УДК 669.1

Н.И. Шестаков, Ю.В. Антонова, А.И. Фоменко, М.И. Летавин

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛЬНОГО ПОДА МЕТОДИЧЕСКОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ТОЛКАТЕЛЬНОГО ТИПА

На основе математического моделирования исследовано влияние конструктивных характеристик канального пода методической нагревательной печи толкательного типа на величину термического сопротивления.

Печь, под, температура, термическое сопротивление.

The influence of design characteristics of the channel hearth of the heating furnace of the push-rod type on the value of thermal resistance is investigated in the paper on the basis of mathematical simulation.

Furnace, hearth, temperature, thermal resistance.

Для усиления теплопередачи излучением от поверхности канала и теплоносителя к поду, расположенному над каналами, предполагается формировать канал частью цилиндрической поверхности основания и нижней поверхности подовой плиты. В этом случае поперечное сечение канала имеет форму сегмента с постоянным радиусом. Технология кладки предполагает использование корундовых блоков, одна из поверхностей которых имеет цилиндрическую форму. При соединении блоков образуется целостная система каналов.

Теплообмен в нагреваемой заготовке, покрытой растущим слоем окалины, опишется уравнением:

$$c_j(T)\rho_j(T)\upsilon\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_j(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_j(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right],\quad i=0,2, \qquad (1)$$

где c – удельная массовая теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; υ – скорость движения заготовки в печи; x, y, z – текущие координаты. Индекс 0 относится к окалине, 2 – к металлу заготовки.

Условия сопряжения металла и окалины опишутся дифференциальным уравнением теплового баланса на границе областей 0 и 2. Для верха и низа заготовки эти уравнения принимают вид:

$$r_0\rho_0\upsilon\frac{dh_0}{dy}=\lambda_0\frac{\partial T_0}{\partial x}\Big/_{x=h_0-0}-\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big/_{x=h_0+0}=$$
$$=\lambda_2\frac{\partial T}{\partial x}\Big/_{x=h_2-h_0-0}-\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\Big/_{x=h_2-h_0+0} \qquad (2)$$

где r – удельная теплота окалинообразования; h_2 – толщина заготовки; h_0 – толщина слоя окалины.

Рост окалины описывается законом Вагнера [1], который в данном случае будет представлен следующим образом:

$$\upsilon\frac{d(h_0)^2}{dy}=K_0\exp\left[-\alpha\Big/(\gamma y+\beta)\right], \qquad (3)$$

где K_0, α, γ – эмпирические коэффициенты; β – масштаб связи температурных шкал, $\beta = 273$ K.

На основе обработки результатов натуральных замеров установлено: $\alpha = 18000\ \text{K}^{-1}, \gamma = 60$ K/м, $K_0 = 7{,}926\cdot10^{-2}\upsilon$.

Температурное поле пода печи описывается уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 T_i(x,z)=0,\ i=3,4,6,... \qquad (4)$$

Здесь индекс i относится к соответствующему слою пода.

Закономерность изменения температуры дымовых газов по длине канала характеризуется уравнением теплового баланса:

$$\frac{dT_5}{dy}=\frac{S}{RC_5\rho_5G_5}\left[T_{4г}(y)-T_{3г}(y)\right], \qquad (5)$$

где R – термическое сопротивление пода; S – шаг расположения каналов; G – расход газов. Индекс 5 относится к дымовому газу в канале.

Начальные условия для заготовки запишутся в виде:

$$T_i(x,o,z)=T_H,\ i=0,2, \qquad (6)$$

где T_H – температура загрузки заготовки.

Граничные условия можно представить уравнением:

$$-\lambda_0(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial x}\Big/_{x=0}=q_{1-0}\left[T_1(y,z),T_0(x=o,y,z)\right]; \qquad (7)$$

$$\lambda_0(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial x}\Big/_{x=h_2+2h_0}=$$
$$=q_{0-5}\left[T_5(y),T_0(x=h_2+2h_0,y,z)\right], \qquad (8)$$

где q_{1-0}, q_{0-5} – плотность теплового потока на верхней и нижней поверхности окалины. Индекс 1 относится к рабочему пространству печи.

Плотность теплового потока q_{1-0} учитывает конвекцию и излучение. Величина q_{0-5} рассчитывается на основе решения уравнений (4) и (5) при условии конвективно-лучистого теплообмена между стенкой канала и движущимся в нем дымовым газом. Система дифференциальных уравнений (1) – (5) с условиями однозначности (6) – (8) решается численными методами.

