

ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ВОЛЛАСТОНИТОВОЙ КЕРАМИКИ

А.Н. Айтимбетова, О.Н. Каньгина

Установлено влияние условий спекания волластонитовой керамики, содержащей армирующий материал, на фрактальную размерность. Полученная связь между проницаемостью и фрактальной размерностью поверхности пор позволяет моделировать оптимальное поровое пространство волластонитовых фильтров.

Ключевые слова: волластонит; пористая керамика; проницаемость; фрактальная размерность.

В последнее время пористые фильтрующие керамические изделия привлекают внимание благодаря их высокой прочности, химической стойкости и долговечности. Для описания процесса фильтрации необходимо знать степень проницаемости материала и характеристики его поровой структуры. Существующие методы теоретического расчета проницаемости оказались

не пригодны для пористой волластонитовой керамики. Отсутствие однозначной связи между проницаемостью пористой волластонитовой керамики и параметрами мезоструктуры (размерами и формой пор) приводит к необходимости перехода к следующему параметру, описывающему состояние поверхности порового пространства – извилистости [1, 2].

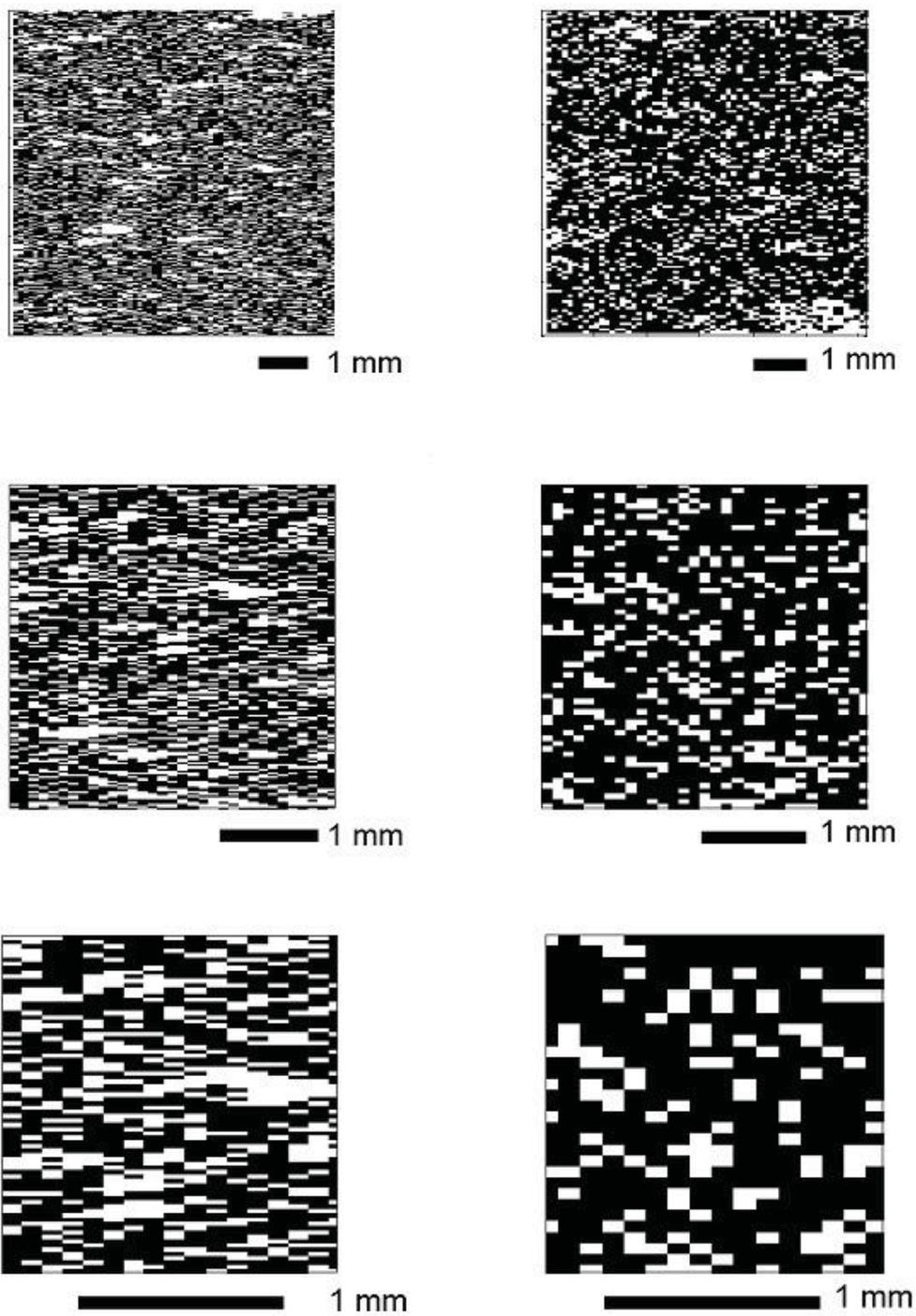


Рис. 1. Сечения пористой волластонитовой керамики с 10% (а) и 30% (б) шамота при разных масштабах.

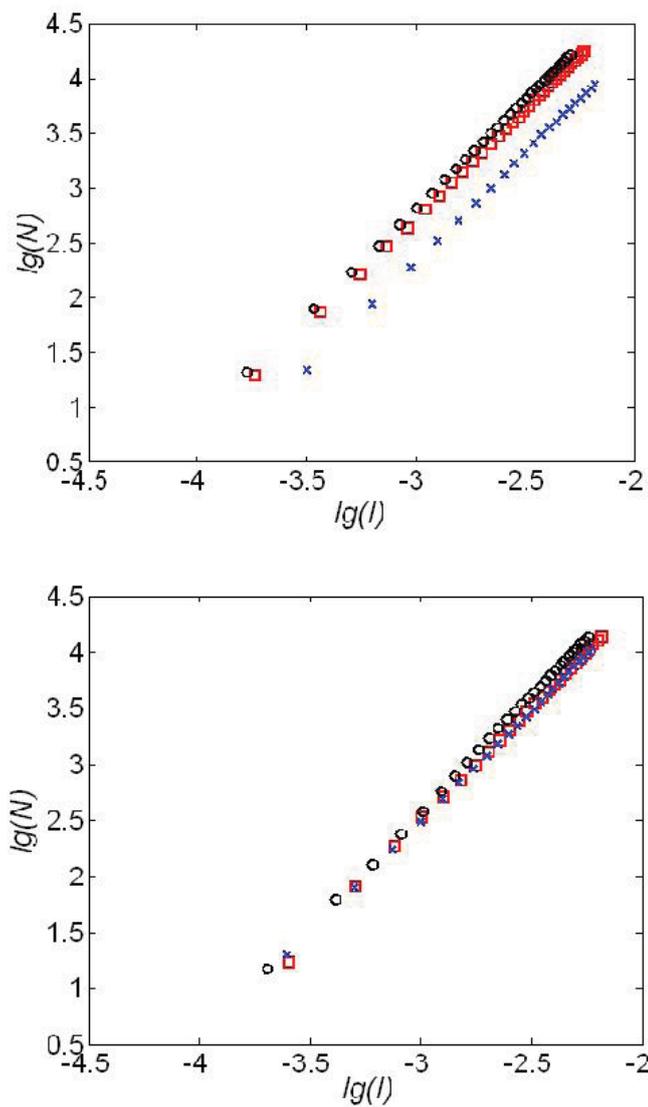


Рис. 2. Зависимость логарифма числа пор N от логарифма линейного размера квадрата l и содержания наполнителя для систем волластонит – кварцевый песок (а) и волластонит – шамот (б):
□ – 10%; × – 20%; ○ – 30%.

