

## МАЛОГРАДИЕНТНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ДЕТАЛЕЙ ПОД СБОРКУ СОЕДИНЕНИЙ

Арпентьев Б.М., Дука А.К., Коваленко В.В. (УИПА, г. Харьков, Украина)

*Method of calculation of quick induction heat of ringing details was offered, what ensure small temperature gradient in material. A result of calculation on wheel centre of locomotive wheel is presented.*

При получении соединений с натягом ответственного назначения используется предварительный нагрев охватывающих деталей, что позволяет осуществлять сборку с термическим зазором (без прессового усилия). Это повышает прочность соединения по сравнению с получаемым запрессовкой [1]. Для крупногабаритных соединений такой способ сборки является единственно возможным, так как для них требуется очень большие усилия запрессовки, которые не могут развить обычные стандартные прессы.

Наиболее быстро нагревать детали можно индукционным способом [2]. Однако скоростной нагрев дает большие градиенты температур в материале детали, что не всегда допустимо.

Целью работы является нахождение режимов индукционного нагрева с малым температурным градиентом и способа его осуществления.

Крупногабаритные изделия цилиндрической формы, такие как, бандажи, облицовки гребных валов судов, валки прокатных станков и др. характеризуются незначительным превышением внешнего диаметра над внутренним  $D_{н}/D_{в} < (1,5-2,0)$  и, соответственно, еще более незначительным отношением глубины проникновения электромагнитного поля ( $\Delta$ ) к любому из диаметров ( $\Delta/D_{в} < (0,01-0,05)$ ). Это позволяет при исследовании радиального температурного градиента в процессе индукционного нагрева рассматривать эти изделия как спицеобразные, т.е. с учетом осевой симметрии и исследовать температурный градиент стержня в прямоугольной системе координат.

Уравнение нестационарного теплового поля в этом случае примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{P_0(x)}{c\gamma}, \quad (1)$$

где  $P_0(x)$  - удельная мощность источника тепла, [Вт/м<sup>3</sup>];  $T$  - превышение температуры элемента над температурой окружающей среды, [°C];  $a = \lambda / (c\gamma)$  - коэффициент температуропроводности материала, [м<sup>2</sup>/°C];  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, [Вт/(м·°C)];  $c, \gamma$  - удельная теплоемкость и вес материала, [Вт/(с·кг·°C)] и [кг/м<sup>3</sup>] соответственно.

Краевыми (граничными) условиями для (1) являются:

$$T(x, 0) = \varphi_0; \quad T(0, \tau) = T_1(\tau); \quad T(L, t) = T_2(\tau),$$

где  $L = (D_{н} - D_{в})/2$  - эквивалентная длина стержня, [м];  $\tau, x$  - текущие координаты времени и длины, [с], [м];  $T_1, T_2$  - температура стержня на его концах.

С учетом особенностей индукционного нагрева в продольном электромагнитном поле возможны три варианта термовоздействия:

- а) внешний нагрев, охватывающим деталь индуктором;
- б) нагрев внутренней поверхности, размещенным внутри изделия индуктором;
- в) нагрев двумя индукторами одновременно или их попеременным включением.

Указанные варианты размещения источников электромагнитного поля дают различную напряженность магнитного поля на наружной ( $H_H$ ) и внутренней ( $H_B$ ) поверхностях, отношение которых, в первом приближении, можно характеризовать как отношение наружного ( $D_H$ ) к внутреннему ( $D_B$ ) диаметру детали: для охватывающего индуктора -  $H_H/H_B = D_H/D_B$ , а для охватываемого -  $H_B/H_H = D_H/D_B$ .

В соответствии с этим можно найти распределение суммарной подводимой мощности на внутренней и наружной поверхностях изделия

$$P = \frac{c \cdot T_2}{\tau}, \quad (2)$$

где  $c$  – теплоемкость материала;  $T_2$  – конечное превышение температуры нагрева на внутренней поверхности;  $\tau$  – заданное технологическое время нагрева.

