

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОЛИКА С ВНУТРЕННИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Канд. техн. наук Е. В. ГОЛИЦЫНА, д-р. техн. наук, проф. Ю. Р. ОСТНОВ

Приведены результаты вычислений температурных напряжений в центральном сечении роликов машины непрерывного литья заготовок. Учтена зависимость коэффициента теплопроводности, плотности и теплоемкости материала ролика от температуры. Проведено сравнение термонапряжений для роликов из разных марок стали.

Ролики зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), контактируя со слитком, имеющим высокую температуру, испытывают значительные тепловые нагрузки. Неравномерное распределение температуры в ролике вызывает термические напряжения, которые сокращают срок его службы. Поскольку в поверхностных слоях ролика возникают значительные колебания температуры, то при исследовании его термонапряженного состояния необходимо учесть зависимость теплофизических характеристик ролика от температуры. **Постановка задачи.** Температурное поле в поперечном сечении ролика, вращающегося с постоянной угловой скоростью Ω , описывается в неподвижной полярной системе координат задачей:

$$\omega \frac{\partial E(T)}{\partial \varphi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(k(T) \rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k(T) \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right), \quad R_1 < \rho < R_2, \quad (1)$$

$$(-1)^{m+1} k(T) \frac{\partial T}{\partial \rho} = g_m(\varphi, T), \quad \rho = R_m, \quad m = 1, 2, \quad (2)$$

где $-\pi \leq \varphi < \pi$, $T = T(\rho, \varphi)$; $E(T) = \int_0^T C_{1\cdot}(\tau) d\tau$; $k(T)$, $C_{1\cdot}(T)$ – коэффициент тепло-

проводности и удельная объемная теплоемкость ролика; R_1 , R_2 – внутренний и внешний радиусы ролика. Граничные условия (2) учитывают контактный и лучистый теплообмен между роликом и слитком, а также конвективный теплообмен между внутренней поверхностью ролика и охлаждающей его водой. Кроме того, должно выполняться условие периодичности по угловой координате: $T(\rho, \varphi + 2\pi) = T(\rho, \varphi)$. Решение задачи (1) – (2) получено методом малого параметра [1] и имеет вид: $T(\rho, \varphi) = X^{-1}(\theta(\rho/R_2, \varphi))$, где

$$\theta(r, \varphi) = u_0(r) + \varepsilon u_1(r) + \varepsilon \sum_{m=1}^2 w_m(t_m, \varphi), \quad \theta = X(T), \quad X(T) = \frac{1}{k^*} \int_0^T k(\tau) d\tau,$$

$t_m = (-1)^{m+1}(r - r_m)/\varepsilon$, $\varepsilon = \sqrt{k^*/(R_2^2 c^* \omega)}$; k^* и c^* – характерные значения коэффициента теплопроводности и удельной объемной теплоемкости.

$$w_m(t_m, \varphi) = 2\varepsilon \sum_{n=1}^{+\infty} \operatorname{Re} \left[\frac{Y_n^{(m)}}{\lambda_n^{(m)}} \exp(\lambda_n^{(m)} t_m + in\varphi) \right], \quad r = \frac{\rho}{R_2}, \quad r_1 = \frac{R_1}{R_2}, \quad r_2 = 1,$$

$$u_n(r) = a_n \ln r + b_n, \quad \lambda_n^{(m)} = -(1+i) \sqrt{\frac{nk^* C_V(T_0^{(m)})}{2c^* k(T_0^{(m)})}}, \quad T_0^{(m)} = u_0(r_m);$$

$$Y_n^{(m)} = \langle Y_m(\varphi) \exp(in\varphi) \rangle, \quad \langle f \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f d\varphi, \quad Y_m(\varphi) = \frac{R_2}{k^*} g_m(\varphi, T_0^{(m)}) + (-1)^m u_0'(r_m).$$

Константы a_n и b_n определяются из условий: $\langle Y_m(\varphi) \rangle = 0$,

$$\langle A_m(\varphi) \rangle u_1(r_m) + (-1)^m u_1'(r_m) = -\langle A_m(\varphi) w_m(0, \varphi) \rangle, \quad \text{где } A_m(\varphi) = \frac{\partial f_m(\varphi, T_0^{(m)})}{\partial \theta}.$$

Температурные напряжения в сечении полого ролика определяются по формулам [2]:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} \right), \quad \sigma_\varphi = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2}, \quad \sigma_{r\varphi} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \varphi} \right), \quad \text{где функция напряжений}$$

$F = F(r, \varphi)$ есть решение задачи:

$$\Delta_{r,\varphi}^2 F + D \cdot \Delta_{r,\varphi} T = 0, \quad r_1 < r < 1, \quad -\pi \leq \varphi < \pi,$$

$$F = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial r} = 0, \quad r = 1, \quad -\pi \leq \varphi < \pi,$$

$$F = r_1(l_1 + l_2 \cos \varphi + l_3 \sin \varphi), \quad \frac{\partial F}{\partial r} = l_2 \cos \varphi + l_3 \sin \varphi, \quad r = r_1, \quad -\pi \leq \varphi < \pi,$$

$$\Delta_{r,\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, \quad \alpha_T - \text{коэффициент линейного теплового расширения, } \nu -$$

коэффициент Пуассона, E - модуль Юнга; константы l_1, l_2, l_3 определяются из условий совместности перемещений [2].

