

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ НА СТРУКТУРУ И РАЗМЕР КАНАЛОВ ПРОНИЦАЕМОЙ КЕРАМИКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ НА ИХ ОСНОВЕ*

С.Г. Пономарев, В.В. Рыбальченко, А.А. Васин, О.А. Гордеева

В работе проведено исследование структуры сети сквозных каналов образцов пористой керамики. Для изготовления керамики использовались порошки электрокорунда, имеющие различный гранулометрический состав, что достигалось за счет измельчения электрокорунда в шаровой мельнице в течение различных промежутков времени. Определены характерные размеры сквозных поровых каналов керамики. Установлена связь между гранулометрическим составом порошков и свойствами сети сквозных каналов пористой керамики. Показано, что большую часть порового пространства проницаемой керамики, изготовленной с применением узкофракционных порошков, составляют наиболее крупные поры, размер которых монотонно зависит от среднего размера частиц порошка. С другой стороны, если при производстве керамики используется порошок с полидисперсным фракционным составом, наблюдается широкий спектр размеров поровых каналов, причем, чем мельче поры, тем больший вклад они вносят в поровое пространство керамики. Следует отметить, что подобная информация дает возможность целенаправленного конструирования материалов с требуемой структурой, которая наиболее оптимальна для конкретного изделия (фильтрующие элементы, теплоизоляционные материалы и т.д.).

Ключевые слова: электрокорунд, проницаемая керамика, сквозные каналы, экстразионный жидкостной порозиметр, гранулометрический состав порошка, фильтрующие элементы.

INFLUENCE OF THE GRANULOMETRIC PROPERTIES OF POWDERS ON THE STRUCTURE AND SIZE OF THE CHANNELS IN THE POWDER-BASE PERMEABLE CERAMICS

S.G. Ponomarev, V.V. Rybalchenko, A.A. Vasin, O. A. Gordeeva

In the article the structure of the network through channels of porous ceramics samples was studied. Ceramics samples were prepared using electrocorundum powders with a varied granulometric compound. It was achieved by powder grinding in a ball mill during different periods of time. The characteristic sizes of the through pore channels of the ceramic were determined. Also correlation among the powder granulometric compound and properties of a network through the channels of the porous ceramics was found. It is shown that most of the pore space of permeable ceramic made of monodisperse powders, are the coarsest pores. The size of pore channels monotonically depends on the average particle size of the powder. On the other hand, if the powder with polydisperse composition is used for ceramics production, there is a wide range of sizes of the pore channels, and the smaller the pores, the greater the contribution they make to the pore space of the ceramic. This information allows the purposeful design of material with the desired structure that is most appropriate for a specific product (filter elements, insulation materials, etc.).

Keywords: corundum, a permeable ceramic, through pore channels, liquid extrusion porosimetry, granulometric composition of the powder, filters.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания № 11.2504.2014/К от 18 июля 2014 г.

Введение

В последнее время наблюдается существенный рост интереса к изучению пористых керамических материалов. Такие материалы ввиду своей химической стойкости и жаропрочности являются основой для производства фильтрующих элементов, используемых в металлургии и химической промышленности [1]. Поэтому одним из приоритетных направлений развития этих отраслей является создание и производство проницаемых керамических материалов с регулируемым размером сквозных поровых каналов. Вид поровой структуры проницаемой керамики зависит от множества факторов. Одним из них является гранулометрический состав порошка, который используется для ее получения. Так, например, в работах [2–4] показано, как влияет гранулометрический состав порошков на пористость проницаемой керамики. Приводятся корреляции между фракционным составом керамического материала и пористостью получаемой керамики. Кроме этого, в работах [3, 5] предлагается некоторая классификация поровой структуры по размерам каналов, образованных как самими зернами порошка, так и их агломератами. Эти вопросы напрямую связаны с разработкой новых материалов, применяемых для изготовления различных фильтрующих элементов [6]. Так, размер сквозных пор материала дает представление о размерах частиц, которые могут быть отфильтрованы при протекании жидкой или газообразной среды через фильтр. С другой стороны, проницаемость (производительность) фильтрующего элемента напрямую связана с объемом порово-

го пространства, приходящегося на поры, которые участвуют в процессе сепарации. То есть задача выяснения корреляций между размерами каналов и распределением порового объема, с одной стороны, и свойствами исходных порошков, с другой стороны, остается весьма актуальной.

