

Д. т. н. Ю. Н. Крючков (✉)

ФГБОУ ВО «Гжельский государственный университет»,
пос. Электроизолятор Московской обл., Россия

УДК 666.3-127:544.023.522

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ И ПРОНИЦАЕМОСТИ МОНОФРАКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ

Представлен метод оценки параметров структуры пористых керамических материалов по пористости и размеру частиц. На его основе получена физически более строгая, чем известная формула Козени, формула для определения среднего (гидравлического) радиуса капилляров пористой керамики на основе электрокорунда по полученной формуле лучше согласуются с экспериментальными данными, чем расчеты по формуле Козени.

Ключевые слова: пористая проницаемая керамика, удельная поверхность, коэффициент извилистости капилляров, размер частиц, средний радиус капилляров, проницаемость.

Пористые керамические материалы применяются для фильтрации жидкостей, газов, расплавов металлов, каталитической очистки жидкостей и газов от вредных веществ, диспергации газов в жидкостях и расплавах металлов, адсорбционной очистки жидкостей или газов и т. д. Структура пористых порошковых материалов имеет хаотичный характер. Капилляры имеют сужения (горла) и расширения (в зонах их пересечения друг с другом). При этом направление движения жидкости или газа в капиллярах может отличаться от направления фильтрации, что учитывается коэффициентом извилистости капилляров [1–4].

Проницаемость керамических материалов и изделий зависит главным образом от размеров исходных частиц, пористости материала и трехмерной структуры пористого пространства. Особенности этой структуры при исследовании пористых материалов часто не учитываются или слишком грубо учитываются [3, 4], так как используют не трехмерные модели пористого материала, а модели в виде непересекающихся капилляров. Если представить поровое пространство пористого керамического материала простейшей системой непересекающихся извилистых цилиндрических капилляров со средним радиусом r , то коэффициент извилистости капилляров ξ (отношение длины капилляра к толщине материала) будет влиять и на удельную поверхность материала S_0 и, соответственно, на r .

Подтвердим это следующим анализом. Пусть материал толщиной h имеет площадь S и в ней N извилистых непересекающихся цилиндрических капилляров длиной L :

$$L = h\xi, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент извилистости капилляров.

Тогда объем всех пор V , пористость Π и S_0 (поверхность капилляров в единичном объеме материала) определяются следующими выражениями:

$$V = N\pi r^2 L = N\pi r^2 \xi h, \quad (2)$$

$$\Pi = N\pi r^2 L / Sh = N\pi r^2 \xi / S, \quad (3)$$

$$S_0 = 2\pi N r L / Sh = 2\pi N r \xi / S. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при одинаковой пористости коэффициент извилистости капилляров ξ повышает удельную поверхность S_0 пористых материалов. Это необходимо учитывать при анализе их пористой структуры.

Кроме того, среднее координационное число для пор — среднее число горл (стыков капилляров), приходящееся на одну пору, — принимается равным 2, поэтому рассмотренная модель не отражает реальную структуру пористого материала. В результате получается заниженное значение среднего (гидравлического) радиуса капилляров r при определении его по проницаемости материала. Все это снижает надежность результатов исследовательских работ, выполняемых на модели непересекающихся извилистых цилиндрических капилляров.

В настоящей работе использована более строгая глобулярная модель [5], позволяющая получить дополнительно среднее координационное число для частиц твердой фазы Z (среднее число контактов, приходящихся на одну частицу материала) пористой структуры материала:



Ю. Н. Крючков
E-mail: yu-kryuchkov@yandex.ru

Параметры структуры пористой электрокорундовой керамики

Марка порошка	D , мкм	P , %	ξ	S_o , мкм ² /мкм ³ по (6)	r , мкм			K , мкм ²	
					по [1]	по (8)	по (7)	по [1]	по (8), (9)
F240 (Австрия)	60,5	39,5	1,31	0,0637	4,29	3,43	11,25	0,597	0,448
F600 (Россия)	12,4	45,6	1,23	0,2630	1,63	1,58	3,46	0,151	0,142
F100 (Россия)	156,4	35,8	1,38	0,0246	9,38	12,2	29,10	2,670	3,357

$$1 - P = (1 - 2/Z)^2 / (1,077 - 1/Z - Z^{1,16}), \quad (5)$$

$$S_o = 6(1 - P)/D, \quad (6)$$

где D — средний диаметр частиц.

