

РАСЧЕТ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ МЕДИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СЛОЖНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Щерба М.А., доцент

КПИ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретической електротехники

Бугаенко А.О., студент

КПИ ім. Ігоря Сікорського, кафедра возобновляемых источников энергии

Введение. В промышленности широко используется индукционный способ бесконтактного нагрева металлов за счет наведения в их объеме электрических токов внешним переменным магнитным полем [1, 2, 4]. Так на ПАО "Завод "Южкабель" (г. Харьков) реализована технология непрерывного литья бескислородной медной катанки по технологии UPCAST® [3], основанной на индукционном плавлении меди. Основной проблемой при реализации такой технологии является нарушение целостности футеровки плавильно-раздаточной печи или индуктора и утечка жидкого металла в объем футеровки [6]. Это приводит к необходимости прекращения процесса литья, отключения печи и дорогостоящей перефутеровке ее частей перед повторным запуском.

Исследование изменения электромагнитных и температурных полей в объеме элементов печи позволяет определить области наибольших температурных градиентов, т.е. места с наибольшей вероятностью появления трещин в футеровке. Исследование изменения температурных градиентов во времени позволяет контролировать безопасность процесса индукционного нагрева и дает возможность разработать протокол управления мощностью индуктора для достижения равномерного распределения температуры (минимизации температурных градиентов).

Целью данной работы было создание трехмерной математической модели индукционной плавильно-раздаточной печи для исследования электромагнитных и тепловых процессов и выявления областей наибольших температурных градиентов в нормальном и аварийном режимах работы печи.

Результаты исследований. Сложность поставленной задачи заключается в том, что, во-первых, исследуемый объект имеет сложную трехмерную геометрию, которую нельзя свести к двумерному расчету или представить набором простейших трехмерных фигур. Во-вторых, характеристики рассматриваемых сред являются нелинейными: связь между модулями векторов напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B задается кривой намагничивания $H = f(B)$, а проводимость меди $\sigma(T)$ зависит от температуры. В-третьих, необходимо корректно описать процессы теплопередачи и теплоотвода в системе. А именно отвод тепла от катушек и металлического корпуса индуктора через водное охлаждение, с учетом температуры воды и ее массопереноса, конвективный отвод тепла от катушек и металлического корпуса через окружающий воздух, теплообмен между металлом и футеровкой и частями футеровке с разными тепловыми свойствами.

В работе была создана трехмерная математическая модель индукционной плавильной печи непрерывного литья бескислородной медной катанки по технологии UPCAST® (рис. 1 а), которая установлена на ПАТ «Завод Южкабель». Элементы модели (рис. 1 б) выполнены в соответствии с инженерными чертежами элементов печи с соблюдением всех размеров.