Целью настоящей работы является исследование влияния гранулометрического состава порошков на структуру и поперечные размеры сквозных поровых каналов керамических образцов, изготовленных на их основе.

Оборудование для экспериментальных исследований

Для исследования гранулометрического состава порошков использовался лазерный дифракционный анализатор размера частиц *FRITTSCH Analysette 22 Nano Tec Plus*. Анализ сквозных каналов проницаемой керамики проводился с помощью экструзионного порозиметра *PMI LEP-100A*. Приведем краткое описание этого прибора, так как в России он мало представлен. Полное изложение физических принципов функционирования данного прибора содержится в работах [7–9].

Работа данного прибора основана на учете действия сил поверхностного натяжения на границе раздела газ-жидкость, благодаря которым жидкость удерживается внутри сквозных поровых каналов керамического образца. Рабочая ячейка прибора имеет вид полого цилиндра, один конец которого закрыт пористой мембраной. Образец, насыщенный жидкостью, помещается на поверхность мембраны, содержащей ту же жидкость (рис. 1).

Если со стороны свободной поверхности образца повысить давление газовой среды P_1 , то в некоторый момент жидкость начнет вытесняться из пор образца. Вытеснение жидкости в каждый момент времени будет происходить в тех поровых каналах, для которых характерный поперечный размер (далее диаметр) D соответствует перепаду давления $\Delta P = P_1 - P_0$ ($P_1 > P_0$), где P_0 , P_1 – значения давления газа по обе стороны образца. Величины D и ΔP связаны соотношением [7]:

$$D = 4\gamma \frac{\cos\theta}{\Delta P}, \quad (1)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения на границе жидкость-газ; θ – краевой угол смачивания.

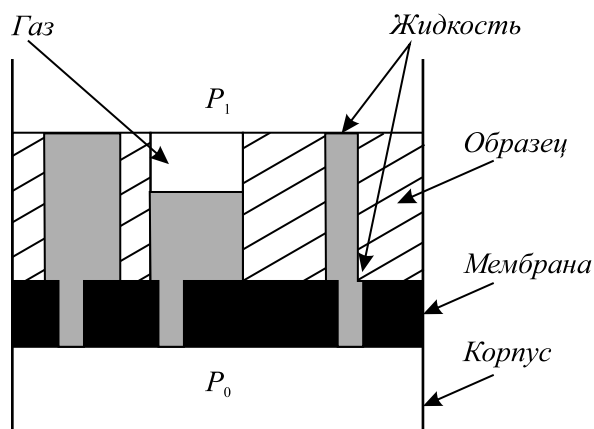


Рис. 1. Схема рабочей ячейки порозиметра LEP-100A: P_1 – давление газовой среды, P_0 – давление газа со стороны, противоположной свободной поверхности

Например, для образцов из гидрофильных материалов в качестве рабочей жидкости используется вода, при этом $\gamma = 72,3 \pm 0,4$ мН/м, параметр θ в зависимости от материала принимает значение от 0 до 90° (для алюмооксидной керамики $\theta < 10^\circ$, и обычно принимают $\theta = 0$).

Следует заметить, что в соотношении (1) не учитывается влияние так называемого фактора кривизны поровых каналов. Информацию о значении этого параметра получить крайне сложно, поэтому в большинстве приборов подобного назначения эту величину принимают равной единице.

Пусть перепад давления изменяется от 0 до некоторого значения ΔP_1 . Тогда объем вытесненной жидкости $V(D_1)$ (определяется взвешиванием) будет соответствовать объему порового пространства сквозных каналов, которое занимают участки пор с диаметрами больше D_1 (D_1 и ΔP_1 связаны соотношением (1)). То есть, измеряя вытесненный объем жидкости $V(D)$ для конкретного перепада давления (или величины диаметра D), можно построить интегральную функцию $F(D)$ распределения пор в зависимости от их размеров D

$$F(D) = \frac{V_0 - V(D)}{V_0}, \quad (2)$$

где V_0 – полный объем жидкости, вытесненной из пор образца за все время измерения.

При этом значение $F(D_1) - F(D_2)$ будет соответствовать объему порового пространства, который приходится на поры с диаметрами в интервале (D_1, D_2) .

