

Исследование влияния величины коэффициента линейного расширения на величину максимальных термических напряжений в стопоре-моноблоке

Н. Д. Морозкин, В. И. Ткачев*

Башкирский государственный университет

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, улица Заки Валиди, 32.

**Email: tvi-vlad@mail.ru*

Исследуются процессы теплообмена и динамические термонапряжения в керамических изделиях произвольной геометрической формы методом конечных элементов. Предлагается подход для определения диапазона значений коэффициента линейного расширения материала, в пределах которого при заданных условиях теплообмена не происходит разрушения изделия.

Ключевые слова: температурное поле, термические напряжения, теплообмен, коэффициент линейного расширения, метод конечных элементов.

Эксплуатация огнеупорных керамических изделий очень часто связана с их интенсивным теплообменом, поэтому приходится учитывать ограничения на термонапряжения, которые обычно являются причиной сильных деформаций или даже разрушений. В подавляющем большинстве работ по исследованию термонапряжений описываются методы расчета для областей простой формы. Несмотря на практическую важность, задачи исследования термических напряжений в областях сложной геометрической формы остаются недостаточно изученными.

На примере сборного стопора-моноблока машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) исследована динамика температурного поля и термических напряжений. Рассматривается начальный этап работы МНЛЗ, с момента слива расплавленной стали в промежуточный ковш. В течение рассмотренного отрезка времени сборный стопор закрывает сталеразливочный стакан и полностью погружен в расплавленный металл. При исследовании теплообмена стопора учитывается контакт пробки с металлическим стержнем, а также нижней частью стопорной трубки. Поскольку диаметр стержня меньше отверстия в трубках считаем, что в трубках находится только воздух. Принято допущение, что температура воздуха внутри пробки, трубки и полого металлического стержня изменяется равномерно.

Пусть $\Omega \subset R^3$ – осесимметричная область с границей $\Gamma \subseteq \partial\Omega$,

$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5 \cup \Gamma_6 \cup \Gamma_7 \cup \Gamma_8 \cup \Gamma_9 \cup \Gamma_{10} \cup \Gamma_{11}$, $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4 \cup \Omega_5 \cup \Omega_6$ (рис 1).

Распределение температуры $T(r, z, t)$ в области Ω описывается уравнением

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), s = \text{к, с},$$

где точка $(r, z) \in \Omega$, $t \in [0, \bar{T}]$, ρ_s – плотность материала изделия, c_s – теплоемкость изделия, λ_s – коэффициент теплопроводности материала изделия, к – керамика, с – сталь.

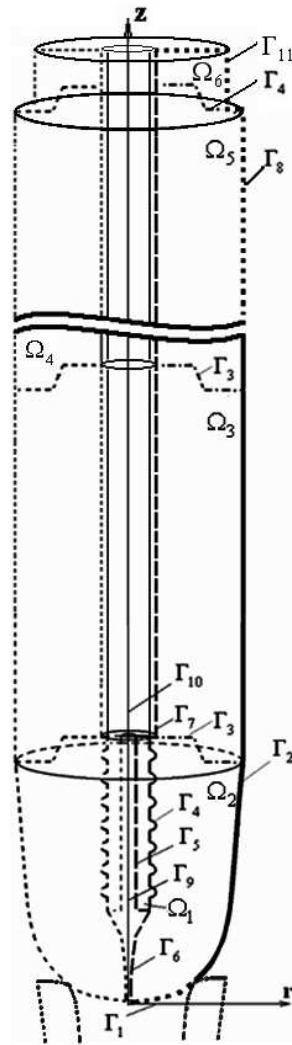


Рис. 1. Осесимметричная модель сборного стопора.

Начальные условия имеют вид

$$T(r, z, t)|_{t=0} = T_0,$$

а условия на границе

$$\lambda_k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_B (T - T_B), \lambda_k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_M (T - T_M), \lambda_k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \lambda_k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3},$$

$$\lambda_c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_4} = \lambda_k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_4}, \lambda_c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_5} = \alpha_{\text{вп}} (T - T_{\text{вп}}), \lambda_k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_6} = \alpha_{\text{вп}} (T - T_{\text{вп}}),$$

$$\lambda_{\kappa} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_7} = \alpha_{\text{вт}} (T - T_{\text{вт}}), \quad \lambda_{\kappa} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_8} = \alpha_{\text{ик}} (T - T_{\text{вс}}), \quad \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_9} = \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{10}} = 0,$$

$$\lambda_{\text{с}} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{11}} = \alpha_{\text{ик}} (T - T_{\text{вс}}).$$

здесь $\alpha_{\text{м}}$ – коэффициент теплообмена с металлом, $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплообмена с воздухом в сталеразливочном стакане, $\alpha_{\text{вп}}$ – коэффициент теплообмена с воздухом внутри полого стержня и пробки, $\alpha_{\text{вт}}$ – коэффициент теплообмена внутри трубки, $T_{\text{м}}$ – температура расплавленного металла, $T_{\text{в}}$ – температура воздуха в сталеразливочном стакане, $T_{\text{вп}}$ – температура воздуха внутри полого стержня и пробки, $T_{\text{вт}}$ – температура воздуха внутри трубок, n – вектор внешней нормали к границе области.