Кольцевые токи, разогревающие изделие, протекают по контурам с сопротивлениями

$$r_H = \frac{\pi \rho D_H}{h \Delta} \quad \text{и} \quad r_B = \frac{\pi \rho D_B}{h \Delta}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное электросопротивление материала;  $h$  – высота изделия;  $\Delta = \sqrt{\rho / \omega \cdot \mu}$  – глубина проникновения электромагнитного поля частотой  $\omega$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала.

Заданная мощность нагрева через удельную поверхностную мощность.

На наружной ( $w_H$ ) и внутренней ( $w_B$ ) поверхностях

$$P_H = w_H \cdot S_H = w_H \cdot \pi D_H \cdot h = I_H^2 r_H; \quad (4)$$

$$P_B = w_B \cdot S_B = w_B \cdot \pi D_B \cdot h = I_B^2 r_B;$$

где  $I$  ток в индукторе;  $S$  - площадь нагреваемой поверхности.

После подстановки (3) в (4), найдем

$$\frac{w_H}{\sqrt{\omega \rho}} = \sqrt{\mu_H} H_H^2 \quad \text{и} \quad \frac{w_B}{\sqrt{\omega \rho}} = \sqrt{\mu_B} H_B^2. \quad (5)$$

Из (5) нетрудно найти отношение удельной поверхностной мощности для каждого из трех вышеотмеченных вариантов нагрева, так например, для нагрева в продольном поле наружной катушки

$$\frac{\omega_H}{\omega_B} = \sqrt{\frac{\mu_H}{\mu_B}} \cdot \left( \frac{D_H}{D_B} \right)^2. \quad (6)$$

Учитывая, что  $\mu_H < \mu_B$ , отношение  $\omega_H/\omega_B = \left( \frac{D_H}{D_B} \right)^n$ , где  $n < 2,0$

Формулы (2) и (5) позволяют определить электромагнитное состояние нагреваемого материала, если иметь заранее специально построенную зависимость  $\sqrt{\mu} H^2 = f(H)$  ма-

териала. При этом величина  $\frac{w_H}{\sqrt{\omega\rho}}$  и  $\frac{w_B}{\sqrt{\omega\rho}}$  будет являться входным параметрами, а напряженность магнитного поля  $H$  искомым, позволяющим в дальнейшем определить  $\rho$  и  $\Delta$ .

Вместе с тем, поскольку в (1) используется значение удельной объемной мощности  $P_0 = P/V$ , и учитывая, что при индукционном нагреве объем, в котором генерируется мощность вихревых токов, и нагреваемая поверхность связаны отношением

$$V = S \cdot \Delta,$$

то можно установить связь  $P_0$  с параметрами электромагнитного поля, используя (4)

$$P_0 \cdot \pi D \cdot h \cdot \Delta = I^2 r.$$

Отсюда, используя для (2) выражение (3), найдем

$$P_0 / \omega = BH, \quad (7)$$

в котором входным параметром является  $P_0 / \omega$ , а искомыми  $B$  (индуктивность) и  $H$ , что более удобно, чем использование зависимости  $\sqrt{\mu} H^2 = f(H)$ .

Таким образом, при индукционном нагреве существуют три критериальные величины: удельная поверхностная мощность нагрева ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), удельная объемная мощность ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ) и удельная массовая мощность нагрева ( $\text{Вт}/\text{кг}$ ), которые связаны между собой, но имеют свои области применимости: удельная поверхностная мощность определяет электромагнитное состояние, удельная объемная мощность – пространственные градиенты, а массовая – скорость накопления тепловой энергии.

