

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕПЛОВОГО ПОЛЕЙ В ФУТЕРОВКЕ ИНДУКТОРА КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ ЕГО ПЕРВИЧНОМ ЗАПУСКЕ

Щерба М.А., доцент

КПИ им. Игоря Сикорского, кафедра теоретической электротехники

Красовський П.О., студент

КПИ им. Игоря Сикорского, кафедра электромеханики

Введение. Математическое моделирование и анализ взаимосвязанных электромагнитных (ЭМ) и тепловых процессов, возникающих при индукционной плавке металлов, являются мощными инструментами для разработки и усовершенствования промышленного оборудования, диагностики и оптимизации технологических процессов, а также контроля и предотвращения возможных аварийных режимов [4, 8]. Реальные системы индукционного нагрева имеют сложную трехмерную геометрию, нелинейные физические свойства, а протекающие в них процессы носят динамический характер. Ранее моделировать такие системы без принятия допущений о представлении трехмерной геометрии набором двумерных или осесимметричных проекций, линеаризации физических свойств не представлялось возможным [3, 5]. Даже учитывая интенсивное развитие численных методов и появление мощных инженерных программных продуктов в настоящее время задачи расчета процессов в системах индукционного нагрева, являются задачами повышенной сложности, и поиск их решения связан с большими математическими трудностями.

В данной работе исследуются процессы в индукционных канальных печах для плавки бескислородной меди и производства медной катанки на примере плавильно-раздаточной печи линии UPCAST US20X-10 [6], используемой на ПАО "Завод "Южкабель" (г. Харьков). Одной из главных практических задач является продления ресурса таких печей, а значит предотвращение появления трещин в их термоизоляционном материале (футеровке) и протеканий расплава металла [5, 8]. Для этого при реализации технологических режимов нагрева меди необходимо минимизировать возникающие в локальных областях футеровки максимальные значения температуры, ее градиенты и размеры таких областей. Наиболее сложно удовлетворить указанные требования при первичных пусках индуктора печи (когда при плавлении медного шаблона его температура и температура близлежащих областей футеровки непрерывно возрастает от 100°C до 1230°C), поэтому исследованию возникающих при этом электрических и тепловых процессов и посвящена данная работа.

Целью данной работы является проведение трехмерного математического моделирования и анализа распределения электромагнитного и теплового полей в футерованном индукторе плавильно-раздаточной печи при его первичном пуске для выявления областей наибольших температур и градиентов температур.

Физико-математическая постановка задачи. На клеммы шин индуктора подается синусоидальное напряжение частотой 50 Гц в диапазоне 160–260 В, создающее токи 700–1050 А. В системе источника питания реализована обратная связь согласно данным датчика температуры шаблона, происходят автоматические переключения между 14 ступенями мощности (минимальная – 33 кВт, максимальная – 616 кВт), таким образом, чтоб температура шаблона менялась плавно со скоростью 20°C за 15 мин.

Поскольку масштабы электромагнитных и тепловых процессов на временной оси существенно отличаются (20 мс период ЭМ волны и 18 часов длительность нагрева), то электромагнитная подзадача решается в частотной области, а тепловая подзадача – во временной [1, 9]. Для расчета электромагнитного поля использовалось эффективное значение относительной магнитной проницаемости μ_r стали магнитопровода и уравнение для векторного потенциала \dot{A} имеет вид:

$$\operatorname{rot}\left[\frac{1}{\mu_0\mu_r}\operatorname{rot}\dot{A}\right]+j\omega\sigma(T)\dot{A}=\dot{J}_{ext}, \quad (1)$$

где $\sigma(T)$ – электропроводность материалов, ω , \dot{J}_{ext} – частота и сила тока в шинах.

Для расчета теплового поля решалось уравнение теплового баланса:

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

где ρ , C_p , k – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материалов, T – температура, Q_{eddy} и Q_{water} – удельная мощность источников тепла (нагрев вихревыми токами и охлаждение проточной водой), которые рассчитываются согласно уравнениям (3) и (4).

$$Q_{eddy} = \dot{E} \cdot \dot{J}^* = \omega^2 \sigma(T) \dot{A} \dot{A}^*, \quad (3)$$

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

где M_t – расход воды в килограммах, через поперечное сечение трубок охлаждения в единицу времени, T_{in} – температура поступающей воды, V – внутренний объем трубок охлаждения.