В [2] дано приближенное аналитическое решение уравнения Лапласа для геометрически сложенной области, какой является канальный под в его поперечном сечении. Несомненное достоинство аналитического метода решения заключается в простоте полученных соотношений, которым весьма удобно пользоваться в инженерных расчетах. Другим преимуществом полученного решения является возможность определения термического сопротивления канального пода при любых фиксированных значениях его конструктивных и теплофизических характеристик.

Однако в силу принятых допущений, аналитическое решение может приводить к определенным погрешностям в расчете термосопротивления. В этой связи ставится задача получить решение уравнения Лапласа при граничных условиях [2] численными методами в соответствии с отдельно фиксированными значениями конструктивных характеристик канального пода. Тогда расчетная зависимость [2] примет вид:

$$R = \frac{T_3 - T_2}{\frac{\lambda}{L}\int_0^L \frac{\partial T}{\partial x}\Big/_{x=0} dz}.$$

Введем обозначение:

$$A = R \cdot \lambda,$$

где A – условная длина участка термосопротивления, м.

Тогда рабочая формула для обработки результатов численного решения запишется в форме:

$$A = L\left(T_3 - T_2\right)\Big/\left[\int_0^L \frac{\partial T}{\partial x}\Big/_{x=0} dz\right],$$

а величина термического сопротивления в соответствии найдется их соотношения $R = A/\lambda$. Расчетная схема приведена на рис. 1.

Система дифференциальных уравнений (1) – (5) с условиями однозначности (6) – (8) решается численными методами.

Известные расчетные зависимости могут быть использованы для вычисления термического сопротивления пода, оснащенного прямоугольными или цилиндрическими каналами. В этой связи представляет интерес получение соотношений, пригодных для вычисления термического сопротивления пода, оснащенного сегментообразными каналами.

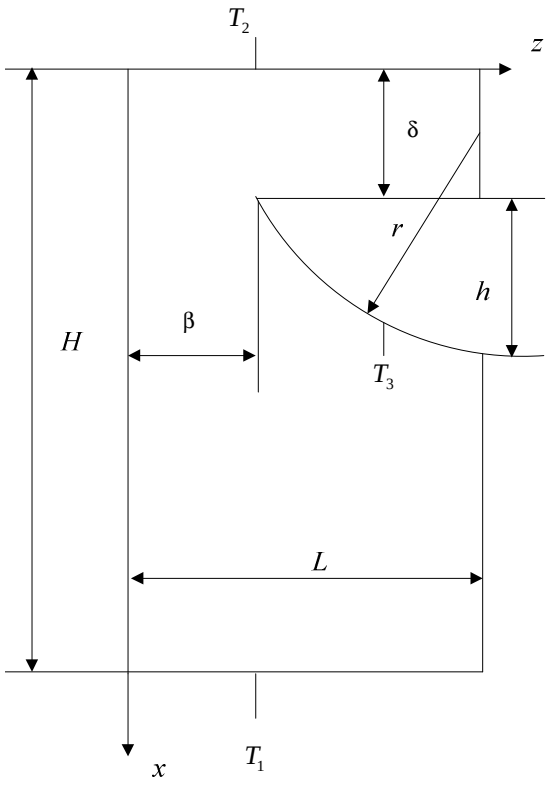


Рис. 1. Расчетная схема

Температурное поле канального пода в его поперечном сечении при квазистационарном режиме печи описывается уравнением Лапласа (4).

Граничные условия для (4) в данном случае имеют вид:

$$T\left(H, z\right) = T_1, T\left(0, z\right) = T_2, T\left(x_к, z_к\right) = T_3; \qquad (9)$$

$$\frac{\partial T\left(x, o\right)}{\partial z} = \frac{\partial T\left(x, L\right)}{\partial z} = 0, \qquad (10)$$

где H – полная высота пода печи (рис. 1); x_k, z_k – координаты расположения поверхности каналов; L – половина шага расположения каналов.

В записи граничных условий первого рода (9) принято допущение о неизменности температуры по периметру поверхности теплообмена. Граничные условия второго рода (10) следуют из условий симметрии рассматриваемой фигуры.

Задача заключается в поиске функции:

$$R = f\left(\lambda, \delta, r, h, L\right),$$

где R – термическое сопротивление пода; λ – коэффициент теплопроводности материала.

Сопоставление результатов аналитического и численного решения показывает, что величины термического сопротивления, определенные по двум методам, при небольших значениях параметра A практически совпадают. При $\frac{\beta}{L} > 0{,}8$ разница в расчете может достичь 15 – 20 %.