С другой стороны, измеряя для каждого значения D приращение объема вытесненной жидкости $\Delta V(D)$, приходящейся на малое приращение ΔD , можно получить дифференциальную функцию распределения пор по их диаметрам в виде

$$f(D) = -\frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta D}. \quad (3)$$

Фактически для каждого D значение $f(D)$ пропорционально вероятности присутствия в образце пор с диаметром, равным D . В этом случае, если на некотором интервале (D_1, D_2) функция $f(D)$ равна нулю (не происходит изменение объема вытесненной жидкости), то в образце отсутствуют поры с диаметрами от D_1 до D_2 . С другой стороны, положение локальных

максимумов этой функции указывает на наиболее вероятные значения диаметров пор в исследуемом образце.

Отметим особую роль, которую играет в этих измерениях пористая мембрана. Пусть некоторые каналы образца полностью свободны от жидкости. Тогда при отсутствии мембраны газ будет проникать в нижнюю часть рабочей камеры, что существенным образом исказит результаты измерений, так как будет препятствовать дальнейшему вытеснению жидкости из пор образца. При наличии мембраны силы поверхностного натяжения на границе раздела газ–жидкость в поровых каналах мембраны будут препятствовать утечке газа из рабочей камеры, и измерения могут быть продолжены вплоть до того момента, пока жидкость остается в порах мембраны. Таким образом, диаметр пор мембраны определяет наименьший диаметр пор образца, который можно измерить с помощью данного прибора.

В качестве иллюстрации к вышесказанному рассмотрим некоторую модель сквозных каналов. Пусть поровое пространство исследуемого образца состоит из одинаковых каналов, которые имеют вид круговых усеченных конусов (рис. 2).

В этом случае величина D отвечает значению некоторого локального диаметра прямого поперечного сечения конусного канала. В результате измерений получим, что в образце присутствуют поры с поперечными размерами от D_1 до D_2 ($D_2 > D_1$). Причем функция распределения $f(D)$ равна нулю при $D < D_1$, $D > D_2$ и постоянна при $D_1 < D < D_2$.

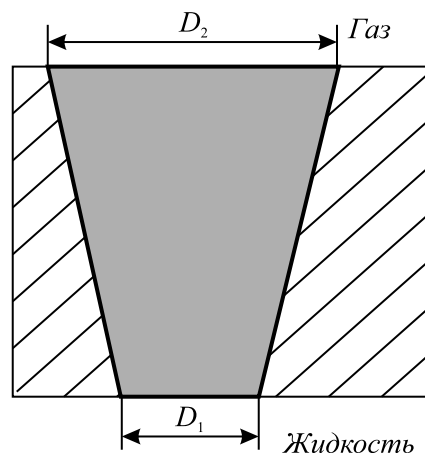


Рис. 2. Модель поровых каналов

Испытание эталонного образца

На первом этапе исследований была проведена проверка работоспособности прибора при измерении сквозных пор эталонного образца *E1*. Образец *E1* был выполнен в виде диска из оргстекла толщиной 2 мм и диаметром 37 мм. В средней части диска в пределах квадратной области 20×20 мм с помощью лазерного луча было выполнено 546 сквозных отверстий с поперечным размером от 80 мкм до 300 мкм. В этом случае расчетная пористость образца составляла примерно 3 %. В качестве примера на рис. 3 представлены фотографии входного и выходного отверстий одного из каналов.

С помощью микроскопа были получены фотографии всех отверстий каналов и проведено определение их размеров. В качестве характерного размера (диаметра) отверстия D использовалось среднее арифметическое трех различных (случайных) измерений поперечного размера его изображения.

Со стороны входа луча каналы имеют отверстия с характерным размером D от 260 до 290 мкм. На противоположной стороне диска диаметр выходных отверстий (см. рис. 3, б) D составляет 85–150 мкм.