При протекании жидкости или газа сквозь пористый керамический материал минимальная длина тока в порах всегда равна или больше толщины пористого тела в направлении фильтрации. Это увеличение длины пор l_n по сравнению с толщиной пористого тела l характеризует коэффициент извилистости пор ξ : $\xi = l_n/l$. Для тела, образованного сферическими частицами одного диаметра, коэффициент извилистости пор меняется от 1,065 до 1,0 при изменении пористости от 0,259 до 0,476 [3]. У реальной пористой среды коэффициент извилистости всегда больше, чем у фиктивной. Это объясняется дисперсностью порошков, искажением формы частиц по сравнению с сферической и наличием микрошероховатостей на поверхности пор. Уменьшение пористости, усложнение формы пор и увеличение дисперсности частиц сопровождается ростом коэффициента извилистости ξ . Значения коэффициента извилистости пор находятся в пределах 1,0–1,5 при изменении пористости от 0,84 до 0,26 [2].

Для определения формы и состояния поверхности пор, а также коэффициента извилистости исследуют шлифы или микрофотографии поверхности материала. Фрактографические методы исследования являются наиболее распространенными, но вследствие наличия текстуры, неконтрастности различных фаз в волластонитовой керамике, деформации пор при шлифовании и малой статистической выборке данные методы не достаточны.

Традиционные методы не учитывают внутреннюю структуру материала. Поэтому использование мультифрактального анализа применительно к пористым материалам, относящимся к природным, естественным фракталам [4], позволяет описать рельеф поверхностей пор с помощью фрактальной размерности.

В данной работе определяется фрактальная размерность поверхности порового пространства и устанавливается ее взаимосвязь с про-

цаемостью волластонитовых фильтров, изготовленных согласно [5].

В настоящее время для определения фрактальной размерности используется несколько различных способов: метод островов среза, Фурье-анализ профилей, метод вертикальных сечений [4, 6]. В данной работе для реконструкции строения порового пространства волластонитовой керамики используется рентгеновская радиография [7]. Цифровое изображение смоделированной поверхности сечения образца покрывается серией вложенных квадратов с линейными размерами l и подсчитывается число пор N , попадающих в каждый квадрат. Примеры сечений в разных масштабах показаны на рис. 1. Масса порового кластера M , равная N , связана с линейным размером l соотношением [4, 8]:

$$M = l^D,$$

где D – фрактальная размерность поверхности порового пространства.

Зависимость между числом пор N и размером квадрата l в двойных логарифмических координатах близка к линейной зависимости, угловой коэффициент аппроксимирующей прямой соответствует фрактальной размерности D (рис. 2).

Вычисленные значения фрактальной размерности поверхности порового пространства D для различных наполнителей и условий спекания представлены в таблице.

Значения $D \neq 2$ свидетельствуют о фрактальности поверхности. Дробная фрактальная размерность характерна для извилистой, изрезанной поверхности пор. Значения $D < 2$ отмечены для коллоидных систем типа аэрогелей и саж [4].

Зависимости фрактальной размерности поверхности D от проницаемости волластонитовых фильтров приведены на рис. 3. Оба графика имеют экстремум при $D_0 = 2$, соответствующий максимальной проницаемости материалов. Максимальное значение коэффициента проницаемости $K = 4,8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ наблюдается для образца

Фрактальная размерность поверхности порового пространства

Время выдержки, час	Содержание наполнителя, %	Фрактальная размерность D	
		Кварцевый песок	Шамот
0	10	1,934	1,938
	20	1,971	1,964
	30	2,102	2,068
3	10	1,985	2,043
	20	1,966	2,047
	30	1,973	1,975

