

Экспериментально-теоретические исследования теплового и термонапряженного состояния непрерывнолитых заготовок при нагреве в печах современных конструкций

Тимошпольский В.И., Ратников П.Э., Грибок Д.К., Савань П.Н.
Белорусский национальный технический университет

Исследование процесса нагрева слитков и заготовок в промышленных печах современных конструкций представляет собой сложную задачу. В связи с этим был применен системный подход, который включает экспериментальные исследования, разработку математических методов, идентификацию решения и в дальнейшем разработку рациональных теплотехнологий. В соответствии с системным подходом в условиях РУП «БМЗ» проведены экспериментальные исследования по изучению динамики нагрева заготовок сечением 250×300 мм из стали ШХ15СГ в печи с шагающими балками стана 850 [1].

В ходе эксперимента установлено, что произошло разрушение непрерывнолитой заготовки, свидетельствующее о превышении термическими напряжениями предела прочности. Это приводит к необходимости расчета термонапряженного состояния металла. Для решения данной задачи разработаны теоретические методы расчета полей температур и напряжений в заготовках при нагреве в печах современных конструкций [2,3]. Математическая модель нагрева имеет вид:

$$a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} \right] = \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x_i} \right|_{x_i=H} = \alpha [T_r(t) - T(x_1, x_2, t)] \Big|_{x_i=H_i}; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x_i} \right|_{x_i=0} = 0; \quad (2)$$

$$V_r(\tau) c_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \alpha(t) [T_r(t) - \bar{T}_n(t)] 2A - c_r (T_{гор} - T_r(t)) \left| \frac{dV(\tau)}{dt} \right|; \quad (3)$$

$$T(x_1, x_2, 0) = T' = T_0 = \text{const}; \quad T_r(0) = T_r'' = \text{const}, \quad (4)$$

где $A = 2LH$ – площадь боковой стороны поверхности призмы; L – длина заготовки; T' , T_r'' – температура тела на входе и газа на выходе из методической зоны, $T_{гор}$ – температура горения топлива, $V_r(\tau)$ – объемный расход газа на 1 заготовку,

выражение (3) представляет собой условие теплового баланса в интегральной форме, где $\bar{T}_n(t)$ – среднеинтегральная по периметру температура поверхности; $\alpha(t)$ – изменяющийся во времени приведенный суммарный коэффициент теплоотдачи.

Решение задачи (1)...(4) в безразмерном виде:

$$\theta_2(\xi_1, \xi_2, \tau) = \theta_r(\tau) - \frac{f_2(\tau)}{2} \left[\frac{2 + \text{Bi}(\tau)}{\text{Bi}(\tau)} - \frac{\xi_1^2 + \xi_2^2}{2} \right] - \frac{\text{Bi}(\tau)}{2\Phi(\tau)} \left[\frac{(2 + \text{Bi}(\tau)) [\text{ch}(\mu(\tau)\xi_1) + \text{ch}(\mu(\tau)\xi_2)]}{\text{Bi}(\tau)} - \xi_1^2 \text{ch}(\mu(\tau)\xi_2) + \xi_2^2 \text{ch}(\mu(\tau)\xi_1) \right], \quad (5)$$

$$\theta_r(\tau) = 1 + \int_{\tau_0}^{\tau} f_2(\eta) \Psi(\eta) d\eta,$$

$$\Psi(\tau) = \frac{\text{Bi}(\tau) N(\tau)}{2} \left[\frac{(6 + \text{Bi}(\tau))}{3\text{Bi}(\tau)} - \frac{\mu(\tau) \text{ch}(\mu(\tau)) (5 + 3\text{Bi}(\tau)) + 6\text{sh}(\mu(\tau))}{6\mu(\tau) [\text{Bi}(\tau) \text{ch}(\mu(\tau)) + \mu(\tau) \text{sh}(\mu(\tau))]} \right], \quad (6)$$

Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 4 % (рис. 1), что говорит об адекватности предложенной математической модели.