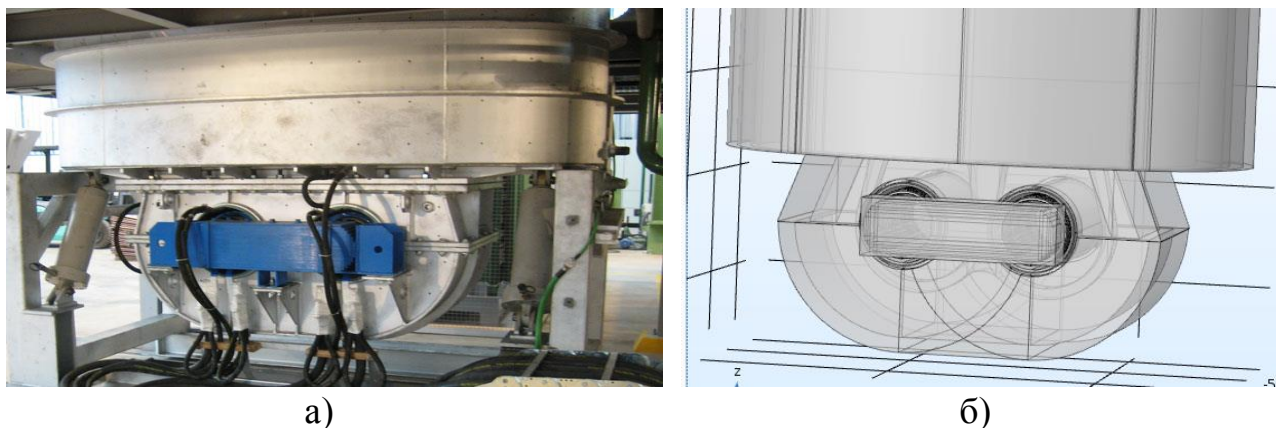


Рисунок 1 – а) индукционная плавильная печь и б) ее математическая модель.

Модель состоит из двух медных катушек с водным охлаждением, навитых в два слоя вокруг стального магнитопровода; медного шаблона для плавки, погруженного в стальной корпус печи, заполненный футеровочной смесью и ванны с четырехслойной футеровкой для основной массы металла.

В работе решались взаимосвязанные электромагнитная и тепловая задачи по расчету трехмерного распределения магнитного поля и температуры во всех элементах модели.

Физико-математическая постановка задачи. Электромагнитная задача.

На клеммы катушек индуктора подается синусоидальное напряжение частотой 50 Гц в диапазоне 160–260 В создающее токи 700–1050 А. Возникающее магнитное поле наводит в медном шаблоне вихревые токи, постепенно (в течении 18 часов) разогревая его до температуры 1230 °С. Для расчета распределения магнитного поля и плотности токов решалась система уравнений Максвелла [5] относительно векторного потенциала A .

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}, & \mathbf{B} &= \operatorname{rot} \mathbf{A}, \\ \mathbf{J} &= \sigma \cdot \mathbf{E} + \mathbf{J}_{ext}, & \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{A} / \partial t. \end{aligned} \quad (1)$$

Ферромагнитные свойства стального сердечника индуктора задавались кривой намагничивания $H = f(B)$ и зависимость между векторами \mathbf{H} и \mathbf{B} имеет вид $\mathbf{H} = f(B) \cdot (\mathbf{B}/B)$.

Так результирующее уравнение для векторного потенциала A имеет вид:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{f(|\operatorname{rot} \mathbf{A}|)}{|\operatorname{rot} \mathbf{A}|} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{J}_{\text{вн}} = 0. \quad (2)$$

Уравнения (2) решалось методом конечных элементов (МКЭ) в программном пакете Comsol Multiphysics [5]. Для этого был выбран расчетный объем в форме куба, который включал все элементы индукционной печи и определенный объем окружающего воздуха. На границе расчетного объема задавалось условие Дирихле (магнитной изоляции $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$).

Тепловая задача. Для расчета распределения тепла в расчетном объеме решалось уравнение теплового баланса

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \text{grad} T - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = Q, \quad (3)$$

где ρ , C_p , λ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материалов давления, T – температура, Q – удельная мощность источника тепла.

Расчетное уравнение (3) дополнялось условиями на границах расчетного объема и на границах раздела разных элементов индукционной печи. В процессе работы температура на корпусе индуктора достигает 80 °С в то время как температура окружающего воздуха – 20 °С. На границе корпус индуктора-воздух задавалось условие теплообмена:

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial n = k(T - T_a), \quad (4)$$

где k – коэффициент теплоотдачи, T_a – температура воздуха, n – вектор нормали к границе. На границах расчетного объема задавалось условие Дирихле (температура окружающего воздуха 20 °С).

Водное охлаждение катушек индуктора задавалось с учетом температуры и потока массы и воды уравнением:

$$M_f \cdot C_p (T_w - T) / (2\pi R \cdot S \cdot m), \quad (5)$$

где M_f , T_w – массовый расход и температура поступающей воды, R , S , m – радиус намотки, площадь поперечного сечения и количество витков катушек.

Отвод тепла от корпуса индуктора через водную рубашку охлаждения и трубки контроля температуры также задавался уравнением (5) с корректировкой на геометрические параметры этих трубок.

