

чем от двух решеток датчиков сигналов, по сравнению с методами Фурье одномерных сигналов позволяет определить не только спектральные параметры сигналов, но и координаты источников возмущения, что повышает точность контроля заполнения шаровой мельницы и состояния ее футеровки.

2. Исследования целесообразно продолжить в направлении разработки методов контроля параметров роторных объектов на основе анализа частотно-волновых спектров сигналов различной физической природы.

Список литературы

1. Барков А.В. Долгосрочный прогноз состояния роторных машин по сигналу вибрации [Электронный ресурс] /А.В. Барков, П.П. Якобсон. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/dps/index.htm> .

2. Алексеев М.А. Пространственно–временной спектральный анализ модели вибрационных процессов промышленных объектов //Науковий вісник НГА України, № 4, 1999 С.51–53.

3. Кейпон Дж. Пространственно–временной анализ с высоким разрешением // ТИИЭР. – 1969. – Т.57. – № 8. – С. 69–79.

4. Карасев В.А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. / Максимов В.П., Сидоренко М.К. // – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.
Надійшла до редакції 19.05.11*

УДК 666.762.1-127

© А.Ю. Гусев, Ю.П. Рыбальченко

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ПОРИСТОСТИ ОГНЕУПОРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Разработана модифицированная методика моделирования взаимосвязи коэффициента теплопроводности и пористости огнеупорных материалов, которые используются в доменных печах.

Розроблена модифікована методика моделювання взаємозв'язку коефіцієнта теплопровідності і пористості вогнетривких матеріалів, котрі використовуються в доменних печах.

Developed a modified technique for modeling the relationship of thermal conductivity and porosity of refractory materials used in blast furnaces.

Вступление. Анализ зависимости теплофизических свойств огнеупорных материалов от различных факторов неразрывно связан с изучением физико-химических процессов, происходящих при их нагреве и при определенных условиях существенно изменяющих их структуру, что, в свою очередь, приводит к изменению характеристик теплопроводности огнеупоров. В связи с этим при изучении теплофизических свойств огнеупоров большой интерес представляет установление взаимосвязи коэффициента теплопроводности и пористости, как параметра, в основном определяющего структуру огнеупорных материалов.

Постановка задачи. Для решения поставленной проблемы необходимо на основании экспериментальных данных установить характерные особенности изменения коэффициента теплопроводности при различной структуре огне-

упорного материала и разработать математическую модель, устанавливающую взаимосвязь коэффициента теплопроводности и пористости.

Цель работы. Разработка математической модели, позволяющей описать изменение коэффициента теплопроводности при различной структуре пористых огнеупоров с учетом фазовых превращений.

Изложение основного материала. Большинство огнеупорных материалов пористы. Поры могут занимать от нуля до 90% общего объема изделий. Большая часть пор в огнеупорных материалах сообщается между собой, выходит на поверхность и может быть заполнена водой; такие поры считают открытыми. Небольшая часть пор изолирована, недоступна для заполнения водой; эти поры называют закрытыми.

Пористость – это отношение объема пор V_{II} к полному объему пористого тела V : $P = V_{II}/V$. Иначе – пористость P определяется как разность плотности компактного ρ_K и пористого ρ_{II} тел, отнесенная к плотности компактного тела:

$$P\% = \frac{\rho_K - \rho_{II}}{\rho_{II}} \cdot 100\%$$

Различают сквозную, тупиковую и закрытую пористость, каждая из которых образуется соответственно сквозными, тупиковыми и закрытыми порами. Открытая пористость – это объем пор, сообщающихся с поверхностью изделия, а закрытая представляет объем изолированных пор, не имеющих выхода к поверхности [1].

Общая пористость P складывается из открытой P_1 и закрытой P_2 пористости: $P = P_1 + P_2$. В свою очередь, открытая пористость складывается из сквозных P_3 и тупиковых P_4 пор $P_1 = P_3 + P_4$. Таким образом, общая пористость определяется суммой закрытых, сквозных, тупиковых пор $P = P_2 + P_3 + P_4$.

В связи с этим различают общую пористость изделий, которую составляют закрытые и открытые поры, и кажущуюся или открытую, которую составляют только открытые поры. Поры, которые сами впитывают воду (расплав), находясь в контакте с ней, называют капиллярными.