Цель настоящей работы — уточнение методики расчета r и проницаемости K пористых материалов. При стандартном подходе к расчету r , когда капилляры считаются непересекающимися (по аналогии с определением внутреннего радиуса труб в их пучке для гидравлических расчетов), получаем известную формулу Козени:

$$r = 2P/S_o = PD/[3(1 - P)]. \quad (7)$$

Формула Козени проста и удобна для использования. Она в значительной степени отражает структуру исследуемых материалов, поэтому ее части применяли и применяют многие исследователи. Формула Козени удобна также для контроля характеристик керамических и других проницаемых материалов в разных отраслях промышленности.

Однако если более внимательно рассмотреть выражение (4), то можно обнаружить, что оно включает только объем воздуха в капилляре, т. е. не включает материал стенок. А это не позволяет представлять пористую структуру материалов пучком непересекающихся капилляров. Поэтому формула Козени, несмотря на ее широкое применение, является ошибочной.

В настоящей работе предлагается правильная формула для оценки среднего радиуса капилляров r :

$$r = P^2 D / [3(1 - P)\xi^{0,5}], \quad (8)$$

где ξ — извилистость капилляров [5], $\xi = 1/[P(1 - \ln P)]$.

В формуле (8) дополнительное умножение на P приводит к тому, что формула учитывает только пористое пространство, и тогда эта формула становится более точной для оценки r проницаемых материалов.

Для расчета проницаемости материала K на основе полученной формулы среднего радиуса капилляров используем уравнение Пуазейля [6, 7]. Это уравнение распространяется на пористые среды, например в законе Дарси и уравнении Козени – Кармана. Оно описывает вязкостное ламинарное течение жидкости или газа в материале с непересекающимися капиллярами и имеет следующий вид:

$$K = Pr^2/(8\xi). \quad (9)$$

Извилистость капилляров в выражении (9) указана в первой степени, так как в формуле (8) она стоит в степени 0,5.

В качестве примера использования формулы (8) был рассчитан средний радиус капилляров по экспериментальным исходным данным (P и

D), указанным в статье [1] для пористой электрокорундовой керамики. В таблице приведены значения r по формуле (8) в сравнении с экспериментальными данными и значениями, рассчитанными по формуле Козени, а также значения K , рассчитанные по формулам (8) и (9), в сравнении с экспериментальными данными [1], полученными измерением газопроницаемости керамики.

Из таблицы видно, что рассчитанные по предложенной методике и экспериментальные значения средних радиусов капилляров лучше согласуются друг с другом, чем со значениями, полученными по формуле Козени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена формула для определения среднего радиуса капилляров на основе трехмерной модели пористой структуры материалов, более строго учитывающая физику гидродинамических процессов, чем формула Козени.

Показано, что полученная в настоящей работе формула для расчета r значительно точнее формулы Козени. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными проведенной работы.

Библиографический список

1. **Красный, Б. Л.** Влияние размера и формы кристаллов электроплавленного корунда на микроструктуру и проницаемость пористой керамики / Б. Л. Красный, В. П. Тарасовский, А. Б. Красный, А. М. Усс // Новые огнеупоры. — 2009. — № 12. — С. 20–24.
2. Пористые проницаемые материалы : справ. изд. ; под ред. С. В. Белова. — М. : Металлургия, 1987. — 335 с.
3. **Гурьев, В. В.** Определение гидравлического радиуса пористой структуры керамических материалов / В. В. Гурьев, В. И. Никитин, В. А. Кофанов // Стекло и керамика. — 2016. — № 7. — С. 25–34.
4. **Kryuchkov, Yu. N.** Determination of the average capillary radius of porous materials / Yu. N. Kryuchkov // Glass and Ceram. — 2018. — Vol. 75, № 3/4. — P. 139–144.
5. **Крючков, Ю. Н.** Структура и свойства гетерогенных пористых, композиционных материалов / Ю. Н. Крючков. — Saarbrücken : Verlag LAP: Lambert Academic Publishing, 2011. — 306 с.
6. **Хейфец, Л. И.** Многофазные процессы в пористых средах / Л. И. Хейфец, А. В. Неймарк. — М. : Химия, 1982. — 320 с.
7. **Шейдеггер, А. Э.** Физика течения жидкостей через пористые среды / А. Э. Шейдеггер. — М. : Гостоптехиздат, 1960. — 249 с. ■

Получено 24.04.20
© Ю. Н. Крючков, 2020 г.