

# МОДЕЛЮВАННЯ КОНФІГУРАЦІЇ ВИТОКУ РОЗПЛАВУ МІДІ У ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ІНДУКЦІЙНИХ КАНАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ПІСЛЯ ЇХ БАГАТОРІЧНОГО ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ

Щерба А.А., д.т.н., професор, Щерба М.А., д.т.н., доцент, Кіш Р.С., студент,  
Сібіряков Г.М., студент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки*

**Вступ.** Основним технологічним обладнанням для лиття мідного дроту особливої чистоти для потреб електроенергетики (в тому числі жил силових кабелів) є індукційні каналні печі. Сьогодні головними науково-технічними завданнями є підвищення їх надійності, енергоефективності та ресурсу [1]. Для досягнення цих цілей важливим є розуміння закономірностей взаємопов'язаних електрофізичних [2], теплових [3], гідродинамічних [4] і механічних [5] процесів, які виникають у елементах печей, і, зокрема, тривимірного розподілу електромагнітних [6] і теплових полів [7], густини індукованих струмів у розплаві [8], електромагнітних сил і магнітогідродинамічного переміщення [9]. Важливим є оцінка зміни елементів печі після багаторічної промислової експлуатації, оскільки такі зміни безпосередньо впливають на її ефективність і залишковий ресурс [10]. Найбільш проблемною складовою є теплоізоляція, яка неминуче руйнується від проникнення в її об'єм розплавленого металу.

У роботі [11] було запропоновано новий метод діагностики зносу теплоізоляції каналних печей, який на відміну від попередніх дозволяє визначити конкретне місце і глибину протікання розплаву. Ідея полягала в вимірюванні розподілу температури на поверхні печі та, використовуючи математичне моделювання, співставленні її з конфігурацією протікання розплаву. Але насправді така задача вирішується неоднозначно, тобто кілька різних варіантів руйнації термоізоляції можуть викликати однакову величину максимальної температури на поверхні печі. Тому зазначена методика потребувала вдосконалення.

**Метою даної роботи** було визначення особливостей електромагнітних і теплових процесів у індукційних каналних печах та встановлення зв'язків між розміром і формою витоку розплаву та розподілом температури на поверхні печі.

**Фізико-математична модель** промислової індукційної каналної печі типу URCAST (як однієї з найбільш часто використовуваних на практиці) показана на рис. 1. Піч складається з індуктора 1, розташованого внизу і в якому знаходиться канал розплавленого металу і ванни 2, розташованої зверху, з основною масою розплаву.

Вирішувалась крайова задача для системи рівнянь Максвелла та рівняння теплового балансу з граничними умовами для розрахункової області, як це показано на рис. 1. Електромагнітна частина задачі розраховувалась відносно векторного потенціалу згідно рівняння, як і у роботі [12]:

$$\operatorname{rot}\left[\frac{1}{\mu_0\mu_{\text{eff}}}\operatorname{rot}\dot{A}\right]+j\omega\sigma(T)\dot{A}=0, \quad (1)$$

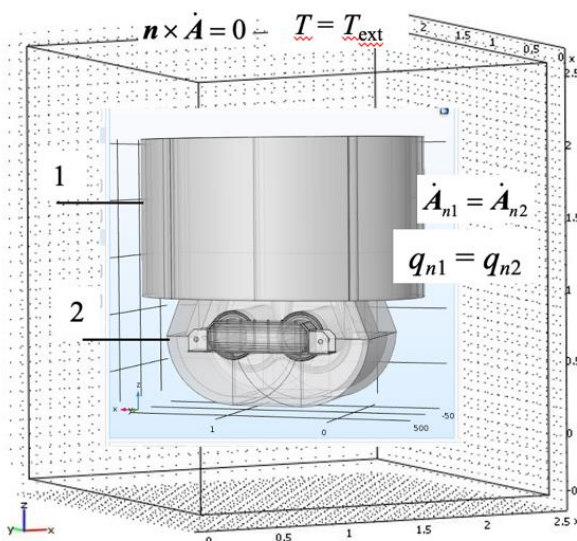


Рисунок 1 – Модель індукційної каналної печі типу UPCAST

джерело тепла від нагріву розплаву вихровими струмами,  $Q_{water}$  – споживач тепла, яким є проточна вода в системі охолодження індуктора. Відведення тепла від футеровки печі описувалось коефіцієнтом тепловіддачі. Рівняння (2) на границях поділу різних середовищ доповнювалось умовою рівності нормальних складових теплового потоку, а на границях розрахункової області – заданою температурою зовнішнього середовища. Математичне моделювання виконано методом скінченних елементів у програмному середовищі Comsol Multiphysics.

