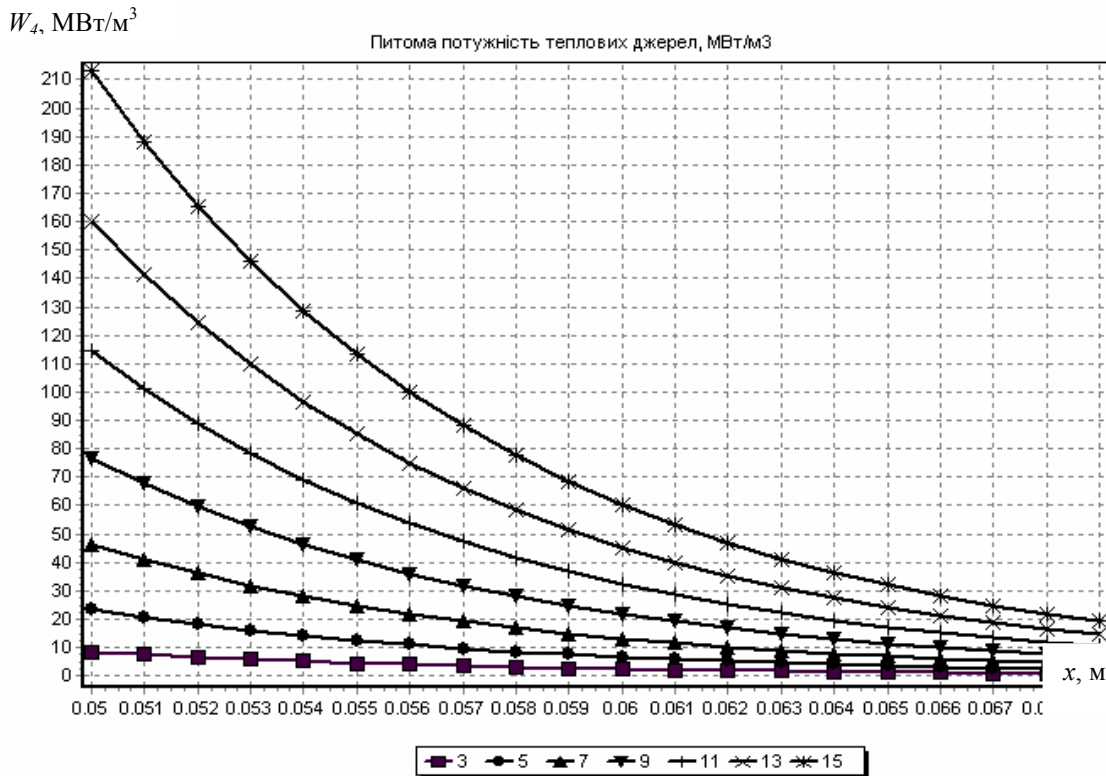


Рисунок 3. Залежність питомої потужності теплових джерел у колесі  $W_4$  від біжучої координати при тривалості нагрівання  $\tau = 600$  с і при різних значеннях кількості витків індуктора  $N$  на частоті  $f = 1000$  Гц, при струмі  $I = 1000$  А

