

УДК 621.757

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ СБОРКИ И РАЗБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ

©Романов С. В.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

Романов Сергій Валерійович: ORCID: 0000-0003-3770-1241; svrom@rambler.ru; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Одним из самых распространённых способов сборки и разборки соединений с натягом является тепловой способ с индукционным воздействием. Чтобы разъединить элементы соединения с использованием индукционного нагрева, необходимо такое термическое воздействие на охватывающую деталь, чтобы она нагревалась быстрее, чем охватываемая. Это требует согласования интенсивности нагрева со скоростью распространения тепла в материале и теплопередачей между деталями.

Поскольку соединения с натягом имеют значительные различия, как по форме деталей, так и по месту их расположения в машине, то создание математической модели индукционного нагрева, учитывающей характеристику деталей и соединений, а так же параметры электромагнитного поля, в значительной степени позволяет сократить экспериментальную часть процесса проектирования, а также повысить качество получаемых изделий.

В работы рассмотрены аспекты и даны рекомендации по математическому моделированию тепловых и электрических процессов, происходящих при индукционном нагреве.

Ключевые слова: соединения с натягом; индуктор; индукционный нагрев; математическое моделирование.

Романов С. В. «Особливості математичного моделювання індукційного нагріву деталей для теплового складання і розбирання з'єднань».

Одним з найбільш поширених способів складання і розбирання з'єднань з натягом є тепловий спосіб з індукційним впливом. Щоб роз'єднати елементи з'єднання з використанням індукційного нагріву, необхідно такий термічний вплив на охоплюючу деталь, щоб вона нагрівалася швидше, ніж охоплювана. Це вимагає узгодження інтенсивності нагріву зі швидкістю поширення тепла в матеріалі і теплопередачею між деталями.

Оскільки пресові з'єднання мають значні відмінності, як за формою деталей, так і за місцем їх розташування в машині, то створення математичної моделі індукційного нагріву, що враховує характеристику деталей і з'єднань, а так само параметри електромагнітного поля, в значній мірі дозволяє скоротити експериментальну частину процесу проектування, а також підвищити якість одержуваних виробів.

У роботи розглянуті аспекти та надано рекомендації щодо математичного моделювання теплових і електричних процесів, що відбуваються при індукційному нагріванні.

Ключові слова: пресові з'єднання; індуктор; індукційний нагрів; математичне моделювання.

Romanov S. “Peculiarities of mathematical modeling of induction heating of details for thermal assembly and disconnection of connections”.

One of the most common ways of assembling and disassembling connections with interference is a thermal method with inductive action. To separate the connection elements using induction heating, it is necessary to heat the female part so that it heats up faster than the male member. This requires matching the intensity of heating with the rate of heat propagation in the material and heat transfer between the parts.

Since the connection with the interference has significant differences, both in the shape of the parts and in the place of their location in the machine, the creation of a mathematical model of induction heating, taking into account the characteristics of parts and compounds, as well as the parameters of the electromagnetic field, significantly reduces the experimental part of the process designing, as well as improve the quality of the products.

The papers consider aspects and give recommendations on mathematical modeling of thermal and electrical processes that occur during induction heating.

Key words: connections with interference; inductor; induction heating; mathematical modeling.

1. Постановка проблемы

При индукционном нагреве охватываемых деталей для тепловой сборки и разборке соединений с натягом, контролируемым параметром процесса является температура нагреваемого объекта. Определение величины интенсивности теплового воздействия, которая позволила бы осуществить технологический процесс сборки или разборки и при этом минимизировать потери тепла в окружающую среду является целью математического моделирования нагрева.

Таким образом, для построения математической модели необходимо установить влияние различных параметров электромагнитного поля на процесс генерирования теплоты в нагреваемом объекте и их взаимосвязь.

