

ПРИСТРОЇ ТА МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.14

Б.М. ГОРКУНОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків

О.Л. БАГМЕТ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ", Харків

І.Б. ГОРКУНОВА, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ НАГРІВУ ЦИЛІНДРИЧНОГО НЕМАГНІТНОГО ЗРАЗКА

The investigation of the heating process of cylindrical products made from copper, aluminum and stainless steel 1Н18Н10Т. Contactless heating is carried out at a low frequency electromagnetic field probe, which is characterized by the value of the generalized electromagnetic setting $x \leq 1,5$. For this value of x obtained by the conversion function of the electromagnetic transformer converter.

Проведено дослідження процесу нагріву циліндричних изделий, изготовлених из меди, алюминия и нержавеющей стали 1Х18Н10Т. Бесконтактный контроль нагрива осуществляется на низкой частоте зондирующего электромагнитного поля, которая характеризуется значением обобщенного электромагнитного параметра $x \leq 1,5$. Для этого значения x получена функция преобразования электромагнитного трансформаторного преобразователя.

Проведено дослідження процесу нагріву циліндричних зразків, виготовлених із міді, алюмінію та нержавіючої сталі 1Х18Н10Т. Безконтактний контроль нагріву здійснюється на низькій частоті зондуючого електромагнітного поля, що характеризується значенням узагальненого електромагнітного параметру $x \leq 1,5$. Для цього значення x отримано функцію перетворення електромагнітного трансформаторного перетворювача.

Вступ. При термічній обробці металевих виробів (наприклад, з метою відпалу та нормалізації структури) постає задача контролю прогріву виробу. Цю задачу можна вирішити за допомогою використання вихорострумового трансформаторного перетворювача позитивною рисою якого є можливість безконтактного контролю температури зразку не тільки на поверхні, а і в середині перетину зразка. Складність використання вихорострумових методів полягає у відсутності аналітичної функції перетворення, яка пов'язує температуру виробу з вихідним сигналом перетворювача. Необхідність проведення складних розрахунків з метою отримання градуальної залежності перетворювача можна уникнути, якщо використати наближені аналітичні вирази

для універсальних функцій перетворювання $K = f(x)$ та $\varphi = f(x)$, що пов'язують параметри зразка з вихідним сигналом перетворювача.

Мета роботи – дослідження процесу контролю нагріву немагнітних циліндричних зразків з метою проведення термообробки та визначення часу прогріву зразків з алюмінію, нержавіючої сталі та міді по всьому перетину виробу до заданої температури нагріву.

Основна частина. Глибина проникнення магнітного поля у циліндричний зразок визначається за допомогою узагальненого електромагнітного параметра x , фізична сутність якого полягає в тому, що він характеризує відношення радіусу циліндричного зразка до глибини проникнення зонduючого електромагнітного поля у цей зразок. Вираз для узагальненого електромагнітного параметру запишеться як [1]:

$$x = a \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \omega}{\rho}}, \quad (1)$$

де a – радіус циліндричного виробу; μ_0 – магнітна постійна, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – магнітна проникність матеріалу виробу; ρ – питомий електричний опір матеріалу виробу; ω – кутова частота зонduючого магнітного поля.

Для немагнітного виробу при $\mu_r = 1$:

$$x = a \sqrt{\frac{\mu_0 2\pi f}{\rho}} = a \sqrt{\frac{8\pi^2 f 10^{-7}}{\rho}}, \quad (2)$$

де f – частота зміни магнітного поля.

Як видно з співвідношення (2) параметр x залежить від частоти магнітного поля f .

На низьких частотах електромагнітного поля при $x \leq 1,5$, здійснюється практично повне промагнічування зразка (глибина проникнення магнітного поля дорівнює радіусу зразка), тобто ми можемо у цьому випадку контролювати температуру по усьому перетину виробу.