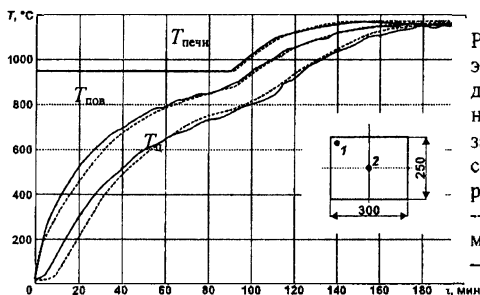


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных по нагреву непрерывнолитой заготовки 250×300 мм из стали ШХ15СГ с расчетными данными: -- результаты моделирования; — эксперимент

При решении задачи термоупругости в качестве исходных данных использовались результаты, полученные на предыдущем этапе. Математическая модель задачи термоупругости имеет вид:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = (1 + \nu)(1 - \nu) \alpha_T T(x, y, \tau); \quad (7)$$

$$\nabla^2 \nabla^2 \Psi = \frac{\partial^4 \Psi}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 \Psi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Psi}{\partial y^4} = 0. \quad (8)$$

где α_T и ν – соответственно коэффициенты температурного расширения и Пуассона.

Температурные напряжения определены через термоупругий потенциал Φ и функцию Эри Ψ следующим образом:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2(2E\Phi - \Psi)}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = -\frac{\partial^2(2E\Phi - \Psi)}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = \frac{\partial^2(2E\Phi - \Psi)}{\partial x \partial y}; \quad (9)$$

$$\sigma_z = \left[\frac{1}{H} \int_0^H \int_0^H T(x, y, \tau) dx dy - T(x, y, \tau) \right] - \nu \left[\frac{1}{H} \int_0^H \int_0^H \nabla^2 \Psi dx dy - \nabla^2 \Psi \right]. \quad (10)$$

При этом решение данной системы уравнений должно удовлетворять однородным граничным условиям

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=\pm H} = 0; \quad \sigma_y(x, y, \tau)|_{y=\pm H} = 0; \quad \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=\pm H} = \tau_{yx}(x, y, \tau)|_{y=\pm H} = 0. \quad (11)$$

Решение задачи в безразмерной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_x} &= \frac{\partial^2(\varphi - \psi)}{\partial \xi_2^2} = -(30f\xi_2^4 + g(2\xi_1^4 + 12\xi_1^2\xi_2^2) + (k-e)2 + 12\xi_2^2(h-c) + 2s\xi_1^2) + \\ &+ a[\mu^2(\tau)\text{ch}(\mu(\tau)\xi_2)\xi_1^2 + 2\text{ch}(\mu(\tau)\xi_1)] + b[\mu^2(\tau)\text{ch}(\mu(\tau)\xi_2)\xi_1^4 + 12\text{ch}(\mu(\tau)\xi_1)]; \\ \overline{\sigma_y} &= \frac{\partial^2(\varphi - \psi)}{\partial \xi_1^2} = -(30f\xi_1^4 + g(2\xi_2^4 + 12\xi_1^2\xi_2^2) + (k-e)2 + 12\xi_1^2(h-c) + 2s\xi_2^2) + \\ &+ a[\mu^2(\tau)\text{ch}(\mu(\tau)\xi_1)\xi_2^2 + 2\text{ch}(\mu(\tau)\xi_2)] + b[\mu^2(\tau)\text{ch}(\mu(\tau)\xi_1)\xi_2^4 + 12\text{ch}(\mu(\tau)\xi_2)]; \\ \overline{\tau_{xy}} &= \frac{\partial^2(\varphi - \psi)}{\partial \xi_1 \partial \xi_2} = -(8g\xi_1\xi_2^3 + 8g\xi_2\xi_1^3 + 4s\xi_1\xi_2) + a[2\mu(\tau)\text{sh}(\mu(\tau)\xi_2)\xi_1 + 2\mu(\tau)\xi_2\text{sh}(\mu(\tau)\xi_1)] + \\ &+ b[4\mu(\tau)\text{sh}(\mu(\tau)\xi_2)\xi_1^3 + 4\mu(\tau)\text{sh}(\mu(\tau)\xi_1)\xi_2^3]; \quad (12) \\ \overline{\sigma_z} &= \left[\int_0^1 \int_0^1 \mu(\xi_1, \xi_2, \tau) d\xi_1 d\xi_2 - u(\xi_1, \xi_2, \tau) \right] - \nu \left[\int_0^1 \int_0^1 \nabla^2 \Psi(\xi_1, \xi_2, \tau) d\xi_1 d\xi_2 - \nabla^2 \Psi(\xi_1, \xi_2, \tau) \right] = \\ &= \frac{f_2(\tau)}{2} \left\{ \frac{1}{3} - \frac{\xi_1^2 + \xi_2^2}{2} - \frac{(2 + \text{Bi}(\tau))}{Z(\tau)} \left[\text{ch}(\mu(\tau)\xi_2) + \text{ch}(\mu(\tau)\xi_1) \right] - \frac{2\text{sh}(\mu(\tau))}{\mu(\tau)} \right\} - \\ &- \frac{\text{Bi}(\tau)}{Z(\tau)} \left[\xi_1^2 \text{ch}(\mu(\tau)\xi_2) + \xi_2^2 \text{ch}(\mu(\tau)\xi_1) - \frac{2\text{sh}(\mu(\tau))}{3\mu(\tau)} \right] - \nu \left\{ f \left(\frac{2}{7} - \xi_1^6 - \xi_2^6 \right) + g \left(\frac{2}{15} - \xi_1^2 \xi_2^4 - \xi_1^4 \xi_2^2 \right) \right. \\ &\left. + h \left(\frac{2}{3} - \xi_1^4 - \xi_2^4 \right) + k \left(\frac{2}{3} - \xi_1^2 - \xi_2^2 \right) + s \left(\frac{1}{9} - \xi_1^2 \xi_2^2 \right) \right\}. \quad (13) \end{aligned}$$