**Матеріали і результати досліджень.** Для ванни печі, в якій знаходиться основна маса розплаву міді, розраховано розподіл температури в об'ємі її

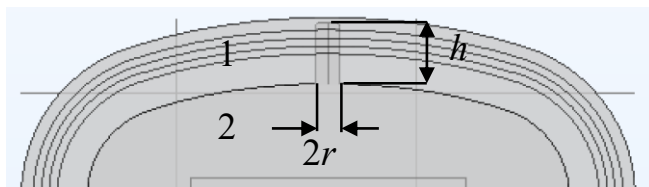


Рисунок 2 – Вид зверху на половину ванни печі з розплавленою міддю

теплоізоляції залежно від конфігурації внутрішнього витoku рідкого металу в дефекти. Виток моделювався циліндричної форми ( $h$  – висота та  $r$  – радіус основи) з закругленням на кінці, як показано на рис. 2 для виду печі зверху (1 – багатошарова теплоізоляція, 2 – розплав міді з витком).

Шляхом математичного моделювання була визначена максимальна температура  $T_{max}$  на поверхні печі для різних співвідношень розмірних параметрів  $h$  і  $r$ . Моделювалось проникнення розплаву на глибину  $h$  від 225 мм до 270 мм при загальній товщині термоізоляції 275 мм. Дані розрахунків наведено на рис. 3, де криві відповідають різним радіусам  $r$  перерізу витoku.

Як видно з розрахунків, однакова температура на корпусі печі може бути досягнута при різних конфігураціях витoku розплаву. Тому було поставлено завдання знайти додатковий критерій для аналізу стану термоізоляції, щоб можна було більш точно визначити дефекти за розподілом температури. Як додатковий критерій до значення максимальної температури пропонується

де  $\mu_{eff}$  – ефективне значення магнітної проникності осердя,  $\sigma(T)$  – питома електропровідність міді, яка є функцією температури  $T$ . Рівняння (1) доповнюється умовою рівності нормальних складових векторного потенціалу на границях поділу різних середовищ, а на границях розрахункової області – умовою відсутності магнітного поля.

Теплова частина задачі розраховувалась відносно температури  $T$  згідно рівняння, як і у роботі [12]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(-k \text{grad} T) = Q_{eddy} + Q_{water}, \quad (2)$$

де  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$  – густина, теплоємність і теплопровідність матеріалів,  $Q_{eddy}$  –

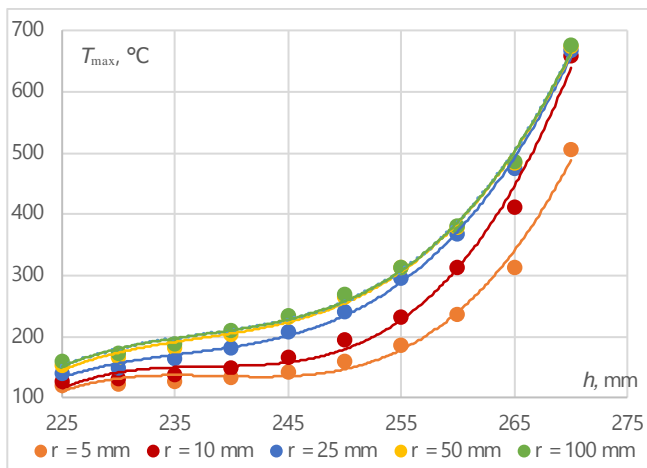


Рисунок 3 – Залежності максимальної температури на поверхні печі від глибини проникнення розплаву

співвідношення розмірних параметрів виток розплаву у термоізоляцію. Така задача має безліч рішень, з них в таблиці 1 показано п'ять можливих варіантів конфігурацій.

Таблиця 1 – Температура в контрольних точках поверхні корпусу печі

	$r = 5 \text{ мм}$	$r = 10 \text{ мм}$	$r = 25 \text{ мм}$	$r = 50 \text{ мм}$	$r = 100 \text{ мм}$
$h, \text{ мм}$	264	259,5	255,5	254	253,5
$T_{x1} = T_{\max}, \text{ °C}$	298,6	301,2	300,9	301,4	298,5
$T_{x2}, \text{ °C}$	124,1	132,5	165,5	267,2	302,1
$T_{x3}, \text{ °C}$	112,1	114,0	119,2	134,3	284,2

$T_{x1}$  – максимальна температура на корпусі печі в контрольній точці 1,  $T_{x2}$  і  $T_{x3}$  – температура в контрольних точках 2 і 3, розташованих на відстанях 50 мм і 100 мм від точки спостереження максимальної температури. Як видно з таблиці, при рівності максимальної температури – в інших точках вимірювання відрізняються на десятки градусів і чітко корелюють з розміром поперечного перерізу витку розплаву. Таким чином, додаткові контрольні точки забезпечують більш точну ідентифікацію конфігурації дефектів термоізоляції і можуть бути використані як додатковий критерій для точнішого визначення конфігурації витку розплаву.