По результатам измерений была построена функция распределения $w(D)$. Эта функция строилась следующим образом. Предполагалось, что величина D может принимать значение от 0 до 500 мкм. Весь интервал (0, 500) разбивался на от-

резки с шагом $\Delta = 10$ мкм. Далее подсчитывалось число измерений $N(D)$, результаты которых попадали в интервал $(D - 0,5 \cdot \Delta, D + 0,5 \cdot \Delta)$. Тогда

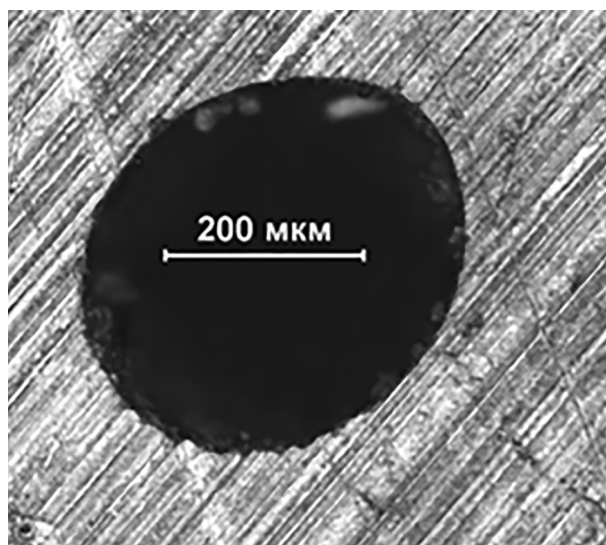
$$w(D) = k \cdot N(D), \quad (4)$$

где k – нормировочный коэффициент, такой, что максимум $w(D) = 1$.

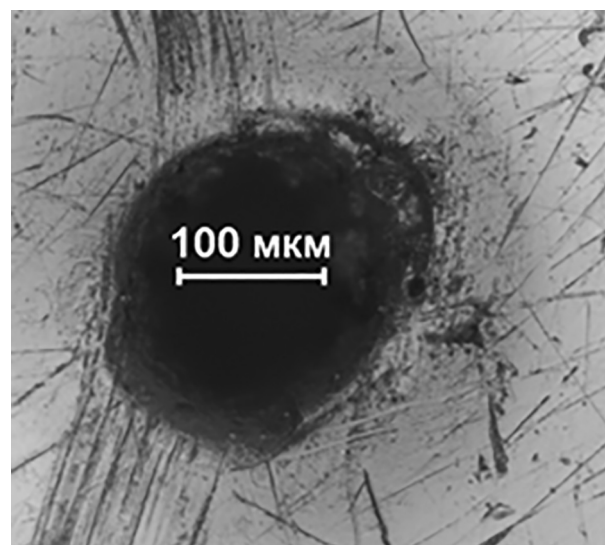
График функции $w(D)$ (рис. 4) свидетельствует о том, что она имеет три локальных максимума при $D = 90, 130, 270$ мкм. Было рассчитано среднее значение характерного диаметра: $\langle D \rangle = 220 \pm 15$ мкм.

Далее проводилось исследование порового пространства эталонного образца на порозиметре *LEP-100A*. После выполнения процедуры водонасыщения образец был помещен в рабочую ячейку прибора так, чтобы воздушная среда оказалась со стороны входных отверстий каналов.

По результатам, полученным с помощью порозиметра, была построена новая функция $g(D) = f(D)/\max[f(D)]$ (см. рис. 4). Среднее значение диаметра, рассчитанного для данного распределения, составляет $\langle D \rangle = 210 \pm 20$ мкм, что практически совпадает с аналогичным значением, полученным при микроскопических измерениях. На рисунке видно, что положения пиков функций $g(D)$ и $w(D)$, а также соотношение их амплитуд практически совпадают. То есть, оба способа измерения диаметров каналов эталонного образца указывают на одни и те же наиболее вероятные их средние значения. Таким образом, в результате данной проверки установлена адекватность измерений, выполняемых на порозиметре *LEP-100A*.



а



б

Рис. 3. Фотографии входного (а) и выходного (б) отверстий одного из каналов образца *E1*

