

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНИХ КАНАЛЬНИХ ПЕЧАХ ПРИ НАЯВНОСТІ ДЕФЕКТІВ В ЇХ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ

Щербань М.А., д.т.н., доц., Перетятко Ю.В., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Гончаров Є.С., студент, Казимір К.С., студентка

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії

Вступ. Індукційний нагрів використовується для отримання мідної катанки для силових кабелів (в тому числі на високі і надвисокі напруги), оскільки дозволяє забезпечити необхідну чистоту матеріалу (від 99,9% до 99,99% Cu) і відсутність в ньому кисню [1]. На сьогоднішній день гостро стоїть питання про подовження ресурсу дорогого індукційного обладнання, в тому числі індукційних каналних печей типу UPCAST (в світі встановлено більше 200 таких печей) і підвищення точності контролю їх роботи [2]. Прогнозований ресурс таких індукційних печей 3–4 роки, а застосовуваний метод контролю їх стану є інтегральним і непрямим [3]. Він не дозволяє виявити розташування і глибину проникнення рідкого металу в термоізоляційні матеріали (футеровку) печей, хоча це вважається основною причиною планових і аварійних зупинок індукційного обладнання.

У роботах [3, 4] запропоновано використовувати математичні моделі з розподілу температури на поверхні корпусу індукційних печей визначати глибину проникнення металу в об'єм їх термоізоляції. Такий підхід використовується і в даній роботі. На даний момент не встановлена кількісна залежність між глибиною проникнення розплаву в футеровку і температурою на корпусі печі, хоча ця інформація є одним з основних критеріїв для оцінки поточного стану та залишкового ресурсу індукційних каналних печей.

Тому, **метою роботи** є аналіз електротеплових процесів в індукційних каналних печах при наявності дефектів в їх термоізоляції та встановлення кількісної залежності між глибиною проникнення розплаву в футеровку і температурою на корпусі печі.

Матеріали и результати досліджень. Як приклад індукційної установки в роботі розглядалася промислова канална піч типу UPCAST з одним індуктором і можливістю одночасного лиття до десяти струмків мідної катанки [2].

Завдання індукційного нагріву металу складається з взаємозв'язаних електромагнітної і теплової задач [5, 6]. Оскільки постійні часу електромагнітних і теплових процесів, відрізняються на 6 порядків ($2 \cdot 10^{-2}$ с – період електромагнітних коливань на частоті 50 Гц і 10^4 с – тривалість часового нагріву), то, як і в роботах [3, 4, 7, 8], електромагнітна частина задачі вирішувалася в частотній області (в лінійному наближенні з використанням заздалегідь розрахованих діючих значень відносної магнітної проникності μ_{eff} , отриманих з кривої намагнічування), а тепла частина – в часовій області.

Для розрахунку розподілів магнітного поля та вихрових струмів розв'язувалися система рівнянь Максвелла у сукупності з матеріальними

рівняннями відносно векторного потенціалу A . Розрахункове рівняння виводилося як у роботах [3, 4, 8] і має вигляд:

$$\operatorname{rot} \left[f(|\operatorname{rot} A|) \frac{\operatorname{rot} A}{|\operatorname{rot} A|} \right] + \sigma(T) \frac{\partial A}{\partial t} - J_{ext} = 0, \quad (1)$$

де J_{ext} – густина струму у котушках індуктора, $\sigma(T)$ – питома електропровідність міді, яка є функцією температури T відповідно до виразу:

$$\sigma(T) = [\rho_0(1 + \alpha(T - T_{ref}))]^{-1}, \quad (2)$$

де $\rho_0 = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – питомий електричний опір, $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-8}$ К⁻¹ – температурний коефіцієнт опору, $T_{ref} = 273,15$ К – еталонна температура.

Індуктор підключений до трансформатора синусоїдальної напруги частотою 50 Гц, потужність якого регулюється в автоматичному режимі в залежності від даних датчика температури розплаву. Перемикання можливі між 14 ступенями потужності від 33 до 616 кВт, а робочий діапазон становить, як правило, 80–400 кВт.

Розрахункова область була тривимірною і складалася з об'єму індуктора і печі з мідним розплавом, контакт яких з навколишнім повітрям описувався за допомогою граничних умов на їх корпусах. Система рівнянь (1)–(2) зшивалося на границях розділу елементів і доповнювалося умовою Діріхле ($n \cdot A = 0$) на границях розрахункової області.