2. Анализ последних исследований

Нагрев изделия проходит обычно при изменяющихся температуре (на поверхности) и тепловом потоке. Зависимость их от времени может быть очень разнообразной. Однако можно выделить два характерных режима, которые не встречаются в совершенно чистом виде, но в той или иной степени приближаются к режимам, имеющим место в практике. Это нагрев при постоянной удельной мощности.

Наиболее простой случай нагрева чисто поверхностного типа. Считается, что внутри тела источники тепла отсутствуют, т.е. что глубина проникновения тока равна нулю. Если требуемая глубина прогрева x_k в десять и более раз меньше толщины плоского тела, то без ущерба для точности расчета толщина тела может быть исключена из рассмотрения.

Температура T на расстоянии x от поверхности выражается формулой, полученной А. В. Лыковым [1]

$$T = T_0 [1 - \Phi(z)], \quad (1)$$

где T_0 – температура поверхности; C ; $z = x / (2\sqrt{at})$;

$C_1 + C_2 + C_3 = T_{ce_0} - T_{ce_n}$ – температуропроводность, $m^2 / сек$; t – время

нагрева, *сек*; $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz$ – интеграл вероятности ([2], приложение 1).

Для удельной мощности в любой момент времени t

$$p_0 = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \lambda T_0 \Phi_1(0) \left(\frac{dz}{dx} \right)_{x=0} = \frac{\lambda T_0}{\sqrt{\pi at}} = 0,564 \frac{\lambda T_0}{\sqrt{at}}. \quad (2)$$

Здесь $\Phi_1(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2}$ – первая производная интеграла вероятности.

Если $x = 0$, то и $z = 0$, а следовательно, $\Phi_1(z) = \Phi_1(0) = 2/\sqrt{\pi}$.

3. Основная часть

Из формулы (2) видно, что в чистом виде режим с постоянной температурой поверхности осуществлен быть не может, так как для этого в момент включения удельная мощность должна быть бесконечно большой. Практически температура поднимается быстро в течение промежутка времени, который значительно меньше, чем общая длительность нагрева, а затем температура поддерживается постоянной. Начальное значение удельной мощности может быть в 10-20 раз больше, чем конечное.

При определенных значениях температуры поверхности T_0 и температуры T_k различные значения глубины закаленного слоя x_k будут соответствовать вполне определенному значению $z = z_k$. Это следует прямо из формулы (1), если ее переписать в виде

$$T_k / T_0 = 1 - \Phi(z_k) = const.$$

Правая часть может быть равна левой только при условии $z_k = const$. Тогда

$$x_k = 2z_k \sqrt{at_k}. \quad (3)$$

Подставив в формулу 2 выражение для $\sqrt{at_k}$ из формулы 3, выразим удельную мощность в момент t_k через глубину прогрева x_k

$$p_{0k} = 1,128 \frac{\lambda T_0 z_k}{x_k} = \frac{const}{x_k}. \quad (4)$$

Средняя мощность P_{0cp} за время нагрева t_k , нужная для расчета затраченной энергии

$$P_{0cp} = \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} p_0 dt = 0,564 \frac{\lambda T_0}{t_k \sqrt{a}} \int_0^{t_k} \frac{dt}{\sqrt{t}}. \quad (5)$$

Откуда

$$P_{0cp} = 2p_{0k} = 1,128 \frac{\Delta T_0}{\sqrt{at_k}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (6)$$

Технологія машинобудування

Наиболее общий вариант нагрев глубинного типа. Для приближенного теплового расчета можно считать, что плотность тока постоянна в пределах слоя, глубина которого Δ .

Распределение температуры по глубине может быть получено из уравнения Фурье с правой частью, неравной нулю

$$\frac{dT}{dt} - a \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{a}{\lambda} p. \quad (7)$$

где T – температура в точке x , °C; a – коэффициент температуропроводности, м²/сек; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град); p – мощность источников тепла, Вт/м³; t – время, сек;

$$w = p_0 / \Delta, \quad (8)$$

где p_0 – удельная мощность, Вт/м².