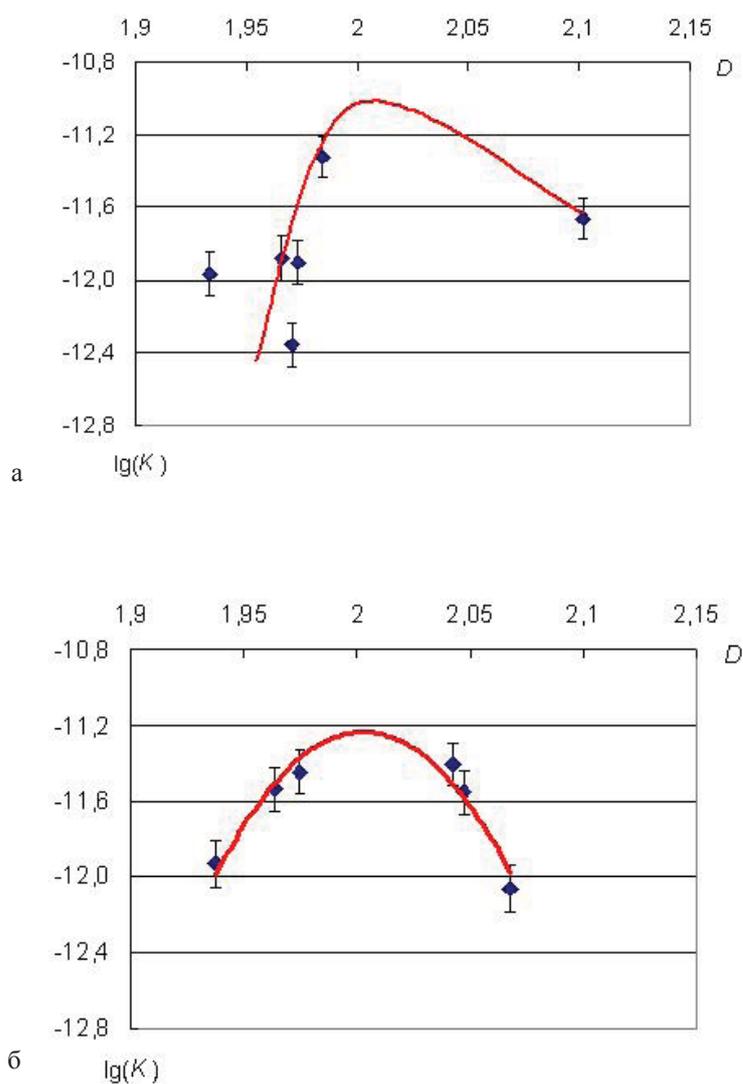


Рис. 3. Зависимость коэффициента проницаемости от фрактальной размерности поверхности порового пространства для систем волластонит – кварцевый песок (а) и волластонит – шамот (б).

с минимально отклоненной от D_0 размерностью $D = 1,985$.

Две ветви на зависимости $K = f(D)$ указывают на изменение качества поверхности пор. Первая ветвь ($D < 2$) – это переход от изолированных пор к сообщающимся поровым кластерам. Уменьшение фрактальной размерности на данной ветви ведет к снижению доли сообщающихся пор и проницаемости керамических фильтров. Вторая ветвь ($D > 2$) – соответствует росту разветвлений сообщающихся поровых кластеров, увеличению извилистости и плотности дефектов на поверхности пор. Увеличение фрактальной размерности в этой области сопровождается ростом сопротивления течению фильтруемой среде и падением проницаемости [8].

Таким образом, полученные корреляции между проницаемостью K и параметром D , свидетельствуют, что доминирующее влияние на проницаемость пористой волластонитовой керамики оказывает не мезо-, а микроструктура, параметром которой является фрактальная размерность поверхности порового пространства. Проницаемость достигает максимального значения $4,8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ при минимальном отклонении $D = 1,985$ от D_0 .

Литература

1. *Смирнова К.А.* Пористая керамика для фильтрации и аэрации. М.: Стройиздат, 1968. 172 с.
2. Пористые проницаемые материалы / Под ред. С.В. Белова. М.: Metallургия, 1987. 335 с.
3. *Лейбензон Л. С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 244 с.
4. *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 384 с.
5. *Айтимбетова А.Н.* Влияние технологического регламента на пористость фильтрующей волластонитовой керамики // Вестник КРСУ. 2005. Т. 5. №1. С. 66–71.
6. *Багнич С.А., Конаш А.В.* Влияние неоднородных свойств системы на процесс протекания в двумерном пространстве // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 12. С. 2215–2222.
7. *Каныгина О.Н., Айтимбетова А.Н.* Применение рентгеновской радиографии для исследования пористой керамики // Вестник КРСУ. 2004. Т. 4. № 4. С. 60–63.
8. *Кульков С.Н., Томаш Ян, Буякова С.П.* Фрактальная размерность поверхностей пористых керамических материалов // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 2. С. 51–55.