**Висновки.** Досліджено особливості взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів у промислових індукційних каналних печах з урахуванням виток рідкого металу в їх теплоізоляцію після багаторічної експлуатації. Отримано тривимірний розподіл електромагнітного та температурного полів в об'ємі та на поверхні елементів печі в залежності від степені та конфігурації руйнування її теплоізоляції. Встановлено залежність між розміром і формою виток розплаву та розподілом температури в об'ємі теплоізоляції печі.

Удосконалено методику визначення конфігурації пошкодження теплоізоляції печі, яка, на відміну від попередніх, передбачає контроль не тільки максимального значення температури поверхні в контрольних точках, а й додатково градієнта температури у вигляді додаткових контрольних точок.

використовувати значення зміни температури з відстанню (тобто градієнт температури). Але оскільки на практиці виміряти значення температурного градієнта досить складно, пропонується також визначати температуру в декількох додаткових контрольних точках, розташованих поруч.

Для демонстрації такого підходу для заданого значення максимальної температури  $T_{\max} = 300 \text{ °C}$  (вважається межею безпечної експлуатації індукційних печей типу UPCAST) підібрано відповідне

Оскільки однаковій максимальній температурі на поверхні корпусу печі може відповідати декілька різних варіантів витoku розплаву в ізоляцію, то додаткове визначення температурного градієнта дозволяє точніше спрогнозувати варіант конфігурації, який реально спостерігається. Таке вдосконалення дозволить точніше діагностувати стан теплоізоляції та завчасно попередити появу аварійних режимів роботи печі через витік розплавленого металу.

#### Перелік посилань

1. O. Lucía, P. Maussion, E. J. Dede, J.M. Burdío Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 61.5, 2014, pp. 2509-2520.
2. Yang, Bin, et al. Exploration of the relationship between the electromagnetic field and the hydrodynamic phenomenon in a channel type induction heating tundish using a validated model. *ISIJ International* 62.4 (2022): 677-688.
3. N.T. Mohite, R.G. Benni, A.A. Desai and A.V. Patil Optimization of Wall Thickness for Minimum Heat Losses for Induction Furnace. *Int. Journ. of Engineering Research and Technology*, vol. 10, 2017, pp. 453-461.
4. P. Buliński, J. Smolka, S. Golak, R. Przyłucki, M. Palacz, G. Siwiec and L. Blacha. Numerical modelling of multiphase flow and heat transfer within an induction skull melting furnace. *Intern. Journ. of Heat and Mass Transfer*, vol. 126, 2018, pp. 980-992.
5. S. Jin, H. Harmuth and D. Gruber Thermal and thermomechanical evaluations of channel induction furnace applying strong insulation containing lightweight aggregates,” *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 45(6), 2018, 51.
6. H. Ding, X. Xu, S. Wang and H. Huang Numerical simulation and experimental verification of electromagnetic field of continuous casting copper crucible. *Procedia Manufacturing*, vol. 37, 2019, pp. 520-528.
7. Xing, F., Zheng, S., Liu, Z., & Zhu, M. (2019). Flow field, temperature field, and inclusion removal in a new induction heating tundish with bent channels. *Metals*, 9(5), 561.
8. B. Yang, H. Lei, Q. Bi, J. Jiang, H. Zhang, Y. Zhao and J.A. Zhou Electromagnetic conditions in a tundish with channel type induction heating. *Steel Research International*, vol. 89(10), 2018, 1800145.
9. Q. Yue, X. Pei, C. Zhang and X. Wang Magnetohydrodynamic calculation on double-loop channel induction tundish. *Archives of metallurgy and materials*, vol. 63, 2018, pp. 329-336.
10. N. Tran, T. Hang and U. Lütke Numerical Simulation of Induction Channel Furnace to Investigate Efficiency for low Frequencies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 355, no. 1, May 2018, 012012.
11. A. Shcherba, V. Zolotarev, M. Shcherba and R. Belyanin Improving Wear Assessment Method of Inductor Thermal Insulation of Channel Furnaces for Ultra-Pure Copper Melting. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 335-338, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160129.
12. V.M. Zolotaryov, M.A. Shcherba and R.V. Belyanin Three-dimensional modeling of electromagnetic and thermal processes of induction melting of copper template with accounting of installation elements design. *Technical Electrodynamics*, vol. 3, 2017, pp. 13-21.