При решении уравнения (7) предполагаем, что потери тепла во внешнее пространство отсутствуют. Это не вносит существенной ошибки при расчетах режимов поверхностного нагрева, так как реальные значения удельных мощностей во много раз превосходят удельную мощность потерь, которая даже при температурах 800-900 °C составляет около 10-15 Вт/см².

Для цилиндра решение (7) дает значения удельной мощности и времени нагрева. Время нагрева и удельная мощность определяются по формулам:

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{\tau + S(\alpha, 1, \tau)}{\tau + S(\alpha, \beta_k, \tau)} = f(t_k), \quad (9)$$

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{2R_2[\tau + S(\alpha, 1, \tau)]}, \text{ Вт/м}^2, \quad (10)$$

где $S(\alpha, 1, \tau)$ – табличное значение функции; $\beta = \frac{X_k}{R_2}$.

$$t_k = \frac{R_2^2}{a} \cdot \tau \quad (11)$$

Здесь a – относительная глубина нагреваемого слоя; τ – постоянная Фурье; λ – коэффициент теплопроводности; S – функция; R_2 – радиус цилиндра; β – относительная координата рассматриваемой точки нагрева. T_0 и T_k – температура нагрева поверхности и температура нагреваемого слоя на расстоянии x_k .

Значение полезной энергии найдем, зная массу металла, нагретого до температуры T_k , и его теплоемкость

$$W_k = G_k c T_k = S x_k \gamma c T_k, \text{ Дж}, \quad (12)$$

где G_k – масса нагретого металла, кг; γ – плотность, кг/м³; c – теплоемкость, Дж/(кг·град); S – одновременно нагреваемая площадь, м².

Полная энергия

$$W = S p_0 t_k, \text{ Дж}. \quad (13)$$

Термический к.п.д.

$$\eta_t = \frac{W_k}{W}. \quad (14)$$

Если нагревается только часть изделия или применяется последовательный способ нагрева, то в этих случаях следует учесть утечку тепла в осевом направлении. Тогда удельная мощность будет больше, чем вычисленная по формуле (10), и в среднем можно принять

$$p'_0(1,2 \div 1,3)p_0. \quad (15)$$

Активное сопротивление r_2 при поверхностном эффекте независимо от характера изменения ρ и μ по сечению l_{xa} всегда может быть представлено в виде [2]

$$r = \frac{l \rho}{a \Delta}, \quad (16)$$

где Δ – эффективная глубина проникновения тока, в пределах которой плотность тока условно постоянна.

Для цилиндра, который имеет диаметр d и высоту h

$$r_2 = 1,37 \frac{\pi d \rho}{h \Delta}, \text{ Ом}, \quad (17)$$

где ρ – удельная проводимость материала.

Для стального цилиндра

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \text{ м}. \quad (18)$$

Чтобы выделить требуемое для нагрева детали количество тепла, сила тока I должна составлять

$$I = \frac{P_a \cdot 10^3}{\cos \varphi \cdot U}, \text{ А}. \quad (19)$$

Тогда из (17)-(19) имеем уравнение для определения требуемой активной мощности нагрева

$$P_a = 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\pi d}{h} \cdot I^2 W^2 \sqrt{\rho \mu f}. \quad (20)$$

Для определения μ по графику (рис. 1) необходимо иметь удельную мощность P_0 , выделяемую в нагреваемом слое, и параметр $H_e^2 \sqrt{\mu}$. Данный параметр устанавливает зависимость удельной мощности P_0 , приходящейся на единицу поверхности нагреваемого слоя детали, от магнитных свойств стали [2]:

$$H_e^2 \sqrt{\mu_e} = \frac{P_0 367}{\sqrt{\rho f}}, \quad (21)$$

где H_e – напряженность магнитного поля на поверхности нагреваемого слоя, А/м;

μ_e – относительная магнитная проницаемость этого слоя; P_0 – удельная мощность, Вт/м²;

ρ – удельное сопротивление стали, Ом м; f – частота тока, Гц.