Наближений аналітичний вираз для знаходження фазового кута вихідного сигналу перетворювача, в області низьких частот магнітного поля ($x \leq 1,5$) [1, 2] має вигляд:

$$\operatorname{tg}\varphi \approx \frac{1}{8} x^2. \quad (3)$$

При малих кутах $\varphi \leq 10$ град ($\varphi \leq 0,174$ рад), підставивши (2) в (3) з урахуванням $\operatorname{tg}\varphi \approx \varphi$ отримаємо:

$$\varphi = \frac{a^2 \pi^2 f 10^{-7}}{\rho}. \quad (4)$$

Умовою реалізації фазового електромагнітного методу контролю температури прогріву виробу є сталість узагальненого параметру x . Спочатку знайдемо частоту електромагнітного поля f_1 при вибраному значенні $x_1 = 1,2$ для температури виробу $t_1 = 20$ °С:

$$f_1 = \frac{x_1^2 \rho_1}{8\pi^2 a^2 10^{-7}}. \quad (5)$$

Значення частоти f_1 розраховано для циліндричних зразків з алюмінію, міді та сталі 1Х18Н10Т в діапазоні зміни радіусу від 0,0025м з заданою дискретністю у сторону зростання. В таблиці 1 наведено діапазон зміни робочої частоти зондуючого поля перетворювача для температури контрольованих виробів $t_1 = 20$ °С.

Таблиця 1 – Розрахунок початкової робочої частоти вихідного сигналу перетворювача

a , м	$f_{\text{алюм}}$, Гц	$f_{\text{мід}}$, Гц	$f_{\text{ст}}$, Гц
0,0025	759,46	502,41	21264,96
0,0075	84,38	55,82	2362,77
0,01	47,46	31,40	1329,06
0,015	21,09	13,95	590,69
0,02	11,86	-	332,26
0,03	-	-	147,67
0,1	-	-	13,29

Верхня межа значення радіусу виробу обумовлюється тим, що робоча частота зондуючого поля перетворювача не повинна бути менше 10Гц. Тобто для сталі можна вимірювати температуру зразків з $0,0025 \leq a \leq 0,1\text{м}$, для алюмінію $0,0025 \leq a \leq 0,02\text{м}$, для міді $0,0025 \leq a \leq 0,015\text{м}$.

Вираз для визначення фазового кута сумарної ЕРС перетворювача з виробом, що відповідає поточній температурі контрольованого виробу отримаємо, підставивши значення f_1 з (5) у формулу (4):

$$\varphi = \frac{a^2 \pi^2 x_1^2 \rho_1 10^{-7}}{8\pi^2 \rho a^2 10^{-7}} = \frac{x_1^2 \rho_1}{8\rho}. \quad (6)$$

де ρ_1 – питомий електричний опір матеріалу виробу для $t_1 = 20$ °С.

Таким чином величину ρ виробу для поточного контрольованого значення температури визначимо з виразу:

$$\rho = \frac{x_1^2 \rho_1}{8\varphi}. \quad (7)$$

Для проведення досліджень в роботі використовувались зразки виготовлені з алюмінію, міді та сталі з параметрами: $\alpha_{ст} = 0,834 \cdot 10^{-3} \text{ I/K}$, $\rho_{ст} = 74,0 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_{алюм} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ I/K}$, $\rho_{алюм} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\alpha_{мідь} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ I/K}$, $\rho_{мідь} = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Як відомо з [4] вираз, який поєднує значення температури металевого виробу з величиною питомого електричного опору ρ , має вигляд:

$$t = \left(\frac{\rho}{\rho_1} - 1 \right) \frac{(1 + \alpha t_1)}{\alpha} + t_1. \quad (8)$$

Підставивши значення ρ з виразу (7) у формулу (8) маємо:

$$t = \left(\frac{x_1^2}{8} \cdot \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \frac{(1 + \alpha t_1)}{\alpha} + t_1. \quad (9)$$