Система уравнений (1) – (4) решалось методом конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics [2, 7] для расчётной области, включающей все элементы индуктора печи. На границах области задавались условия магнитной изоляции $\dot{n} \times \dot{A} = 0$ и конвективного отвода тепла:

$$-k \cdot \partial T / \partial n = h(T - T_{ext}), \quad (5)$$

где \vec{n} – вектор нормали к поверхности, h – коэффициент теплоотдачи, T_{ext} – температура окружающего воздуха.

Результаты моделирования. В результате проведения численного эксперимента получено распределение электромагнитного и температурного полей в расчетной области индуктора каналной печи в процессе непрерывного нагрева и плавления медного шаблона длительностью 18 часов. Вдоль линии сечения x индуктора (рис. 1, а), проходящей через его корпус, футеровку и шаблон показано распределение температуры T (рис. 1, б) для четырех моментов времени: $t_1 = 15$ мин, $t_2 = 5$ ч, $t_3 = 11$ ч и $t_4 = 17$ ч после начала нагрева.

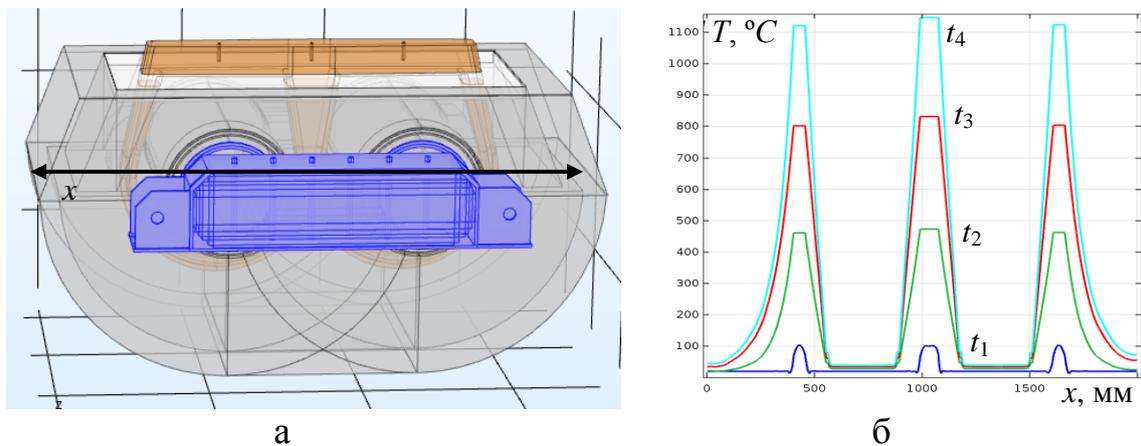


Рисунок 1 – а – Индуктор печи с футерованным медным шаблоном и б – распределение в нем температуры для четырех моментов времени.

В каждый из моментов три “полочки” максимальной температуры T_{max} соответствуют температуре медного шаблона. Минимальные значения T_{min} наблюдаются на стальном корпусе индуктора. Наблюдается прогревание футеровки, что отражается в увеличении размеров областей повышенной температуры на графиках рис. 1, б.

Изменение величины градиента температуры Γ_T по той же линии сечения для аналогичных моментов времени после пуска индуктора показано на рис. 2, а. Из-за высокой теплопроводности меди наблюдаются три “полочки” минимального градиента Γ_T в медном шаблоне. Максимальные же градиенты наблюдаются возле шаблона и для момента времени t_4 достигают значения 13000 °C/м.