Для проверки модели были выполнены расчёты и проведены экспериментальные

Технологія машинобудування

исследования по нагреву бандажа колеса мостового крана токами повышенной частоты и полузакрытого цилиндра – с отверстием в днище. Сравнительный анализ результатов математического моделирования и данных экспериментов показал хорошее совпадение данных.

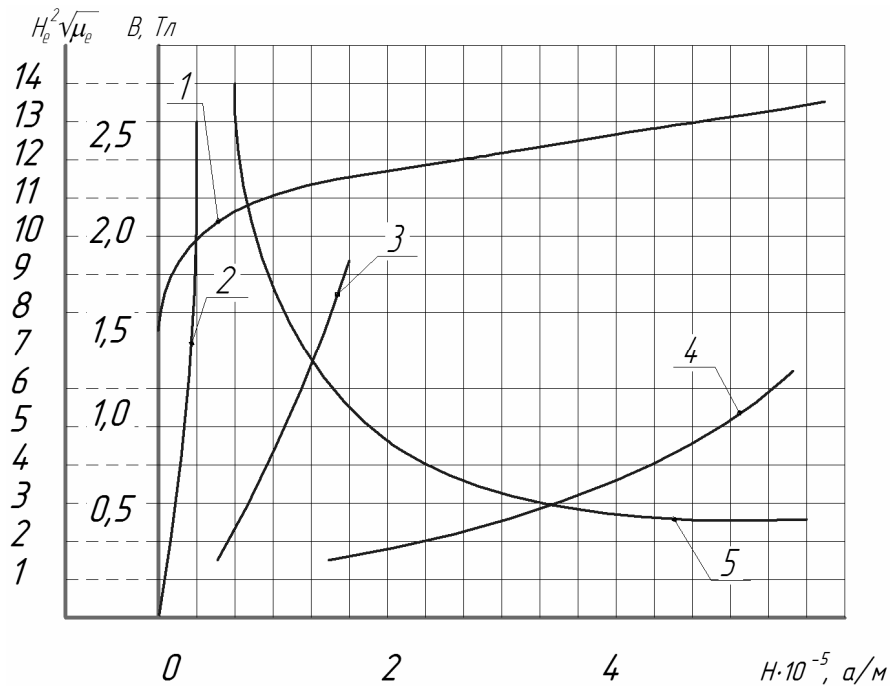


Рис. 1 – Усредненные магнитные свойства стали[^]
 1 – $B=f(H)$; 2, 3, 4 – $H^2 \sqrt{\mu} = f(H)$ (значения $H^2 \sqrt{\mu}$ нужно умножить на $10^9, 10^{10}, 10^{11}$ соответственно для каждой из трех кривых); 5 – $\mu=f(H)$

Выводы

При построении математической модели индукционного нагрева деталей следует исходить из требуемой полезной мощности, идущей собственно на нагрев изделия или его части, и факторов, влияющих на ее изменение: частоты тока f , которая определяет толщину нагреваемого слоя Δ , в котором переменное электромагнитное поле генерирует мощность в виде теплоты, размеров поверхности нагреваемого участка детали.

Список использованных источников:

1. Андреев А. Г. К вопросу оптимизации технологических нагревов при сборке и разборке соединений с натягом / А. Г. Андреев, А. Н. Куцин, А. В. Щепкин // Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Харьков : ХГПУ, 1998. – № 56.
2. Слухоцкий А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.

References

1. Andreyev, A, Kutsin, A & Shchepkin, A 1998, 'K voprosu optimizatsii tekhnologicheskikh nagrevov pri sborke i razborke soyedineniy s natyagom', *Respublikanskiy mezhvedomstvennyy nauchno-tekhnicheskyy sbornik*, no. 56.
2. Slukhotskiy, A & Ryskin, S 1974, *Induktory dlya induktsionnogo nagreva*, Energiya, Leningrad.

Стаття надійшла до редакції 31 травня 2018 р.