

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ЗНОСУ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ ІНДУКЦІЙНИХ КАНАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЛАВКИ МІДІ

Щерба М.А., д.т.н., професор, Перетятко Ю.В., к.т.н., доцент,
Федорченко І.І., студент, Сібіряков Г.М., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Індукційні каналні печі є основним технологічним обладнанням для лиття мідного дроту підвищеної чистоти для виробництва жил силових кабелів, у тому числі кабелів надвисокої напруги [1]. Сьогодні основними науково-технологічними задачами є підвищення енергоефективності [2-4], надійності [5, 6] та ресурсу таких печей [7, 8]. Дана робота спрямована на аналіз електротеплових процесів в індукційних каналних печах та удосконалення методу оцінки зносу їх теплоізоляції, оскільки наявні на сьогоднішній день методи мають ряд недоліків. Оскільки термоізоляція є монолітною і немає можливості зазирнути в середину, то наявні методи є опосередкованими, оперують інтегральними узагальненими характеристиками і не дають змогу визначити місце розташування та глибину руйнування з подальшим проникненням рідкого металу [9]. Однак ця інформація важлива для запобігання аварійним зупинкам печі та при підготовці планової заміни термоізоляції. Ідея полягає в тому, щоб забезпечити додатковий неруйнівний контроль глибини проникнення розплаву в об'єм термоізоляції шляхом встановлення кореляції між ним та зміною температури на поверхні корпусу печі. Це можна реалізувати шляхом поєднання можливостей математичного моделювання з вимірюваннями температури, які можна проводити в режимі реального часу.

Метою роботи є аналіз електротеплових процесів в індукційних каналних печах для плавки міді та удосконалення методу діагностики ступеня зношеності їх термоізоляції шляхом встановлення зв'язків між зміною температури на поверхні корпусу та глибиною проникнення розплаву. Для досягнення мети порівнювались результати фізичного експерименту по вимірюванню змін у температурі корпусу печі з часом експлуатації та математичного моделювання для визначення взаємозв'язку між поверхневою температурою та глибиною проникнення розплаву у теплоізоляцію.

Фізико-математична модель. Математичне моделювання проводилось методом скінченних елементів, реалізованим у програмному середовищі Comsol. Побудовано тривимірну модель індукційної каналної печі в розрахунковій області з відповідними граничними умовами. Магнітне поле в феромагнітному осерді індуктора печі і густину вихрових струмів в каналі розплаву металу розраховуються за відомими струмами в котушках індуктора. Далі відбувається теплообмін між каналом розплаву та основною масою металу у печі та теплоізоляцією і іншими елементами печі.

Для розрахунку розподілу магнітного поля і вихрових струмів розв'язувалась система рівнянь Максвелла в поєднанні з матеріальними рівняннями відносно векторного потенціалу A . Оскільки період коливань електромагнітного поля (0,02 с при частоті живлення 50 Гц) і теплових процесів

(нагрівання протягом годин, іноді десятків годин) відрізняються на шість порядків, то розрахункове рівняння лінеаризується шляхом розрахунку ефективного значення магнітної проникності осердя μ_{eff} в межах періоду коливань за кривою намагнічування. Таким чином векторний потенціал, шукається в частотній області використовуючи метод комплексних амплітуд [10]:

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

де $\sigma(T)$ — питома електропровідність міді, яка є функцією температури T .

Розподіл температури по елементах печі внаслідок нагріву плавильного каналу та механізмів теплообміну розраховували шляхом розв'язування рівняння теплового балансу відносно температури T [10]:

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

де $k \cdot \text{grad} T$ — тепловий потік в елементах печі за рахунок теплопровідності, ρ , C_p , k — густина, теплоємність і теплопровідність матеріалів, Q_{eddy} — джерело тепла від нагріву розплаву вихровими струмами, Q_{water} — споживач тепла, яким є проточна вода в трубах системи охолодження котушок індуктора.

Теплообмін в елементах термоізоляції печі відбувається за рахунок теплопровідності C_p . Відведення тепла від корпусу печі є конвективним і описується коефіцієнтом тепловіддачі h :

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\text{ext}}), \quad (3)$$

де T_{ext} — температура навколишнього середовища, n — вектор нормалі до поверхні.

Рівняння (1) та (2) на границях розрахункової області було доповнено умовами відсутності магнітного поля $n \times \dot{A} = 0$ і сталості температури зовнішнього середовища $T = T_{\text{ext}}$, а на границях поділу різних середовищ всередині області — умовою рівності нормальних складових векторного потенціалу $\dot{A}_{n1} = \dot{A}_{n2}$ та нормальних складових теплового потоку $q_{n1} = q_{n2}$.

Математичне моделювання виконано методом скінченних елементів, реалізованим у програмному середовищі Comsol Multiphysics.

Матеріали та результати досліджень. *Вимірювання змін максимальної температури на корпусі індуктора.* Результати фізичного експерименту по вимірюванню зміни максимальної температури T_{max} на корпусі індуктора з часом його експлуатації наведено на рис. 1. Розкид точок на графіку спостерігається через те, що вимірювання проводились на промисловій установці, продуктивність якої змінюється (змінюється кількість струменів металу, які ллються у дріт, а також товщина дроту), а отже і потужність роботи та інтенсивність підведення тепла через перемішування розплаву. Однак