Крупные капиллярные поры диаметром более 5 мкм выделяют в особую группу так называемых канальных пор. Нижний предел канальных пор 5 мкм принят потому, что металлургические шлаки, реагируя со стенками алюмосиликатных изделий, в поры, крупнее 5 мкм практически не проникают.

Форма пор чрезвычайно сложна. При длительном воздействии высоких температур поры в аморфных изотропных телах стремятся сфероидизироваться, а в чисто кристаллических анизотропных приобретают огранку кристаллов («отрицательные кристаллы»).

Распределение пор, как по величине, так и по форме в объеме зернистых изделий неравномерно. Крупные и средние поры сосредоточены между крупными зёрнами и мелкими, называемыми связкой, а также между мелкими зёрнами, т. е. в связке.

Ансамбль пор образует поровые каналы, которые упрощенно рассматриваются как цилиндрические трубки постоянного диаметра, идущие параллельно друг другу (цилиндрическая модель). Поровые каналы переменного сечения на-

зывают четочными. Поры, образующиеся между округлыми зернами и соединяющиеся между собой в трех взаимно перпендикулярных направлениях, называют глобулярными.

Особую группу пор составляют поры-трещины, образующиеся в процессе обжига и при службе огнеупоров в различных печах.

Пористость оказывает существенное влияние на физические и механические свойства материалов. При этом следует отметить, что обобщенные свойства пористых структур, как правило, могут быть описаны некоторой нелинейной зависимостью.

Для плотности и теплоемкости пористых тел сохраняется свойство аддитивности, при этом пористость практически не зависит от температуры [2].

Таким образом, проблема точного математического описания поведения пористости, в виде некоторой функции является весьма сложной, что обусловлено структурной зависимостью свойств пористости не только от концентрации фаз, но и от их морфологии, взаимного расположения, степени связанности и других структурных параметров.

Изучению теплопроводности пористых структур посвящено большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ, предложено много эмпирических зависимостей. Поэтому необходим анализ степени применимости различных предложенных моделей и разработка обобщенной модели. Матюхин Н.М. предложил соотношение [3], устанавливающее зависимость между теплопроводностью огнеупорного материала и пористостью

$$\lambda_k/\lambda_m = 1 - 1,94\Pi + 0,94\Pi^{1,86}, \quad (1)$$

где λ_k – теплопроводность каркаса (системы); λ_m – теплопроводность матрицы (среды).

Установлено [4], что при первом событии достижения определенной температуры и давления в огнеупорном материале возникает процесс ползучести, вызывающий усадку материала. В результате этого процесса общая пористость уменьшается за короткий промежуток времени так, что процесс можно считать скачкообразным. Поэтому, чтобы формула (1) была справедливой и для процесса задувки печи, в нее необходимо ввести коэффициент, учитывающий скачкообразное изменение фазового состава огнеупорного материала:

$$K(T, P) = \begin{cases} 1 & \text{при } T < 0,5T_{\text{плавления}} \\ < 1 & \text{при } T > 0,5T_{\text{плавления}} \end{cases},$$

где $K(T, P)$ – определяется экспериментально; T – температура; P – давление.

Тогда соотношение (1), справедливое для всего диапазона изменения пористости ($0 \leq \Pi \leq 1$) примет вид обобщенного соотношения:

$$\lambda_k/\lambda_m = 1 - 1,94 \cdot \Pi \cdot K(T, P) + 0,94 \cdot \Pi^{1,86} \cdot K(T, P). \quad (2)$$

Сравнение со справочными данными для низко- и высокопористых структур (рис. 1, 2) показало хорошее совпадение обобщающего соотношения с экспериментальными данными (при $K(T, P) = 1$).