С учетом (6) и (6.а) удельная мощность источников тепла  $P_0(x)$  в (1) может быть записана в виде

$$P_0(x) = P_{0H} e^{-x/\Delta} + P_{0B} e^{-(L-x)/\Delta} \quad (8)$$

Тогда стационарное решение уравнения теплопроводности (1), в пренебрежении теплоотдачей в окружающую среду, будет надежно непосредственным двойным интегрированием уравнения для функции  $U$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -\frac{P_0(x)}{\lambda} \quad (9)$$

при  $U(0)=T_1$  и  $U(L)=T_2$

$$U(x) = -\frac{\Delta^2}{\lambda} (P_{0H} e^{-x/\Delta} + P_{0B} e^{-(L-x)/\Delta}) + C_1 x + C_2 \quad (10)$$

где  $C_2 = T_1 + \frac{\Delta^2}{\lambda} (P_{0H} + P_{0B} e^{-L/\Delta})$  - определяется из условия  $U(0)=T_1$ ,

$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L} - \frac{\Delta^2}{\lambda L} [-P_{0H}(1 - e^{-L/\Delta}) + P_{0B}(1 - e^{-L/\Delta})]$  - находится из условия  $U(L) = T_2$  при известной  $C_2$ . Здесь  $L$  –

Температурный градиент после нахождения  $C_1$  и  $C_2$  определится дифференцированием (10) по  $x$

$$\frac{\partial U}{\partial X} = (T_2 - T_1)/L - \frac{\Delta^2}{\lambda L} [-P_{0H}(1 - e^{-L/\Delta}) + P_{0B}(1 - e^{-L/\Delta})] - \text{т.д.}$$

Отклонение от стационарного решения  $W(x, \tau)$  для (1) находится в форме

$$W(x, \tau) = \sum_1^M B_n e^{-n^2 \tau / T_T} \sin\left(\frac{n \pi x}{L}\right) \quad (11)$$

где  $B_n = \int_0^L U(x) \sin \frac{n \pi x}{L} dx$  - коэффициенты разложения стационарного решения  $U(x)$  в ряд Фурье при  $\Phi_0 = \Phi_1$ ;

$T_T = \frac{L^2}{\pi^2 a}$  - постоянная времени теплопроводности, где  $L$  – длина стержня.

Так как при разложении в синусный ряд четные  $B_n = B_{2m} = 0$ , то основной вклад в формуле (11) для  $W(x, \tau)$  вносит первая гармоническая  $B_1 \sin \frac{\pi x}{L}$ , поскольку как значения нечетных  $B_{2m+1}$ , так в особенности множитель  $e^{-(2m+1)^2 \tau / T_T}$  резко уменьшается с ростом номера гармонической  $(2m+1)$ .

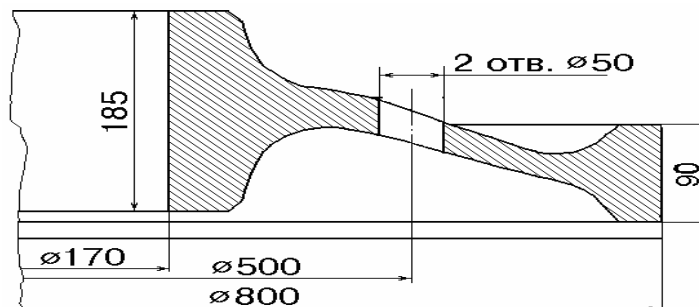


Рис. 1. Колесный центр колеса тепловоза ТГМ - 40

Вычисления амплитуды гармонических составляющих и значение  $W(x, \tau)$  реализованы на персональном компьютере в среде MAPLE. Результаты расчетов температурных градиентов для колесного центра колеса тепловоза ТГМ-40 (рис. 1) показали, что при двухстороннем расположении мощностей нагрева (наружный и внутренний индуктор) градиент существенно ниже, чем при односторонних расположениях катушек.

**Список литература:** 1. Зенкин А.С., Арпентьев Б.М. Сборка неподвижных соединений термическим методом. – М.: Машиностроение, 1987. - 128 с. 2. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

Сдано в редакцию 04.05.07