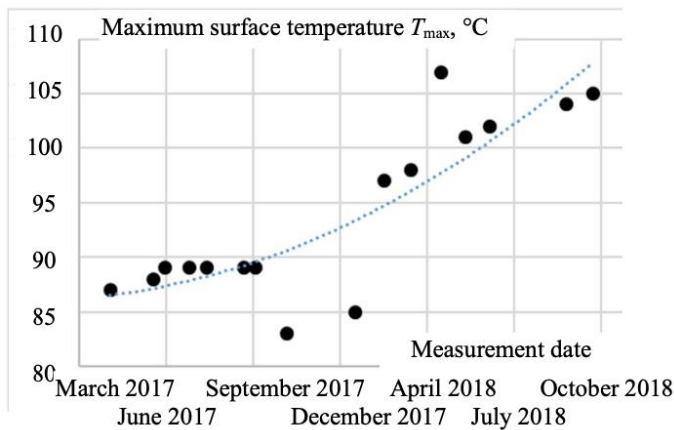


Рисунок 1 – Зростання максимальної температури T_{max} на корпусі індуктора печі з часом його експлуатації

від глибини проникнення розплаву в теплоізоляцію. Витік металу моделювався у вигляді еліпсоїда обертання, витягнутого в напрямку бічних стінок індуктора. На рис. 2 представлена залежність величини T_{max} від параметра залишкової товщини термоізоляції δ ($\delta = d - l$, де d – загальна товщина термоізоляції, l – глибина проникнення розплаву). Отримана залежність показує нелінійне зростання температури в залежності від залишкової товщини термоізоляції δ .

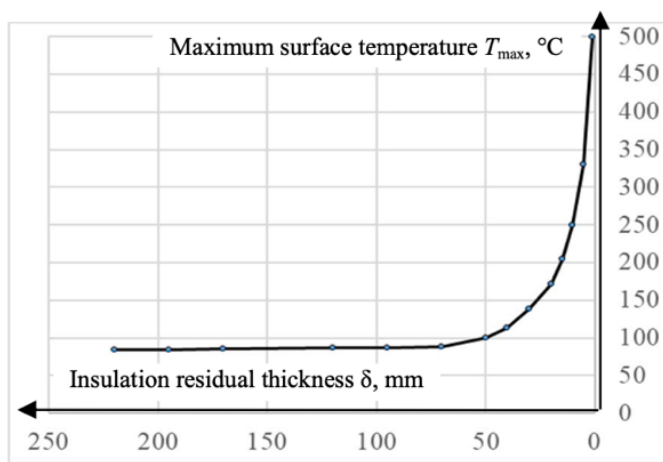


Рисунок 2 – Максимальна температура T_{max} на корпусі індуктора печі залежно від залишкової товщини δ термоізоляції при протіканні міді

каналльної печі. Коли з'являється нерівномірний розподіл температури (з'являються більш гарячі області), за допомогою математичної моделі для різних конфігурацій виток розплаву вибирається схема ізотерм (ліній однієї температури), яка найкраще відповідає експериментальній. Таким чином визначається розмір витоків розплаву в теплоізоляції індуктора і прогнозується стан печі, визначається доцільність і безпека її подальшого використання. Удосконалений метод дозволяє проводити більш точний контроль і діагностику стану термоізоляції індуктора каналних печей. Вперше можна виявити

прослідковується чітка загальна тенденція: 1) з плином часу підвищується температура на корпусі печі; 2) з плином часу зростає швидкість підвищення температури (кривизна графіку – похідна від температури збільшується).

Математичне моделювання розподілу температури в об'ємі термоізоляції індуктора. Чисельним експериментом розраховано залежність максимальної температури на поверхні корпусу індуктора T_{max} від залишкової товщини термоізоляції δ .

Далі для кожного вимірюваного на корпусі значення максимальної температури T_{max} можна підібрати таку конфігурацію дефекту термоізоляції у моделі, яка дає відповідну поверхневу температуру. Тобто можна отримати прогнозовану залишкову товщину термоізоляції δ , таким чином оцінивши ступінь її зносу.

Пропонується регулярно проводити вимірювання температури в контрольних точках на поверхні корпусу індуктора

конкретні проблемні зони теплоізоляції та конфігурацію потоку розплаву, які через те, що вони знаходяться всередині об'єму суцільного середовища, на даний момент не можуть бути проаналізовані іншими методами.

Висновки. Шляхом математичного моделювання встановлено відповідність між зміною температури на поверхні корпусу індуктора індукційної каналної печі для плавки міді та глибиною проникнення розплаву у його термоізоляцію. Це дозволяє прогнозувати залишкову товщину теплоізоляції, таким чином оцінюючи ступінь її зносу. Запропоновано удосконалення методу оцінки ступеня зносу теплоізоляції індукційних каналних печей, яка полягає в додатковому контролі зміни розподілу температури на поверхні їх корпусу та використанні математичного моделювання. Таке вдосконалення дозволить точніше діагностувати стан теплоізоляції та завчасно попередити появу аварійних режимів роботи печі через витік розплавленого металу.

Перелік посилань

1. A.A. Shcherba, O.D. Podoltsev, I.M. Kucheriava, V.M. Zolotarev, R.V. Bilianin. Modeling and control of long-term electromagnetic and thermal processes in induction channel furnace for cooper rod production. *Technical electrodynamics*. Vol. 2. 2017, pp. 10-18.
2. 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.
3. N. Tran, T. Hang and U. Lüdtke. 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.
4. 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.
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. L. Dejaeghere, T. Pierre, M. Carin, P.L. Masson and M. Courtois. Design and development of an induction furnace to characterize molten metals at high temperatures. *High Temperatures-High Pressures*. Vol. 47(1), 2018.
7. 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.
8. 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.
9. 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 Electrodynamic*. . Vol. 3, 2017, pp. 13-21.
10. M.A. Shcherba. Three-dimensional modeling of electromagnetic and temperature fields in the inductor of channel-type furnace for copper heating. *IEEE Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. May 2017, pp. 427-431.