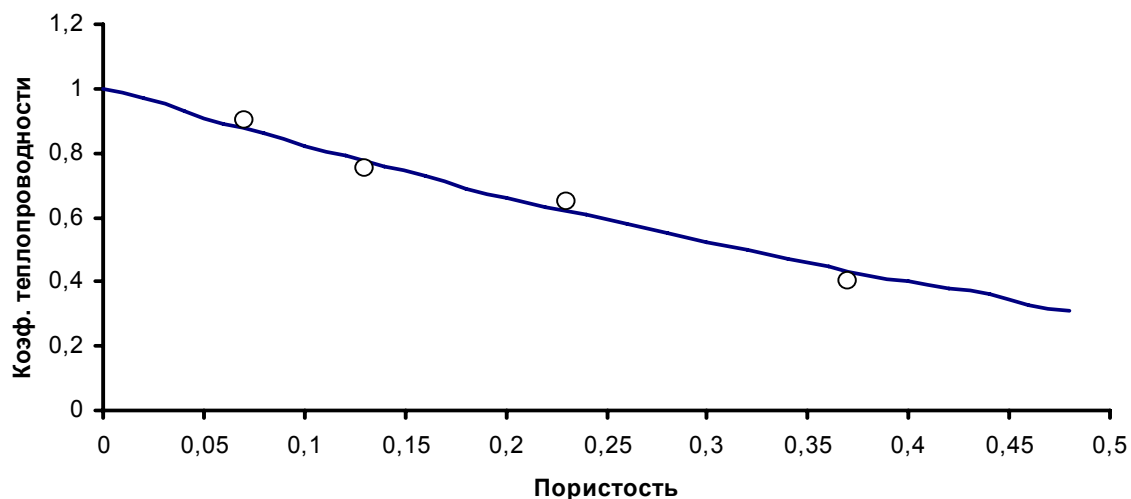


Рис. 1. Сравнение зависимости (2) с экспериментальными данными для низкопористых структур: \circ – справочные данные; ———— – зависимость (2)

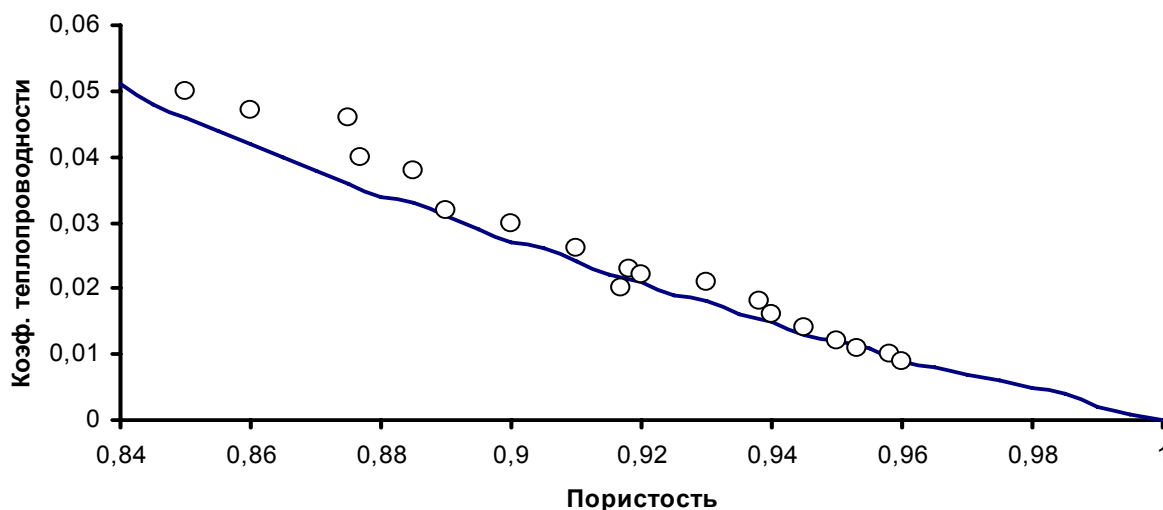


Рис. 2. Сравнение зависимости (2) с экспериментальными данными для высокопористых структур: \circ – справочные данные; ———— – зависимость (2)

Экспериментальное подтверждение скачкообразного изменения теплопроводности наглядно представлено на рис. 3 по данным, полученным при первой задувки доменной печи ДП-7 Шоагуаньского меткомбината (Китай) в виде зависимости температуры футеровки на различных горизонтах огнеупорной кладки горна от времени.