Изменение температуры воздуха внутри пробки и стопорных трубок описывается уравнением теплопроводности в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} T_{\text{в}}(r, z, t) dV = \int_{\bar{\Gamma}} \lambda_{\text{в}} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} d\bar{\Gamma},$$

где $V = V_{\text{п}}, V_{\text{т}}$, $\bar{\Gamma} = \Gamma_5 \cup \Gamma_6 \cup \Gamma_9, \Gamma_7 \cup \Gamma_{10}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воздуха, $V_{\text{п}}$ – воздух в пробке, $V_{\text{т}}$ – воздух в стопорных трубках, $\Gamma_5 \cup \Gamma_6 \cup \Gamma_9$ – внутренняя поверхность пробки, $\Gamma_7 \cup \Gamma_{10}$ – внутренняя поверхность стопорных трубок.

Напряженное состояние в области Ω описывается следующей системой уравнений равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zr}}{r} = 0, \end{cases}$$

здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, $i, j = r, z, \theta$. Граничные условия для уравнения термоупругости в рассматриваемом случае примут вид

$$\begin{cases} \sigma_{rr} n_r + \sigma_{rz} n_z = 0, \\ \sigma_{zr} n_r + \sigma_{zz} n_z = 0, \end{cases}$$

где n_r, n_z – направляющие косинусы внешней нормали к границе Γ .

Коэффициенты теплообмена между металлом и поверхностью керамического изделия рассчитывались аналогично работам [1, 2].

Для проведения расчетов построена осесимметричная КЭ модель стопора, состоящая из 10277 треугольных элементов и 5524 узлов.

В расчетах полагаем, что температура стопора в начальный момент времени равна $T_0 = 950$ °С, которую он имеет после предварительного разогрева, расплавленный металл поступает в промежуточный ковш при температуре $T_m = 1500$ °С, температуру воздуха внутри сталеразливочного стакана задаем равной $T_b = 950$ °С. Механические и теплофизические характеристики материала полагаем постоянными. В начальный момент времени температура сборного стопора равномерна по всему объему.

На *рис. 2* представлена динамика максимальных растягивающих термических напряжений в стопоре при заданных условиях.

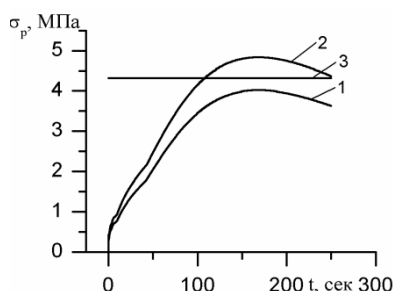


Рис. 2. Динамика максимальных растягивающих термонапряжений при $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/К (1) и $\alpha_T = 1,4 \cdot 10^{-6}$ 1/К (2), предел прочности на растяжение (3).

С помощью представленной выше математической модели проведен анализ максимальных термонапряжений для значений коэффициента линейного расширения из диапазона $2 \cdot 10^{-7} \leq \alpha_T \leq 1,6 \cdot 10^{-6}$, установлено, что при заданных условиях теплообмена растягивающие термические напряжения не превышают предел прочности, если значение коэффициента входит в диапазон $2 \cdot 10^{-7} \leq \alpha_T \leq 1,32 \cdot 10^{-6}$ (*рис. 3*). Также получена динамика максимальной и минимальной температуры стопора в рассмотренном отрезке времени.

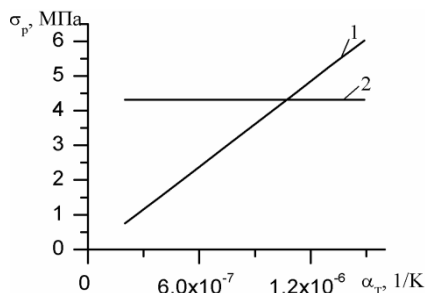


Рис. 3. Зависимость максимальных растягивающих термических напряжений от коэффициента термического расширения (1), предел прочности материала на растяжение (2).

На основе проведенных расчетов установлено, что к разрушению стопора приводят растягивающие термонапряжения. Наибольшие растягивающие термонапряжения возникают в нижней части стопора и на резьбе. На практике зачастую именно отколы нижней части стопора нарушают работу стопорного механизма.

Литература

1. Морозкин Н. Д., Ткачев В. И. Исследование нагрева тел сложной геометрической формы с учетом ограничений на термонапряжения в зависимости от коэффициента линейного расширения/ Морозкин Н. Д., Ткачев В. И. //Вестник башкирского университета. – 2017. – №2. – С. 303–308.
2. Морозкин Н. Д., Ткачев В. И., Чудинов В. В. Влияние коэффициента теплового расширения на термоупругие напряжения в керамической пробке. / Морозкин Н. Д., Ткачев В. И., Чудинов В. В. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. №9. С.103–107.

Study the effect of the coefficient of linear expansion by the maximum thermal stresses in the stopper

N. D. Morozkin, V. I. Tkachev*

Bashkir State University

32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

**Email: tvi-vlad@mail.ru*

The processes of heat transfer and dynamic thermal stresses in ceramics arbitrary geometrical shape by the finite element method is researched. The approach to the determination of the material linear expansion coefficient range values, in which limits under predetermined conditions, no destruction of the product occurs is proposed.

Keywords: temperature field, thermal stresses, heat exchanging, coefficient of linear expansion, finite element method.