Полученные решения были использованы для разработки рациональных теплотехнологических режимов нагрева

непрерывнолитых заготовок в нагревательных печах с механизированным подом РУП «Белорусский металлургический завод».

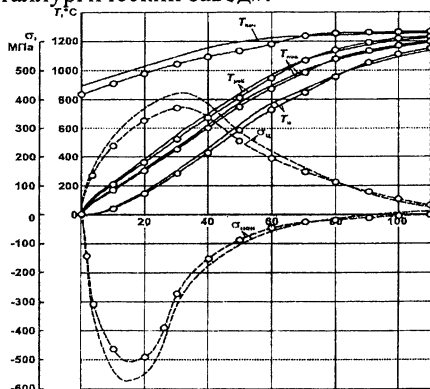


Рис. 2. Сравнение температур в характерных точках сечения заготовки размером 250x300 мм марки ст. 3 при нагреве в печи стана 850 по заводскому (—) и предлагаемому (—○—) режимам и величин возникающих термонапряжений по заводскому (-----) и предлагаемому (---○---) режимам.

Рациональный режим нагрева заготовок в печи стана 850 РУП «БМЗ» (на примере стали Ст. 3) приведен на рис. 2 и предполагает снижение температуры печи в методической и первой сварочной зонах и повышение во второй сварочной. Внедрение нового режима позволило снизить удельный расход условного топлива на 1,3 кг.у.т/т, производительность повышена на 9 % по сравнению с заводским режимом.

Литература

1. Новые экспериментальные исследования процессов нагрева металла в печах с механизированным подом РУП «БМЗ» / В.И. Тимошпольский, И.А.Трусова, П.Э.Ратников // Литье и металлургия.- 2002.- № 4.- С.148-154.
2. Тимошпольский, В.И., Постольник, Ю.С., Андрианов, Д.Н. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии. – Минск. «Бел. Наука», 2005 г. – 560 с.
3. Тепловой и термомеханический расчет нагрева массивных слитков и заготовок в противоточном режиме./ Ю.С. Постольник, П.Э. Ратников и др. // Литье и металлургия. – 2003. – № 3. – С.165-170.