Задамося значенням узагальненого параметра $x_1 = 1,2$, що відповідає повному проникненню магнітного поля в контрольований виріб. При цьому для алюмінію, міді та сталі відповідно для $a = 0,01 \text{ м}$ з формули (9) отримаємо вирази, що поєднують температуру виробу від фазового кута вихідного сигналу перетворювача. Робоча частота току намагнічування електромагнітного перетворювача становила відповідно при використанні зразка з алюмінію $f_{алюм} = 47,5 \text{ Гц}$, з міді $f_{мід} = 31,4 \text{ Гц}$, зі сталі $f_{ст} = 1329,1 \text{ Гц}$. Таким чином:

$$t_{алюм} = \left(\frac{1,2^2}{8} \cdot \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \frac{(1 + 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 20)}{4,1 \cdot 10^{-3}} + 20 = \frac{47,5}{\varphi} - 243,9;$$

$$t_{мід} = \left(\frac{1,2^2}{8} \cdot \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \frac{(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 20)}{4,3 \cdot 10^{-3}} + 20 = \frac{41,87}{\varphi} - 212,6;$$

$$t_{ст} = \left(\frac{1,2^2}{8} \cdot \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \frac{(1 + 0,834 \cdot 10^{-3} \cdot 20)}{0,834 \cdot 10^{-3}} + 20 = \frac{219,42}{\varphi} - 1199.$$

Для визначення чутливості електромагнітного перетворювача бажано знати функції перетворення, тобто залежність фазового кута φ вихідного сигналу перетворювача від температури t виробів, виготовлених відповідно з алюмінію, міді та сталі:

$$\varphi_{алюм} = \frac{47,5}{t + 243,9}; \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{мід}} = \frac{41,87}{t + 212,6}; \quad (11)$$

$$\varphi_{\text{ст}} = \frac{219,42}{t + 1199,0}. \quad (12)$$

Використовуючи вирази (10) – (12) отримаємо градувальні характеристики перетворювача для контролю температури виробів з алюмінію, міді та нержавіючої сталі. Дані розрахунку для діапазону зміни температури нагріву виробу від 20°C до 200°C зведено у табл. 2. Можливо розширення діапазону зміни контрольованої температури виробів до 400°C.

Таблиця 2 – Значення фазового кута φ вихідного сигналу перетворювача від температури виробів з алюмінію, сталі та міді

$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{\text{алюм}}, \text{град}$	$\varphi_{\text{ст}}, \text{град}$	$\varphi_{\text{мід}}, \text{град}$
20	0,180	0,180	0,180
40	0,167	0,177	0,166
60	0,156	0,174	0,154
80	0,147	0,172	0,143
100	0,138	0,169	0,134
120	0,131	0,166	0,126
140	0,124	0,164	0,119
160	0,118	0,161	0,112
180	0,112	0,159	0,107
200	0,107	0,157	0,101

Для оцінки похибки безконтактного вимірювання температури нагріву виробу за допомогою вихрострумового перетворювача візьмемо похідну виразу (9):

$$\delta t = t'_\varphi \delta \varphi = \frac{\partial t}{\partial \varphi} \delta \varphi. \quad (13)$$

У результаті, після виділення відносного диференціалу та деякого спрощення, отримаємо:

$$\frac{\delta t}{t} = - \frac{x_1^2}{8} \frac{(1 + \alpha t_1)}{\alpha} \frac{1}{\varphi t} \frac{\delta \varphi}{\varphi}. \quad (14)$$

Позначимо відносну похибку вимірювання температури $\delta t/t$ через

γ_t , а відносну похибку вимірювання фазового кута $\delta\varphi/\varphi = \gamma_\varphi = 0,3\%$ - похибка вимірювання фази за допомогою фазометра Ф2-34.

Для температури $t = t_1 = 20^\circ\text{C}$, тобто у робочій точці перетворювача при $x=1,2$, розрахуємо за формулою (14) похибки вимірювання температури при використанні зразків відповідно з алюмінію, міді та сталі:

$$\gamma_{t_{\text{алюм}}} = -\frac{1,2^2}{8} \cdot \frac{(1 + 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 20)}{4,1 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{-0,17532158 \cdot 20} \cdot 0,3 = 4,06\% ;$$

$$\gamma_{t_{\text{мід}}} = -\frac{1,2^2}{8} \cdot \frac{(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 20)}{4,3 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{-0,17532158 \cdot 20} \cdot 0,3 = 3,89\% ;$$

$$\gamma_{t_{\text{ст}}} = -\frac{1,2^2}{8} \cdot \frac{(1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 20)}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{-0,17532158 \cdot 20} \cdot 0,3 = 4,16\% .$$