Мультифизическое объединение задач. Связь между задачами расчета распределений магнитного и теплового полей реализуется использованием в качестве источника тепла Q в уравнении (3) наведенные токи:

$$Q = J^2 / \sigma = \sigma (|\partial A / \partial t|)^2, \quad (6)$$

Отметим, что удельная электропроводность меди задавалась функцией от температуры согласно уравнению:

$$\sigma(T) = 1 / [\rho_0 (1 + \alpha(T - T_0))], \quad (7)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление меди при температуре $T_0 = 0$ °С, α – температурный коэффициент сопротивления.

Нанесения конечноэлементной сетки. Для решения дифференциальных уравнений МКЭ расчетный объем разбивался конечноэлементной сеткой тетраэдров. Из-за существенных отличий размерных характеристик различных частей индукционной печи, для каждой ее части формировалась своя сетка и настраивались следующие параметры: максимальный и минимальный размер элементов, максимальная скорость увеличения элемента, коэффициент кривизны и степень разрешения узких участков. Результаты нанесения конечноэлементной сетки на каждый элемент индукционной печи продемонстрированы в табл. 1.

Таблица 1 – Сетка конечных элементов для каждого элемента печи

					
Медный шаблон	Магнито-провод	Катушки с охлаждением	Рубашка охлаждения корпуса	Низ корпуса	Верх корпуса

Результаты моделирования. На рис. 2 показаны результаты численного эксперимента.

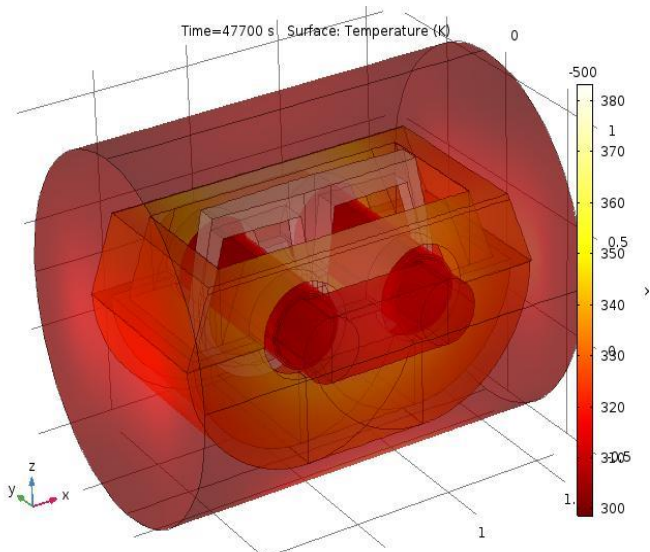


Рисунок 2 – Трехмерное распределение температуры в печи

Рассчитано трехмерное распределение температуры по всем частям печи, включая медный шаблон, футеровочный материал, катушку, магнитопровод, водное охлаждение индуктора, корпус и охлаждение корпуса. Определены области наибольшей температуры и наибольшего градиента температуры, которые являются наиболее опасными с точки зрения возникновения трещин в футеровке и утечки жидкого металла.

Согласно результатам проведенной работы, можно сделать следующие **выводы**:

Разработана математическая модель и проведен расчет электромагнитных и тепловых процессов при нагреве медного шаблона в индукционной плавно-раздаточной печи. Определено изменение максимальных температур и температурных градиентов в процессе длительного нагрева металла, что может служить основой усовершенствований протоколов технологического процесса.

Перечень ссылок

1. *Egalon J., et al.* Multiphase system for metal disc induction heating: Modeling and RMS current control. *IEEE Transactions on industry applications*, 2012, 48.5: 1692-169
2. *Nguyen K.L., et al.* Robustness of a resonant controller for a multiphase induction heating system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51.1: 73-81.
3. *www.upcast.com*
4. *Бабат Г.И.* Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 552 с.
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1980. – 560 с.
6. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Наш формат, 2013. – 550 с.