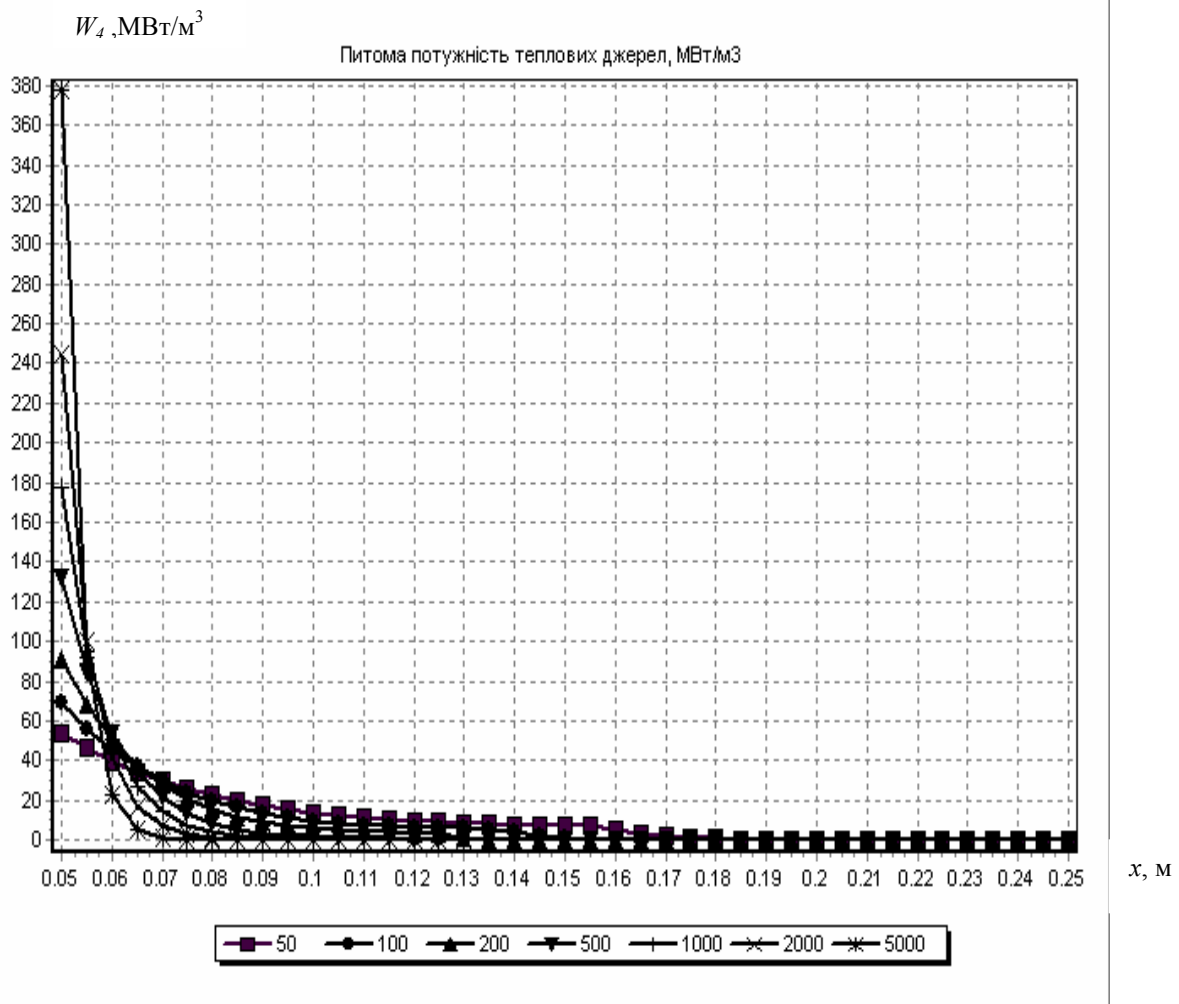


Рисунок 4. Залежність питомої потужності теплових джерел у колесі  $W_4$  від біжучої координати при тривалості нагрівання  $\tau = 600$  с при різних значеннях частоти  $f$  у процесі досягнення на ободі колеса температури  $T_4 = 1450$  °С, коли індуктор має  $N = 7$  витків

На рис. 1 зображені залежності величини змінної потужності теплових джерел, яка генерується в колесі, від частоти струму, глибини проникнення джерела в колесо. З графіків бачимо, що при зростанні частоти від 50 Гц до 5000 Гц питома потужність джерел нагріву на поверхні зростає більш як у 80 разів, а вже на глибині 0,002 м вона зменшується майже у 1,8 раза (230:130), а на глибині 0,015 м – майже затухає. Тобто маємо випадок поверхневого нагрівання.

Інтенсивно зростає також питома потужність джерел нагрівання зі зростанням сили струму в індукторі (рис. 2).

При збільшенні сили струму в 7 разів питома потужність теплового джерела зростає майже в 50 разів. Дуже важливо, що індуктор був сконструйований так, щоб на його висоті, яка дорівнює висоті обода колеса поміститься якнайбільше витків (при умові виконання умови недопустимості пробую) і зі зростанням числа витків індуктора також зростає величина питомої потужності теплових джерел. З рисунка 3 бачимо, що зі збільшенням числа витків у 5 разів питома потужність теплового джерела, індуктованого індуктором, у колесі зростає у понад 25 разів.