Для визначення швидкості прогріву металевих виробів запишемо повне нестационарне рівняння теплового балансу для будь-якого тіла, що нагрівається [4]:

$$P_n - G_{\text{ТПс}}(t - t_a) - G_{\text{ТПи}}(t - t_{\text{ср}}) - \xi S(t - t_{\text{ср}}) - C_{\text{п}} S \left[\left(\frac{t}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right] = mc \frac{dt}{d\tau} , \quad (15)$$

де P_n – корисна частина потужності; $G_{\text{ТПт}}$ – теплова провідність тіла, що нагрівається; t – температура тіла; t_a – температура атмосфери, з якою стикаються торці тіла; $t_{\text{ср}}$ – температура середовища, що оточує тіло; $G_{\text{ТПс}}$ – теплова провідність середовища навколо тіла; ξ – коефіцієнт, зв'язаний з передачею тепла через конвекцію; S – площа поверхні тіла; $C_{\text{п}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання; $t_{\text{ст}}$ – температура стінок каркаса, який оточує тіло, що нагрівається; m – маса тіла, яке нагрівається; c – питома теплоємність матеріалу тіла дроту; τ – поточний час нагрівання тіла.

Оскільки коефіцієнт теплопровідності матеріалу металевого циліндричного зразка досить великий, то в нестационарному рівнянні теплового балансу (15) буде переважати третій доданок у лівій його частині. Величину $G_{\text{ТПс}}$ можна визначити з закону теплопровідності, отриманого Фур'є [4]. При цьому $G_{\text{ТПи}} = \lambda_{\text{и}} a$, де $\lambda_{\text{и}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу виробу.

Після всіх цих міркувань запишемо рівняння нестационарного теплового балансу стосовно приросту температури:

$$\frac{m c}{G_{\text{ТПи}}} \cdot \frac{d\Delta t_{\text{и}}}{dt} + \Delta t_{\text{и}} = \Delta t_{\text{ср}}, \quad (16)$$

де $\Delta t_{\text{и}}$ – приріст температури виробу; $\Delta t_{\text{ср}}$ – приріст температури повітряного шару і поверхні виробу.

Позначимо в (16) коефіцієнт $T_{\text{и}}$, що характеризує теплову постійну часу виробу, як

$$T_{\text{и}} = \frac{m_{\text{и}} c_{\text{и}}}{G_{\text{ТПи}}}. \quad (17)$$

З урахуванням (17) рішення рівняння (16) запишемо у вигляді:

$$\Delta t_{\text{и}} = \Delta t_{\text{ср}} (1 - e^{-\frac{\tau}{T_{\text{и}}}}). \quad (18)$$

Знайдемо вираз для визначення проміжку часу прогрівання τ металевого циліндричного виробу до заданої температури:

$$\tau = T_{\text{и}} \ln \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{\Delta t_{\text{ср}} - \Delta t_{\text{и}}}. \quad (19)$$

Для проведення розрахунків з визначення залежності температури нагріву виробу від часу знаходження виробу в печі, розігрітої до фіксованої температури (200⁰С, або 400⁰С), задамося початковими параметрами металевих циліндричних виробів та їх константами, які зведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Дані для розрахунку часу нагріву виробів ($t_1=20^0\text{C}$; $\mu_r=1$)

Матеріал зразка	сталь	алюміній	мідь
Діаметр зразка, d , м	0,005; 0,01; 0,02		
Довжина зразка, l , м	0,02; 0,05; 0,1		
Щільність матеріалу зразка, ρ , кг/м ³	7,8	2,7	8,93
Теплоємність матеріалу зразка, c , Дж/(кг·К)	502	896	388
Теплопровідність матеріалу, λ , Вт/(м·К)	16	209	390

Залежності часу для повного прогрівання металевих виробів, виготовлених із сталі та алюмінію представлено на рис. 1-4.