Для розрахунку розподілу теплового поля в футеровці печі і індуктора, як і в роботах [3, 4, 8], розв'язувалося рівняння теплового балансу:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_{eddy} + Q_{water}, \quad (3)$$

де ρ , C_p , k – густина, теплоємність і теплопровідність матеріалів, Q_{eddy} , Q_{water} – джерела тепла, що включають нагрів металу вихровими струмами Q_{eddy} і охолодження котушок і футеровки при протіканні води через трубки системи охолодження Q_{water} .

Відведення тепла через воду розраховувався відповідно до рівняння:

$$Q_{water} = M_t \cdot C_p (T_{in} - T) / V, \quad (4)$$

де M_t – витрата води в кілограмах, що проходить через поперечний переріз трубок системи охолодження в одиницю часу, T_{in} – температура води, що поступає, V – внутрішній об'єм трубок.

Нагрівання міді вихровими струмами реалізує мультифізичний зв'язок між електромагнітною і тепловою частинами задачі і задавався у вигляді:

$$Q_{eddy} = \dot{E} \cdot J^* = \omega^2 \sigma(T) \dot{A} \cdot A^*. \quad (5)$$

Система рівнянь (3)–(5) доповнювалася умовами конвективного відведення тепла від корпусу індуктора і печі за допомогою заданого коефіцієнта тепловіддачі h відповідно до рівняння:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{ext}), \quad (6)$$

де T_{ext} – температура навколишнього повітря, n – вектор нормалі до зовнішньої границі.

Система диференціальних рівнянь (1)–(6) розв'язувалася методом скінчених елементів [9] в програмному пакеті Comsol Multiphysics [10].

Матеріали і результати досліджень. *Результати фізичного експерименту.* У 2018 році проведено вимірювання розподілу температури T на поверхні корпусу промислової індукційної печі об'ємом 10 т на ПАТ «Завод «Південкабель» м. Харків. Корпус печі був розділений на 72 контрольні зони, 36 – у зоні завантаження мідних катодів для плавки і 36 – у зоні витягування катанки, в яких оптичним пірометром вимірювалася температура T .

Результати вимірювань наведені в табл. 1 і графічно відображені на рис. 1, де площина рисунка відповідає поверхні корпусу печі в розгортці.

Таблиця 2 – Результати вимірювань температури на корпусі індукційної печі

	Зона завантаження катодів, $T, ^\circ\text{C}$										Зона витягування катанки, $T, ^\circ\text{C}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	95	78	77	96	95	95	98	65	95	1	105	105	110	110	102	105	130	110	115
2	105	90	105	105	105	105	70	69	64	2	106	118	130	226	150	151	160	163	125
3	105	91	135	152	124	120	79	80	68	3	120	148	242	215	180	190	199	201	141
4	95	96	91	108	90	88	83	82	79	4	140	200	254	170	202	170	182	154	108

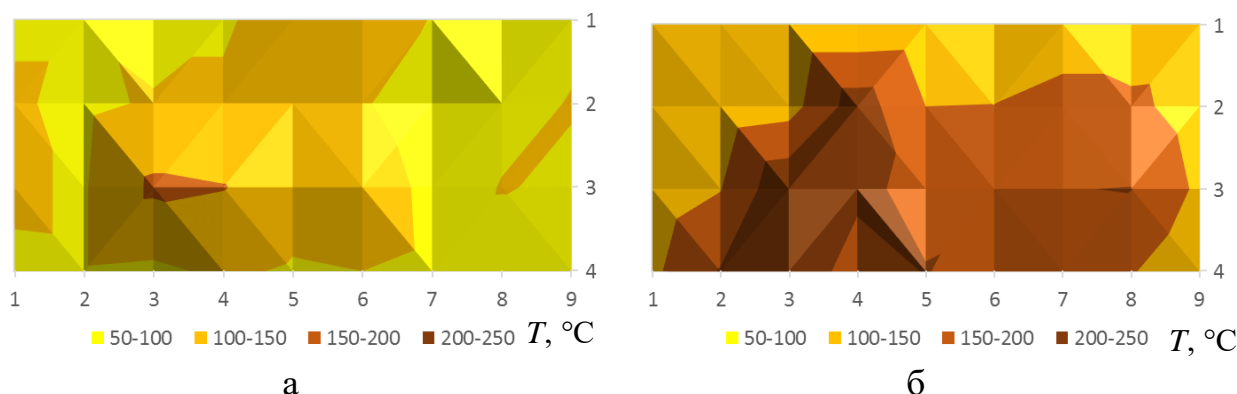


Рисунок 1 – Розподіл температури на корпус індукційної печі:
а – у зоні завантажування катодів для плавки, б – у зоні витягування катанки.

