УДК 621.536.24 (076.1)

П.С.ЧЕСНОКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова (технический университет)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ КОЛЬЦЕВОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР ЗОНЫ НАГРЕВА

Рассмотрено устройство агрегата непрерывного нагрева, представлена техническая характеристика агрегата и термической части агрегата, описание конструкции и работы термической части агрегата. Для повышения теплофизических характеристик процесса нагрева медных слитков в агрегате непрерывного нагрева разработан состав футеровки печи. Определены эквивалентные коэффициенты теплопроводности, плотности теплового потока, тепловой поток через поверхность футеровки агрегата и выбраны новые материалы слоев футеровки.

Приведены теплофизические характеристики основных огнеупорных и изоляционных материалов.

Доказано, что использование новых материалов слоев футеровки печи вместо существующих приводит к значительному экономическому эффекту.

The construction of unceasing warm unit is considered in this article, the technical feature of the unit and a thermal part of the unit are given too. In order to increase heating physics features of heating process of copper ingots in the unit, the structure of a stove has been developed. The equivalent factors of warmth conduction, density of heat flow, heat flow through the surface of the unit compound have been determined and new material of compound layers have been selected.

The heating physics features of the main refractory and insulating materials are given.

It is proved that using the new material of compound layers of stoves instead of havens leads to significant economic effect.

Кольцевые нагревательные печи предназначены для нагрева слитков из меди и сплавов на медной основе перед горячей прокаткой на стане ДУО-850. Нагрев слитков осуществляется продуктами горения природного газа, сжигаемого с помощью двухпроводных горелок ГНП-5 и ГНП-6.

Печи имеют по две тепловые зоны, имеющие самостоятельную регулировку подачи природного газа и воздуха: первая – зона окончательного нагрева и выравнивания температур по сечению слитка; вторая – зона предварительного нагрева

Печь имеет кольцевую форму, под печи – поворотный, привод пода – односторонний, электрический. Электродвигатель через редуктор передает вращение на венечную шестерню подины.

Подина вращается на опорных роликах, центрируется с помощью стойки, установленной в центре внутреннего столба печи.

Герметизация вращающегося пода печи достигается с помощью гидрозатвора. Подъемная заслонка рабочего окна также выполнена водоохлаждаемой. На печи используется водооборотная вода.

Кладка пода, стен и свода печи выполнена из огнеупорного шамотного кирпича ША1. Для стен применяется прямой кирпич, для свода – клиновой. Кладка вращающейся подины выполнена из шамотного кирпича, изолированного диатомитом марки 500.

Вся кладка печи, кроме свода, заключена в металлический кожух [2].

За исходное расчетное уравнение принимаем дифференциальное уравнение теп-

лопроводности в соответствии с законом Фурье. В основу вывода уравнения теплопроводности положен закон сохранения энергии [3].

Для нахождения составляющих уравнения выделим в теле элементарный параллелепипед (см. рисунок) со сторонами d_x, d_y, d_z. Параллелепипед расположен так, чтобы его грани были параллельны соответствующим координатным плоскостям. Количество теплоты, которое подводится к граням элементарного объема за время dx в направлении осей Q_x, Q_y, Q_z, обозначим соответственно dQ_x, dQ_y, dQ_z [1]. Количество теплоты, которое будет отводиться через противоположные грани в тех же направлениях, обозначим соответственно dQ_{x+dx}, dQ_{y+dy}, dQ_{z+dz}.

Дифференциальное уравнение теплопроводности в случае нестационарного режима принимает вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\nabla^2 t,$$

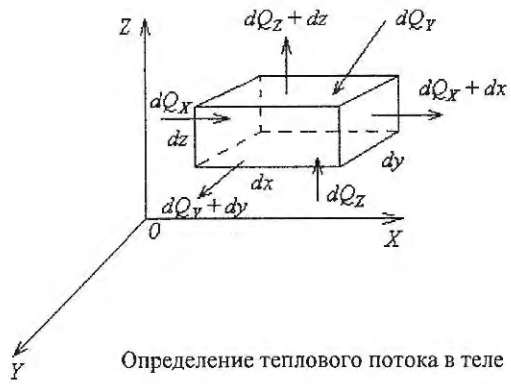
где a – коэффициент температуропроводности, м^2/с, $a = c\rho/\lambda$; c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплоемкости; ∇ – оператор Лапласа, $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$.

При установившемся, или стационарном, тепловом режиме температура тела во времени остается постоянной, т.е. $\partial t/\partial \tau = 0$. При этом дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь вид

$$a\nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho} = 0$$

или

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0.$$



Определение теплового потока в теле

Если внутренние источники отсутствуют ($q_v = 0$), то уравнение теплопроводности упростится и примет вид

$$\nabla^2 t = 0$$

или

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0,$$

так как $\partial t/\partial \tau = 0$, $a \neq 0$.

Рассмотрим теплопроводность многослойной плоской стенки зоны нагрева (зоны максимальных температур), состоящей из двух слоев. Примем, что контакт между слоями совершенный и температура на соприкасающихся поверхностях двух слоев одинакова.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности необходимо его дополнить условием однозначности 1-го рода, т.е. начальными значениями t на поверхности тела и геометрическими характеристиками тела.