На рис. 2 показано влияние размеров каналов r и глубины их заложения δ на величину параметра A. Из рассмотрения кривых следует, что при небольшой глубине заложения каналов и шага их расположения A мало зависит от радиуса канала в случае $r > 0,04$ м. Однако с уменьшением радиуса канала за пределы 0,01 м термическое сопротивление пода резко возрастает и при $r \to 0$ величина $A \to \infty$. При значительной глубине заложения каналов $(\delta > 0,3\text{ м})$ термическое сопротивление пода существенно зависит от радиуса каналов во всем исследованном диапазоне.

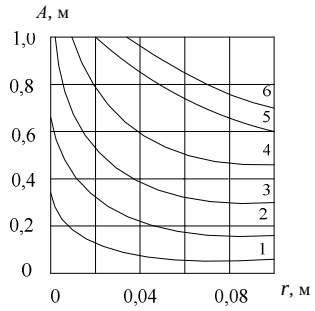


Рис. 2. Влияние радиуса канала на величину термического сопротивления пода при высоте каналов 0,25 r и шаге их расположения 0,2 м:

$1-\delta = 0,05;\ 2-0,15;\ 3-0,25;\ 4-0,35;\ 5-0,45;\ 6-0,50$ м

Влияние шага расположения каналов при различной их форме (соотношение h и r) на величину параметра A отражено на рис. 3. Из анализа графика следует, что шаг расположения каналов оказывает определяющее влияние на величину термического сопротивления пода при любом соотношении параметров r и h. От формы же каналов термическим сопротивление пода зависит в меньшей степени. Наибольшим термическим сопротивлением обладает под, оснащенный круглыми каналами $(h = 2r)$. С приданием каналу сегментной формы термическое сопротивление пода снижается. Однако при $h < 0,5$ термосопротивление остается практически неизменным.

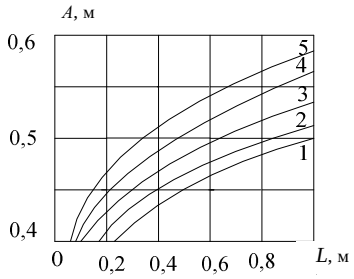


Рис. 3. Влияние радиуса канала на величину термического сопротивления пода при глубине заложения каналов 0,25 м и их радиусе 0,08 м:

$1-h = 0,25;\ 2-0,5;\ 3-1,0;\ 4-1,5;\ 5-2r$ (круглый канал)

Таким образом, путем математического моделирования исследовано влияние конструктивных параметров канального пода формы каналов, шага их расположения и глубины заложения на величину термического сопротивления тепловому потоку в пределах участка поверхность канала (рабочей поверхности пода). На основе численного решения разработанной математической модели установлена связь между всеми конструктивными, теплофизическими и технологическими характеристиками печи, оснащенной канальным подом и зоной термостатирования. Замкнутость связи обеспечивается дополнением результатов численного решения математической модели данными, полученными при аналитическом или численном решении уравнения Лапласа. Установленная функциональная связь может быть использована для расчета любых из включенных в нее параметров при условии, что все остальные известны или заданы. Например, при проектном расчете могут быть найдены размеры каналов, глубина их заложения и шаг расположения, а также длина зоны нагрева для заданной производительности. При разработке режимов работы уже существующей печи можно найти оптимальную температуру газов в каналах и в рабочем пространстве печи при известном расходе газов и производительности нагрева. Кроме того, полученные результаты могут использоваться для анализа взаимосвязи отдельных параметров печи.

Литература

1. *Рыжов, А.Ф.* Теоретическое определение угара при нагреве слитков в нагревательных колодцах / А.Ф. Рыжов, А.Н. Минаев, Н.П. Свинолобов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 8. – С. 113 – 117.

2. *Шестаков, Н.И.* Инженерная методика расчета термосопротивления канального пода методической нагревательной печи толкательного типа / Н.И. Шестаков, М.И. Летавин, А.И. Фоменко // Вестник ЧГУ. – 2011. – № 4. – Т. 3. – С. 28 – 31.

УДК 669.02/09

Н.И. Шестаков, Н.К. Лопатина, А.И. Фоменко, Н.Г. Колбасников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БАНДАЖИРОВАННЫХ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

На основе математического моделирования исследовано влияние конструктивных характеристик бандажа и режимов термоструктурной обработки на величину усадки колец.