Порівнюючи значення на рис. 1, а і б відзначимо, що в зоні витягування катанки спостерігаються більш високі рівні температур, причому це проявляється як в мінімальних, так і в максимальних значеннях. Якщо в зоні завантажування катодів $T_{\min} = 64^\circ\text{C}$ і $T_{\max} = 152^\circ\text{C}$, то в зоні витягування катанки ці значення дорівнюють $T_{\min} = 102^\circ\text{C}$ і $T_{\max} = 254^\circ\text{C}$. Це можна пояснити більшою інтенсивністю перемішування металу в цій області.

Виявлено, що в процесі тривалої експлуатації печі (термін експлуатації досліджуваної печі складає більше 6 років) середня температура на її корпусі істотно зростає. Для печі з новою футеровкою температура T на її корпусі спостерігається в межах $70\text{--}100^\circ\text{C}$, а при робочих режимах нормальною вважається $T < 132^\circ\text{C}$. Для досліджуваної печі спостерігаються 7 областей з $T > 200^\circ\text{C}$ (зони № 2.4, 3.3, 3.4, 3.8, 4.2, 4.3 і 4.5), з яких три є найбільш гарячими, а в зоні № 4.3 навіть досягається $T_{\max} = 254^\circ\text{C}$.

Фізичним поясненням появи зон підвищеної температури на поверхні установки є протікання розплаву металу через термофутеровку до корпусу печі. Футеровка формується чотирма шарами цегли, де перші два шари виконують функції "броні", яка утримує розплав від протікань, а третій і четвертий шари виконують функції термоізоляції, забезпечуючи основне зменшення температури на $\approx 900^{\circ}\text{C}$ [2]. Однак у разі проникнення розплаву через "броню", внаслідок пористої структури третього і четвертого шарів цегли, метал активно абсорбується і незворотний процес деградації футеровки з часом тільки посилюється. В результаті можуть навіть утворитися краплі рідкої міді, що витікають через технологічні отвори корпусу печі. Якщо ж на корпусі в будь-якому місці виникає температура $300\text{--}350^{\circ}\text{C}$, то така піч вважається непридатною для експлуатації та вимагає відключення і заміни [2].

Результати чисельного експерименту. Для визначення конфігурації внутрішніх дефектів футеровки печі за виміряним поверхневим розподілом температури проводився чисельний експеримент. Для трьох найбільш гарячих областей на поверхні корпусу печі (зони № 4.3, 2.4 і 3.8) об'ємні протікання розплаву моделювалися трьома еліпсоїдами обертання з півосями a , b і c .

Основною характеристикою, що впливає на максимальне значення величини T , є глибина проникнення розплаву в футеровку x . Вона вибиралась такою, щоб температура в досліджуваних зонах відповідала експериментально виміряним значенням: 254 , 226 і 201°C .

На рис. 2, а показано розподіл температури T в об'ємі футеровки печі (вид зверху), а на рис. 2, б – розподіл температури на поверхні корпусу (вид з боку витягування катанки). Спостерігаються три протікання розплаву, що створюють на поверхні корпусу області температурою $T > 200^{\circ}\text{C}$. Температура показана тонуванням відповідно до шкали на рис.2 праворуч.