Из рисунка видно, что из-за изменения пористости на границе жидкого чугуна и футеровки (пятый горизонт) происходит резкий скачок температуры 5-го горизонта. Уменьшение эффекта и сведение его до нуля на нижних горизонтах говорит о том, что остальные горизонты усадке не подвергаются. Для практических расчетов по математической модели (2) необходимо, используя экспериментальные данные (рис. 3) представить в аналитическом виде температурную зависимость через теплопроводность в виде полинома [5].

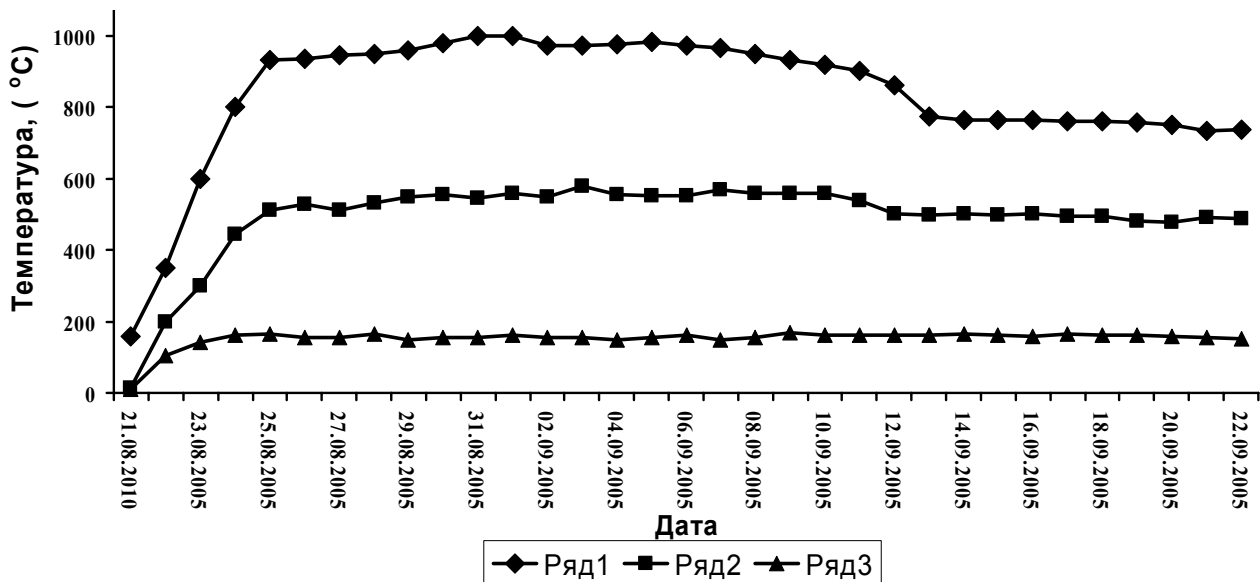


Рис.3. Изменение температуры футеровки ДП-7 Шюагуаньского меткомбината в период задувки: ряд 1 – пятый горизонт; ряд 2 – четвертый горизонт; ряд 3 – третий горизонт.

Выводы:

1. Предложена математическая модель, описывающая взаимосвязь коэффициентов теплопроводности и пористости огнеупорных материалов, учитывающая скачкообразное изменение фазового состава огнеупорных материалов.
2. На основании экспериментальных данных по данным независимых литературных источников установлена адекватность модели тепловым процессам в огнеупорных материалах для всего диапазона изменения пористости ($0 \leq \Pi \leq 1$).

Список литературы

1. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. - Минск: Выш. шк. - 1987. - 164 с.
2. Пористые проницаемые материалы: Справочное издание / под ред. С.В. Белова. - М.: Металлургия, 1987. - 335 с.
3. Федотовский В.С., Орлов А.И., Матюхин Н.М. Эффективная теплопроводность пучков стержней и труб при их случайных отклонениях от правильной решетки // Доклад на конференции МНТК-2007.
4. Гусев О.Ю., Рибальченко Ю.П. Моделювання процесів повзучості футеровки доменної печі в період задування. // Науковий вісник НГУ. - 2011. - № 4.
5. Інформаційна технологія оцінки теплопровідності вогнетривкої футеровки металургійних агрегатів / Рибальченко Ю.П. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. - техн. зб. - 2011.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Кузнецовим Г.В.
Надійшла до редакції 15.06.11*