При заданных температурах на внешних поверхностях стенки, размерах слоев и соответствующих коэффициентах теплопроводности можем составить систему уравнений

$$\left.\begin{aligned} \frac{\lambda_1}{\delta_1}(t_{c1} - t_{c2}); \\ q = \frac{\lambda_2}{\delta_2}(t_{c2} - t_{c3}). \end{aligned}\right\}$$

Определив температурные напоры в каждом слое и сложив правые и левые части полученных уравнений, будем иметь

$$t_{c1} - t_{c3} = q\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right).$$

Отсюда плотность теплового потока

$$q = (t_{c1} - t_{c3}) / \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right).$$

Величина $(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2)$, равная сумме термических сопротивлений двух слоев, называется полным термическим сопротивлением теплопроводности многослойной стенки.

При сравнении переноса теплоты через многослойную стенку и стенку из однородного материала удобно ввести в рассмотрение эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$ многослойной стенки. Он равен коэффициенту теплопроводности однородной стенки, толщина которой Δ равна толщине многослойной стенки $\sum_{i=1}^{i=2}\delta_i$, а термическое сопротивление равно термическому сопротивлению рассматриваемой многослойной стенки, т.е.

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=2}\delta_i}{\lambda_{экв}} = \sum_{i=1}^{i=2}\frac{\delta_i}{\lambda_i},$$

отсюда

$$\lambda_{экв} = \sum_{i=1}^{i=2}\delta_i \Big/ \sum_{i=1}^{i=2}\frac{\delta_i}{\lambda_i}.$$

Значением $\lambda_{экв}$ можно определить условия, при которых можно уменьшить потери в окружающую среду. Для выбора оптимального варианта футеровки произведем анализ теплофизических свойств материала [2] (см. таблицу).

Теплофизические характеристики материалов

Материал	λ, Вт/(м·К)	c, Дж/(кг·К)	ρ, кг/м³	Температура применения, °С
Шамот кирпичный	0,72	880	1800-1900	1350-1450
Красный кирпич	0,7	880	1700	900
Шамот легковес ШЛБ-0,4	0,116	960	400	1100
Корундовый легковесный КЛ-1,3	2,1	795	2700-2900	1500
Магнезит	6,28	1050	2600-2800	1580
Магнезито-хромит	4,1	920	2800-2900	>1500

Для нашего конкретного случая примем $\lambda = \text{const}$. Рассчитаем потери тепла для существующей конструкции футеровки и в соответствии с расчетами примем оптимальный тип футеровочного материала.

Подставим табличные значения коэффициента теплопроводности в формулу эквивалентного коэффициента теплопроводности. Получим для существующего варианта футеровки (1-й слой – шамот класса «А», 2-й слой – диатомит)

$$\lambda_{экв1} = 0{,}197 \text{ Вт/(м·К)},$$

для нового варианта футеровки (1-й слой – шамот кирпичный, 2-й слой – шамот легковес ШЛБ-0,4):

$$\lambda_{экв2} = 0{,}233 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Подставив полученные значения эквивалентного коэффициента теплопроводности в формулу для определения плотности теплового потока, получим

$$q_1 = (t_{c1} - t_{c3})/\lambda_{экв1} = 6081 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_2 = (t_{c1} - t_{c3})/\lambda_{экв2} = 5141 \text{ Вт/м}^2.$$

Тепловой поток $Q(N)$ через поверхность F твердой стенки

$$Q_1 = q_1(2F_{бок} + F_{куп} + F_{под}) = 1764 \text{ кВт};$$

$$Q_2 = q_2(2F_{бок} + F_{куп} + F_{под}) = 1491 \text{ кВт}.$$

Температура на границах соприкосновения двух соседних слоев

$$\left.\begin{aligned} t_{c2} &= t_{c1} - q\frac{\delta_1}{\lambda_1}; \\ t_{c3} &= t_{c1} - q\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right). \end{aligned}\right\}$$

Подставив в формулы температур значения новых материалов, получим, что $t_{c2} = 300$ °С – температура на границе слоев шамота кирпичного и ШЛБ-0,4; $t_{c3} = 75$ °С – температура на наружной поверхности футеровки.

Основываясь на полученных значениях, принимаем следующие материалы слоев футеровки: 1-й слой – шамот кирпичный

($\lambda = 0{,}72$ Вт/(м·К)); 2-й слой – шамот легковес ШЛБ-0,4 ($\lambda = 0{,}116$ Вт/(м·К)),$Q_2 < Q_1$, следовательно, потери в окружающую среду снизились на $E = Q_2 / Q_1 \cdot 100 = 15$ %.

Предложенная схема футеровочного слоя позволяет снизить тепловые потери в окружающую среду, тем самым приводят к снижению расхода топлива и получению экономического выигрыша.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зобнин Б.Ф.* Теплотехнические расчеты металлургических печей: Учебное пособие для студентов вузов, 2-е изд. М.: Металлургия, 1982. 360 с.

2. *Зобнин Б.Ф.* Нагревательные печи (теория и расчет). М.: Машиностроение, 1964. 311 с.

3. *Исаченко В.П.* Теплопередача: Учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 486 с.

4. *Мастрюков Б.С.* Расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1986. Т. 2. 376 с.

Научный руководитель д.т.н. проф. *В.И.Александров*