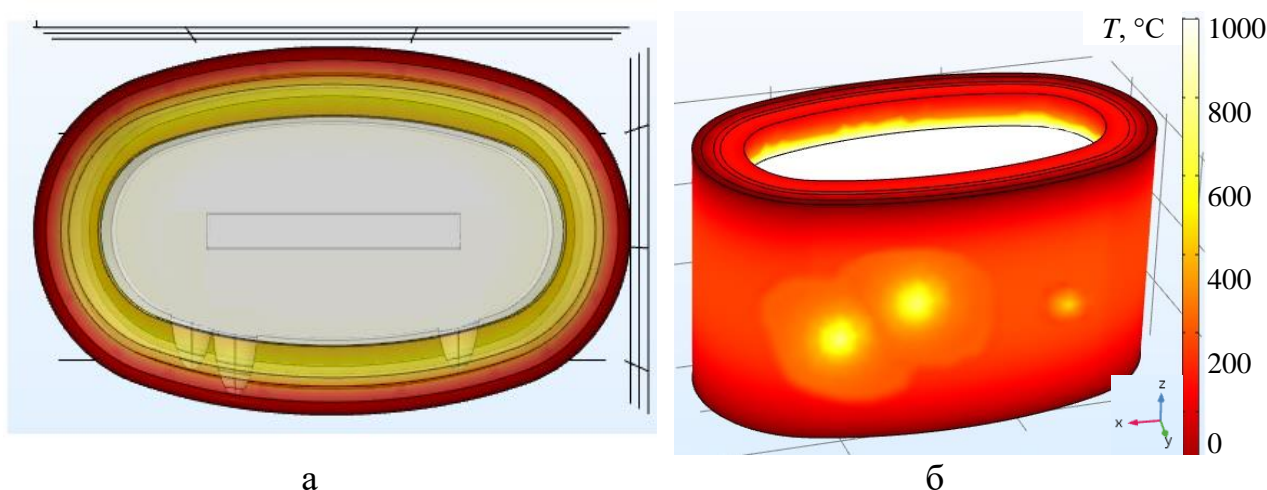


Рисунок 2 – Розподіл температури в елементах індукційної печі:
а – в об'ємі футеровки (вид зверху), б – на поверхні корпусу (вид з боку витягування катанки).

Розглянемо зміну температури T (рис. 3, а) і її градієнта Γ_T (рис. 3, б) в об'ємі нової футеровки печі (криві 1) та при наявності протікання розплаву в

старій футеровці з дефектами (криві 2). Графіки побудовані уздовж лінії нормалі n до бічної поверхні корпусу печі, що одночасно проходить через центральну вісь найбільшого з трьох протікань розплаву ($T_{\max} = 254^{\circ}\text{C}$).

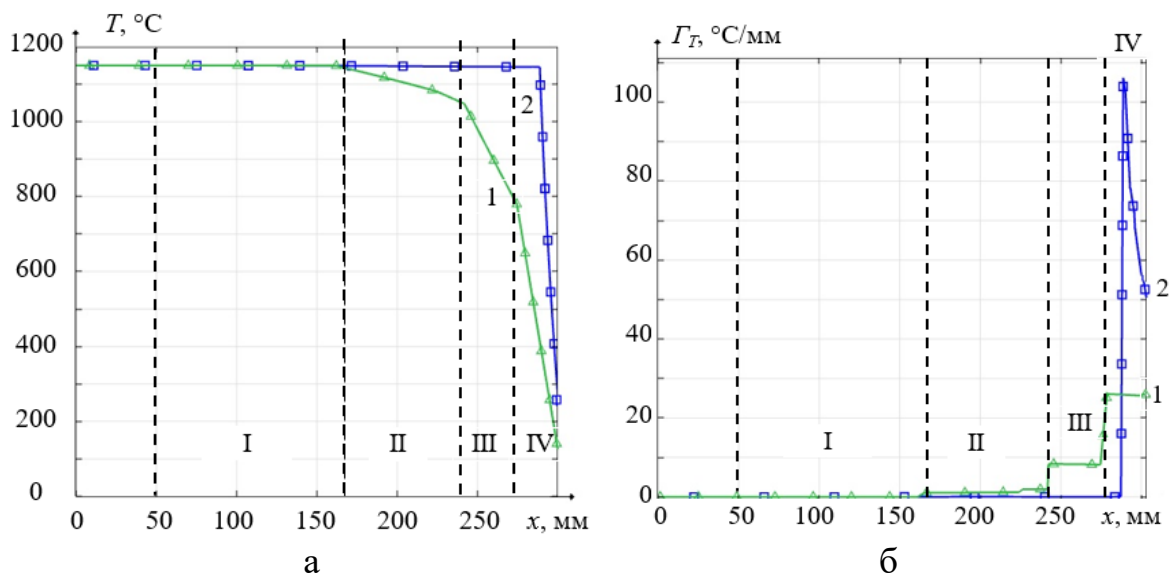


Рисунок 3 – Порівняння графіків зміни: а – температури T , і б – градієнта температури Γ_T в новій і старій термоізоляціях індукційної установки.