Результаты вычислений. По полученным формулам проведены расчеты температурных полей и термонапряжений для ролика с внутренним охлаждением, находящегося в четвертой двухроликовой секции криволинейной МНЛЗ, при следующих данных: $R_1 = 60$ мм; $R_2 = 245$ мм; $T_c = 900^\circ \text{C}$ – температура поверхности слитка; $\omega = 0,044$ 1/с.

При оценке прочности роликов имеет значение величина эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экр}}$. На рис. 1 показаны напряжения в ролике из стали 15Х1М1Ф. Наибольшее значение напряжения $\sigma_{\text{экр}}$ достигается на внешней поверхности ролика в зоне его контакта со слитком. Величина $\sigma_{\text{экр}}$ превышает предел текучести в поверхностном слое глубиной около 8 мм.

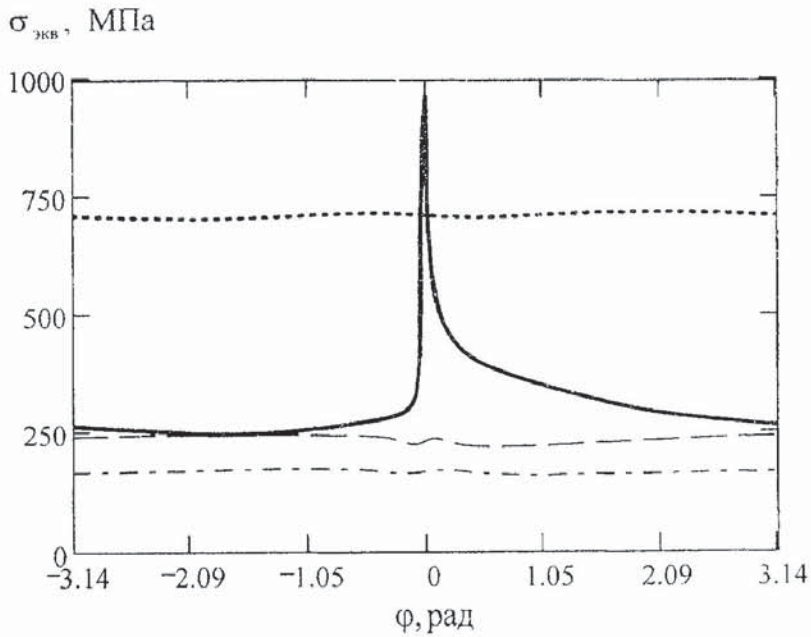


Рис. 1. Зависимость эквивалентных напряжений от угловой координаты.

..... — $r = 1$; — · — · —
 $r = 0,8$; — — — — —
 $r = 0,6$; · · · · · —
 $r = r_1 = 0,2$

На рис. 2 представлены результаты вычислений эквивалентных напряжений в роликах для разных марок сталей.

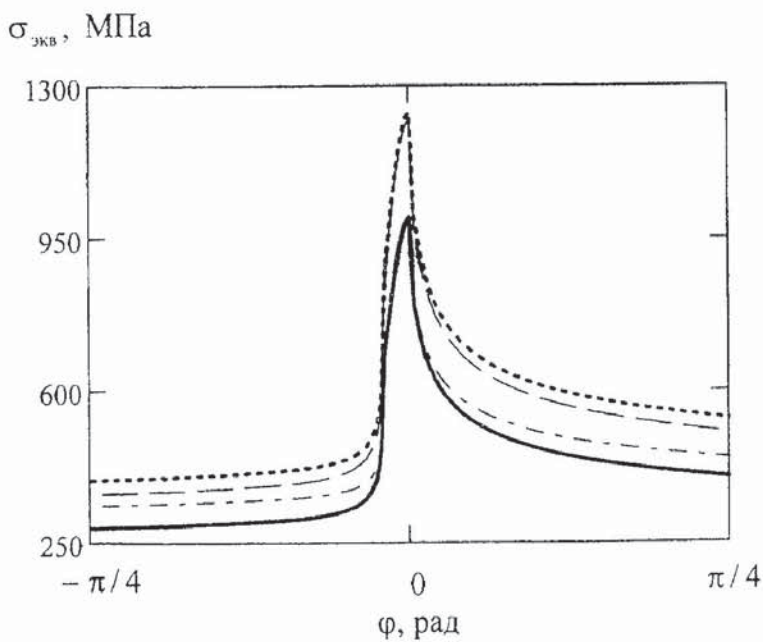


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в сечении ($\varphi = 0$) ролика из стали:

..... — 15Х1М1Ф. — · — · —
 30Х13. · · · · · — 34ХН1М. — — — — —
 25Х1МФ.

Наибольшие максимальные значения эквивалентных напряжений достигаются в ролике из стали 34ХН1М, наименьшие — в ролике из стали 30Х13 (несмотря на то, что ролик из стали 30Х13

имеет наибольшую температуру поверхности). Величина $\sigma_{\text{экв}}$ превышает предел текучести во внешних поверхностных слоях глубиной 4 мм, что в 2 раза меньше чем для ролика из стали 15Х1М1Ф.

ВЫВОДЫ

Расчеты температурных напряжений роликов МНЛЗ с внутренним охлаждением показывают, что напряжения могут превышать предел текучести в поверхностных слоях ролика в зоне его контакта со слитком. Напряжения в роликах из стали 30Х13 и 15Х1М1Ф меньше, чем в роликах из стали 34ХН1М и 25Х1МФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летавин М.И., Шестаков Н.И. Решение уравнений термоупругости в сечении вращающегося цилиндра методом сингулярных возмущений. – ПММ, 1993. Т. 57. Вып. 2. С. 124 – 132.
2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – Киев: Наукова думка, 1970. – 303 с.