З рисунка 4 бачимо, що головна частина питомої потужності теплового джерела зосереджена на невеликій глибині і зростає зі зростанням частоти в процесі досягнення на ободі колеса 1450 °С. Цей нагрів також можна вважати поверхневим.

Це є важливо, бо температура може поширюватися до осі колеса тільки через теплопровідність.

**Висновок.** Розроблено математичну модель для визначення джерел нагріву, коли температура на торці колеса перевищує температуру Кюрі, яка необхідна для одночасного нагрівання спрацьованого металевго колеса по всій робочій поверхні з метою нарощування його методом заливки рідкого металу в тигель.

Встановлено, що при підвищенні струму в 7 разів питома потужність теплових джерел зростає в 50 разів, що призводить до зростання кількості витків індуктора для створення необхідного температурного поля на поверхні відновлення.

Встановлено, що головна частота питомої потужності теплового джерела зосереджена на незначній глибині в основному металі до 0,05 м і зростає зі зростанням частоти в процесі досягнення температури на ободі колеса 1450°С.

### Список використаної літератури

1. Шаблій, О.М. Спосіб відновлення спрацьованих сталевих деталей [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.М. Береженко // Патент на корисну модель №42596 – № u200901692; заявл. 26.02.09р; опубл. 10.07.09, Бюл. №13.
2. Спосіб відновлення спрацьованих сталевих деталей [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, І.І. Стойко, О.І. Король // Патент на корисну модель №45731 – №u 200905443; заявл. 29.05.09р. опубл. 25.11.09р; Бюл. №22.
3. Технологічні особливості відновлення спрацьованих залізничних коліс [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.І. Король, В.С. Сенчишин // Вісник ТНТУ – 2010. – №2. – С. 101–110.
4. Відновлення зношених поверхонь залізничних коліс [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.І. Король, В.С. Сенчишин // Матеріали VIII науково-технічної конференції “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасної технології”, присвяченої 50-річчю заснування ТНТУ та 165-річчю з дня народження Івана Пулюя. – Тернопіль, 2010. – С. 31–32.
5. Шаблій, О.Н. Оптимизация энергоэнергии при индукционной наплавке тонкостенных дисков [Текст] / О.Н. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.П. Будзан // Автомат. сварка. – 1987. – №1. – С. 36–39.
6. Шаблій, О.Н. Пути экономии электроэнергии при индукционной наплавке тонкостенных дисков [Текст] / О.Н. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.П. Будзан // Автомат. сварка. – 1988. – №12. – С. 56–58.
7. Індуктори для наплавлення тонких фасонних дисків при мінімальних енергозатратах [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.С. Письмений, М.В. Шарик // Вісник ТДТУ – 2003. – №2. – Т.8 – С. 48–53.
8. Шаблій, О.Н. Оптимизация индукционной наплавки тонких дисков с учетом теплового и электромагнитного экранирования [Текст] / О.Н. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.П. Будзан // Автомат. сварка.– 2003. – №9. – С. 22–25.
9. Використання індукційного нагрівання при розробленні нових технологічних процесів і приладів [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин, О.І. Король, М.С. Базар // Конференція «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» (16 травня 2011 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2011. – С. 91–92.
10. Питома потужність теплових джерел нагрівання зношеної поверхні залізничного колеса [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.І. Король, Б.М. Береженко // Тези XV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2011. – С.9.
11. Шаблій, О. Визначення питомої потужності теплових джерел в стінці технологічного індуктора [Текст] / О. Шаблій, М. Базар // Конференція „Інформаційні моделі, системи та технології”. – Тернопіль: ТНТУ, 2011. – С. 5.
12. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева [Текст] / А.Е. Слухоцкий. – Л.: Машиностроение, 1978. – 325 с.
13. Матвеев, А.Н. Электричество и магнетизм [Текст] / А.Н. Немков. – М.: Высшая школа, 1983. – 462 с.

Отримано 07.02.2012