При відсутності протікань розплаву основне падіння температури на 900°C відбувається на III-му і IV-му шарах цегли сумарною товщиною 115 мм (рис. 3, а) при цьому в них спостерігаються градієнти температури $\Gamma_{T\text{III}} = 9^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ і $\Gamma_{T\text{IV}} = 26^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, що відповідають нормальному режиму роботи печі.

При виникненні протікань розплаву і при максимальній температурі на корпусі печі $T_{\max} = 254^{\circ}\text{C}$ довжина найбільшого з трьох протікань дорівнює 250 мм при сумарній товщині чотирьох шарів цегли 275 мм. В такій ситуації основне падіння температури відбувається лише на частині IV-го шару термоізоляції товщиною 25 мм, що призводить до зростання в ньому максимального градієнта температури $\Gamma_{T\max}$ в 4 рази до значення $\Gamma_{T\max\text{IV}} = 105^{\circ}\text{C}/\text{mm}$. Такі високі градієнти температури мають вкрай негативний вплив на матеріал футеровки та істотно зменшують її ресурс.

Використання розробленої математичної моделі і встановленої кількісної залежності між глибиною проникнення розплаву у термоізоляцію і температурою на корпусі індукційної печі дозволяє проводити більш точний контроль стану футеровки точніше прогнозувати ресурс установки. Також аналізуючи ступінь протікання розплаву можна розробляти рекомендації для оптимізації технологічних режимів виробництва спрямованих на уповільнення деградаційних процесів в термоізоляції.

Висновки. Проведено аналіз електротеплових процесів в індукційних каналних печах при наявності дефектів в їх термоізоляції та встановлено кількісну залежність між глибиною проникнення розплаву в футеровку і температурою на корпусі печі.

Проведені вимірювання температури в 72 контрольних зонах на поверхні корпусу промислової індукційної печі лінії лиття мідної катанки UPCAST. Виявлено, що в процесі її безперервної експлуатації виникло 7 областей з температурою $T > 200^{\circ}\text{C}$ (замість 130°C , рекомендованих для номінального режиму роботи), а в одній зоні температура досягла $T_{\max} = 254^{\circ}\text{C}$. За допомогою математичного моделювання показано, що при цьому довжина протікання розплаву в об'єм термоізоляції дорівнює 250 мм при сумарній її товщині у 275 мм. При цьому у футеровці в 4 рази зріс максимальний градієнт температури $\Gamma_{T_{\max}}$ (від $26^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ до $105^{\circ}\text{C}/\text{мм}$).

Використання розробленої математичної моделі і встановленої кількісної залежності між глибиною проникнення розплаву у термоізоляцію і температурою на корпусі індукційної печі дозволяє проводити більш точний контроль стану футеровки точніше прогнозувати ресурс установки. Також аналізуючи ступінь протікання розплаву можна розробляти рекомендації для оптимізації технологічних режимів виробництва спрямованих на уповільнення деградаційних процесів в термоізоляції.

Перелік посилань

1. Lucía O., Maussion P., Dede E.J. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61.5. Pp. 2509-2520.
2. UPCAST, UPCAST OY, Pori, Finland, 2019. <http://www.upcast.com> (дата зверення 15.11.2019).
3. Золотарёв В.М., Щерба М.А., Золотарёв В.В., Белянин Р.В. Трёхмерное моделирование электромагнитных и тепловых процессов индукционной плавки медного шаблона с учетом конструкции элементов установки. Техническая электродинамика. 2017. № 3. С. 13–21.
4. Shcherba M.A. Numerical simulation of electromagnetic and thermal fields in induction channel furnaces with defects of lining. Tech. Electrodynamics. 2018. Vol. 4. Pp. 33–36.
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАНУ, 2015. 305 с.
6. Yoav H., Kochavi E., Levy A. Inductive heating with a stepped diameter crucible. Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 102. Pp. 149–157.
7. Gleim T., Bettina S., Detlef K. Nonlinear thermo-electromagnetic analysis of inductive heating processes. Archive of Applied Mechanics. 2015. Vol. 85.8. Pp. 1055–1073.
8. Щерба А.А., Подольев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков. Техническая электродинамика. 2013. № 2. С. 10–18.
9. Peppas D.W., Heinrich J.C. The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications with MATLAB, MAPLE, and COMSOL. CRC Press. 2017. P. 610.
10. Comsol Multiphysics, Comsol Inc., Burlington, MA, USA, 2019. <https://www.comsol.com> (дата зверення 15.11.2019).