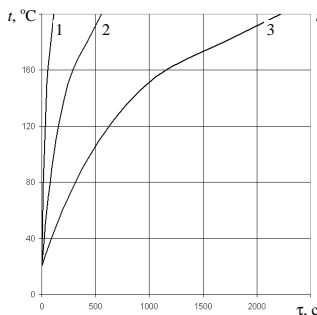


Рис. 1. Залежність t зразка зі сталі від часу нагріву (t печі 200°C):

- 1 – зразок $d=0,005$ м, $l=0,02$ м;
- 2 - $d=0,01$ м, $l=0,05$ м;
- 3 - $d=0,02$ м, $l=0,1$ м.

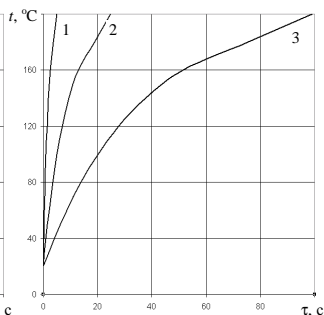


Рис. 2. Залежність t зразка з алюмінію від часу нагріву (t печі 200°C):

- 1 – зразок $d=0,005$ м, $l=0,02$ м;
- 2 - $d=0,01$ м, $l=0,05$ м;
- 3 - $d=0,02$ м, $l=0,1$ м.

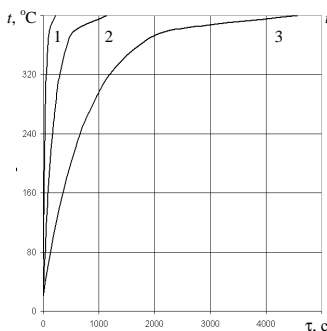


Рис. 3. Залежність t зразка зі сталі від часу нагріву (t печі 400°C):

- 1 – зразок $d=0,005$ м, $l=0,02$ м;
- 2 - $d=0,01$ м, $l=0,05$ м;
- 3 - $d=0,02$ м, $l=0,1$ м.

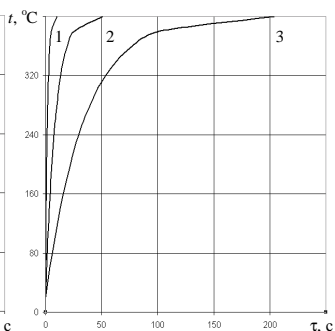


Рис. 4. Залежність t зразка з алюмінію від часу нагріву (t печі 400°C):

- 1 – зразок $d=0,005$ м, $l=0,02$ м;
- 2 - $d=0,01$ м, $l=0,05$ м;
- 3 - $d=0,02$ м, $l=0,1$ м.

Висновки. Використовуючи результати даної роботи можна зробити висновок, що якщо задані енергетичні витрати на технологічний процес нагріву зразків до заданої температури, то можна визначити час, що затрачено на прогрів. У випадку, якщо нагрів деталей необхідно проводити за визначений час, то можливо обрати відповідну темпе-

ратуру печі, хоча це пов'язане з завищеними енергетичними затратами. Таким чином можна оптимізувати процеси відпалу цементації та нормалізації структури матеріалів за часовими та енергетичними витратами.

Список літератури: 1. *Багмет О.Л.* К теории электромагнитного преобразователя температуры // Сб. науч. трудов ХГПУ: Информационные технологии: Наука, техника, технология, образование, здоровье. – 1999. – Ч. 3. – Вып. 7. – С. 86-88. 2. *Багмет О.Л., Заика С.И.* Оценка погрешностей измерения двух параметров изделия с помощью ТЭМП, работающего в режиме низких частот. // Вестник НТУ "ХПИ" – 2004. – № 5. – С. 125-130. 3. *Багмет О.Л., Львов С.Г.* Бесконтактное измерение радиуса цилиндрического изделия переменнo-частотным электромагнитным методом // Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 4. 4. Электрические измерения неэлектрических величин / Под. ред. *П.В. Новицкого*. – Л.: Энергия. 1975. – 576 с.

*Надійшла до редколегії 23.04.2012.
Рецензент д.т.н., проф. Щапов П.Ф*