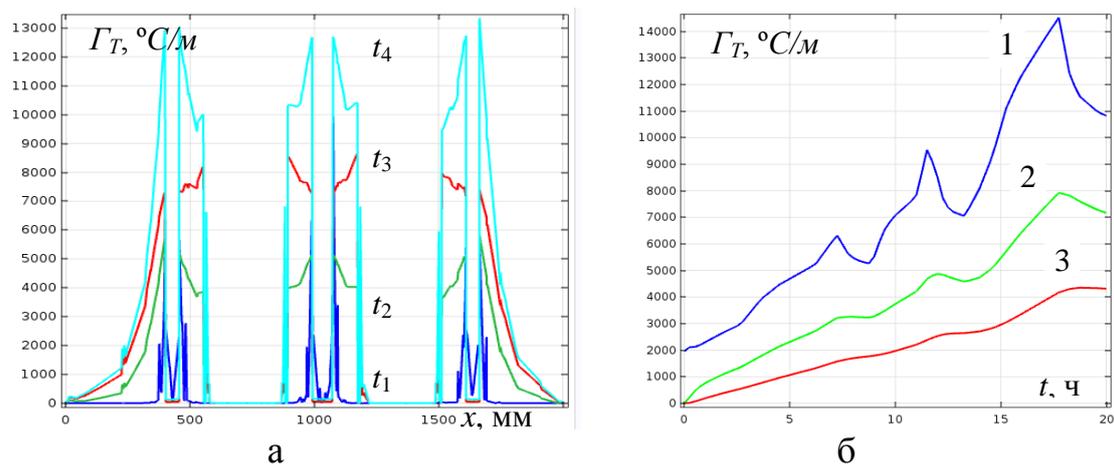


Рисунок 2 – Изменение градиента температуры в футеровке индуктора: а – по линии сечения для четырех моментов времени; б – во времени в трех контрольных точках.

На рис. 2, б показано изменение величины Γ_T во времени в трех контрольных точках футеровки на расстоянии 1, 5 и 10 см от медного шаблона (кривые 1, 2 и 3). На кривой 1 видно уменьшение градиентов во время релаксационных пауз. Так, если во время первой паузы Γ_T уменьшается на $100^{\circ}\text{C}/\text{см}$, то во время второй паузы – уже на $250^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Контроль изменения градиентов во времени может быть критерием для корректировки технологических режимов нагрева меди и, как следствие, продления долговечности печи. Сопоставление изотерм в объеме индуктора, определение микрообъемов повышенных температур и градиентов температур в нормальном и различных аварийных режимах работы печи может служить методом диагностики ее работы.

Выводы. Выполнено математическое моделирование и анализ трехмерного распределения электромагнитного и температурного полей в футерованном индукторе плавильно-раздаточной печи при его первичном запуске длительностью 18 часов. Выявлены локальные области наибольших температур, градиентов температуры в футеровке индуктора и их изменение во времени.

Контроль распределения температуры T и ее градиента Γ_T может служить критерием для диагностики работы печи и оценки ее ресурса. Сопоставляя данные измерений температуры в различных точках на поверхности корпуса индуктора с полученными в результате моделирования распределениями температуры внутри его футеровки, можно диагностировать состояние канала индуктора. Также можно анализировать возможные отклонения в его работе, связанные с утечками жидкого металла в трещины футеровки, и прогнозировать как дальнейший ресурс индуктора, так и необходимость его замены.

Перечень ссылок

1. *Bermúdez A., Gómez D., Muñiz M.C., Salgado P., Vázquez R.* Numerical simulation of a thermo-electromagneto-hydrodynamic problem in an induction heating furnace // *Applied Numerical Mathematics*, vol. 59(9), pp. 2082-2104, 2009.
2. *Comsol Multiphysics*, <https://www.comsol.com/>, Comsol Inc., Burlington, MA, USA, 2017
3. *Ghojel J.I., Ibrahim R.N.* Computer simulation of the thermal regime of double-loop channel induction furnaces // *J. of materials processing technology*. – 2004, – vol. 153, – 386-391.
4. *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*, vol. 61.5, pp. 2509-2520, 2014.
5. *Rapoport E., Pleshivtseva Yu.* Optimal control of induction heating processes – CRC Press, 2006.
6. *UPCAST*, <http://www.upcast.com/>, Finland
7. *Золотарёв В.М., Щерба М.А., Золотарёв В.В., Беянин Р.В.* Трёхмерное моделирование электромагнитных и тепловых процессов индукционной плавки медного шаблона с учетом конструкции элементов установки // *Техн. електродинаміка*. – 2017. – № 3. – С. 13–21.
8. *Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Беянин Р.В.* Моделирование и контроль длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов в индукционной канальной печи для производства медной катанки // *Техн. електродинаміка*. – 2017. – № 4. – С. 55–64.
9. *Щерба М.А., Бугаенко А.О.* Расчет мультифизических процессов при индукционном нагреве меди с учетом нелинейных свойств материалов и сложной трехмерной геометрии // *Міжн. наук.-техн. журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"*, 2016, 390–393.