

# Металлургические технологии

УДК 536.2+669.1

## Влияние геометрических и теплофизических параметров шихтовых материалов на скорость их нагрева

Тимошпольский В. И., Корнеев С. В.

Белорусский национальный технический университет

Основными параметрами, влияющими на значения коэффициентов переноса являются пористость, температура и распределение размеров структурных элементов. Если при определении объемной теплоемкости пористого материала, как правило, трудностей не возникает, так как она однозначно связана с насыпной плотностью материала, то при определении эффективного коэффициента теплопроводности возникает ряд особенностей. В данной работе исследовано влияние геометрических и теплофизических параметров шихты на скорость их нагрева на примере металлического лома, который является основным шихтовым материалом на многих металлургических производствах.

### Коэффициент эффективной теплопроводности материала

Анализ методик расчета теплофизических характеристик показал, что существует два подхода при расчете эффективного коэффициента теплопроводности: без учета и с учетом переноса излучения внутри пористого объема. Первый подход справедлив в области низких температур (до 300 °С). Второй подход применен в работах [1, 2], при моделировании плавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи.

Рассмотрим определение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры, пористости и различных толщин кусков материала без учета продувки слоя горячими газами.

При перпендикулярном расположении слоев сплошного металла к направлению распространения теплоты эффективный коэффициент теплопроводности можно определить по формуле (1):

$$\lambda_{эфф} = \frac{\lambda_m \cdot \lambda_n}{\lambda_m \cdot P + \lambda_n \cdot (1 - P)} \quad (1)$$

где  $\lambda_m(T)$  – коэффициент теплопроводности твердого металла в зависимости от температуры, Вт/(м·К);  $\lambda_l(T)$  – эффективный коэффициент теплопроводности воздушных прослоек, Вт/(м·К);  $P$  – пористость объема металлошихты.

При параллельном расположении слоев к направлению распространения теплоты эффективный коэффициент теплопроводности можно определить по формуле (2):

$$\lambda_{\text{эфф}}(T, P) = \lambda_m(T) \cdot (1 - P) + \lambda_l(T) \cdot P, \quad (2)$$

Пористость можно определить, зная насыпную плотность металлошихты по формуле (3):

$$P = \frac{\rho_m - \rho_n}{\rho_m}, \quad (3)$$

где  $\rho_m$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – насыпная плотность металлошихты, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент теплопроводности внутри воздушных прослоек (4) складывается из коэффициента теплопроводности воздуха внутри пор и эффективного коэффициента лучистой теплопроводности, рассмотренного например, в работе [3]:

$$\lambda_a(T) = \lambda_a(T) + \frac{32}{9} \sigma T^3 h = \lambda_a(T) + \frac{32}{9} \sigma T^3 \frac{P}{1 - P} d, \quad (4)$$

где  $\lambda_a(T)$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T$  – температура, К;  $h$  – размер пор, м;  $d$  – размер куска металла.

При вычислении размера пор в зависимости от пористости и размера куска необходимо учитывать ограничения, чтобы не получить физически неверных результатов.

#### Моделирование распространения тепла в металлошихте.

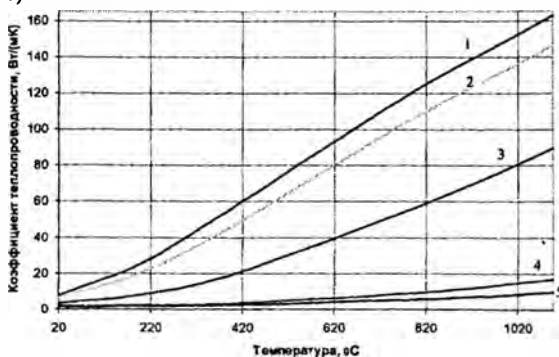
Для проверки адекватности приведенных выше зависимостей эффективного коэффициента теплопроводности от размера кусков, насыпной плотности и температуры было проведено моделирование различных случаев нагрева пористого материала. Для сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментов был проведен нагрев стального лома в нагревательной печи камерного типа со сводовым отоплением, установленной в ИТМО НАНБ. Для обеспечения приближения одномерной задачи лом укладывали в колодец, сооруженный из шамотного кирпича и установленный на поду печи. Средняя

толщина кусков лома составила около 10 мм. Масса лома составила 37,7 кг, а насыпная плотность 2234 кг/м<sup>3</sup>.

Моделирование нагрева кускового материала в объеме колодца осуществляли при помощи разработанной программы, основанной на методе конечных элементов, причем теплофизические свойства, как лома, так и шамота определялись в зависимости от температуры в каждой точке расчетной области. Температура печи принималась изменяющейся во времени по показаниям контрольной термопары из эксперимента.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования (решение уравнения теплопроводности с использованием формул (1) и (2) для коэффициента теплопроводности лома) показало, что для получения адекватных экспериментам результатов необходимо вводить предположение о количестве ориентированных к рассматриваемому направлению кусков материала, а эффективный коэффициент теплопроводности рассматривать как сумму коэффициентов полученных по формулам (1) и (2), в соответствующих пропорциях.

На рисунке 1 представлена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры для случая преимущественно горизонтального расположения кускового материала (90 %).



1 –  $d=0,4$  м; 2 –  $d=0,3$  м; 3 –  $d=0,1$  м; 4 –  $d=0,01$  м; 5 –  $d=0,005$  м.

Рисунок 1 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры

Таким образом, при экспериментальном и компьютерном моделировании для насыпной плотности  $2234 \text{ кг/м}^3$  (пористость 0,71) и средней толщине куска лома равной 10 мм, значение эффективного коэффициента теплопроводности изменялось в зависимости от температуры в пределах  $1,7 \dots 17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , что меньше коэффициента теплопроводности сплошного металла изменяющегося в пределах  $50 \dots 29 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

### **Выводы**

В результате проделанной работы была определена качественная картина распространения тепла в шихтовых материалах в различных условиях их нагрева. Кроме того, была определена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от пористости, размера пор и температуры. Для применяемых на производстве видов металлолома с насыпной плотностью изменяющейся в пределах  $700 \dots 2800 \text{ кг/м}^3$  и толщинами кусков лома изменяющимися в пределах  $50 \dots 400 \text{ мм}$ , значения эффективного коэффициента теплопроводности будут изменяться в зависимости от температуры в пределах  $0,8 \dots 500 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , что существенно меняет картину распространения тепла в сравнении со сплошным материалом.

### **Литература**

1. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский [и др.]. – Мн.: Наука и техника, 1992. – 158 с.
2. Математическое моделирование теплофизических процессов при расплавлении шихты в дуговой сталеплавильной печи и внепечной доводке стали на агрегате ковш-печь / Болотов В.Ю. [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002/ – № 7. – С. 177–185.
3. Павлюкевич, Н. В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н. В. Павлюкевич. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ. – 2002. – 140 с.