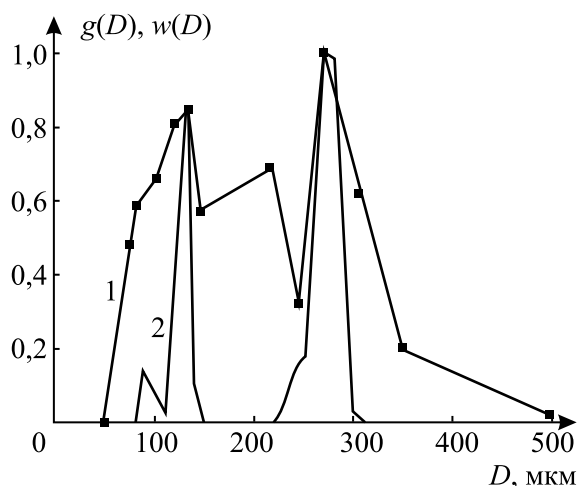


Рис. 4. Результаты измерений для образца Е1:
1 – $g(D)$; 2 – $w(D)$

Результаты испытаний образцов керамики

В следующей серии экспериментов исследовалось пространство поровых сквозных каналов керамических образцов, изготовленных на основе порошков корунда фракции $F100$ (средний размер частиц 150 мкм), которые подвергались механической обработке различной интенсивности в шаровой мельнице. Очевидно, что использование порошков, подвергшихся механической обработке в течение различного интервала времени, должно приводить к существенному изменению поровой структуры керамики, полученной на их основе. Методом полусухого прессования (давление 100 МПа) были изготовлены три партии цилиндрических образцов (Б1, Б2, Б3). Образцы имели следующие размеры: диаметр 30 ± 1 мм и высота $4,5 \pm 0,5$ мм (указан разброс размеров образцов в партиях). Каждая партия включала в себя по три образца. Обжиг образцов проводился при температуре $T = 1280 \pm 20$ °С. Шихту для формования образцов готовили из смеси технологического связующего (бентонитовая глина) (15 %) и порошка ко-

рунда (85 %), который подвергался механической обработке различной продолжительности. Для изготовления образцов серии Б1 использовался порошок без механической обработки, для образцов Б2 порошок корунда подвергался обработке в шаровой мельнице в течение 90 мин, для образцов Б3 порошок измельчали 25 ч. Выбор такого состава шихты объясняется следующим образом. В результате указанной термообработки спекание керамики осуществляется за счет плавления глины. При этом частицы корунда, не испытывая существенного изменения, образуют некоторый массив, поровое пространство которого целиком зависит от геометрических характеристик частиц основного порошка шихты. Отметим, что аналогичной методикой для изготовления опытных образцов керамик для фильтрующих элементов пользовались и другие авторы: например, в состав шихты для связки частиц корунда вводилась фарфоровая масса [4] или бентонитовая глина [10], использовалось легкоплавкое связующее оригинального состава [6].

В таблице 1 приведены средние (по партии) характеристики образцов Б1, Б2, Б3. Все образцы имеют примерно одинаковую открытую пористость, однако средний характерный размер сквозных пор уменьшается (что ожидаемо, см. [2]) с увеличением времени механической обработки порошка корунда.

Статистическая погрешность при определении средних величин не превышала 7 %. Более глубокий анализ структуры поровых каналов образцов показал наличие некоторых количественных различий между образцами внутри каждой группы, однако все качественные особенности поровой структуры, присущие той или иной группе образцов, сохраняются для каждого его представителя. Поэтому далее при анализе поровой структуры каждой группы образцов будут демонстрироваться результаты, полученные для их отдельных представителей.

Таблица 1

Средние характеристики образцов Б1, Б2, Б3

Образец	Открытая пористость, %	Средний размер сквозных пор $\langle D \rangle$, мкм	Наибольший размер сквозных пор $D_{\max}$, мкм	Наименьший размер сквозных пор $D_{\min}$, мкм
Б1	24	50	140	16
Б2	21	43	50	14
Б3	21	22	130	13

Рисунок 5 дает представление о распределении порового объема по диаметрам пор для образцов Б1, Б2 и Б3. Заметим, что здесь и далее под поровым пространством образцов подразумеваем только пространство сквозных пор керамики и не учитываем объем и распределение глухих пор. Видно, что в образцах Б1 и Б2 на крупные поры приходится большая часть порового пространства. Так, в образцах Б1 наибольший вклад ($\approx 50\%$) в поровое пространство вносят участки пор с диаметром от 50 до 60 мкм. Остальную часть порового пространства занимают участки пор с диаметрами от 15 до 40 мкм, причем на каждую группу размеров приходится от 5 до 10 % общего объема.

В образцах Б2 половина порового пространства представлена каналами с диаметром от 42 до 50 мкм, а остальная часть – каналами с диаметрами от 10 до 30 мкм. Напротив, в образцах Б3 основная часть порового пространства приходится на самые мелкие поры. Так, поры с диаметрами от 12 до 25 мкм составляют более 60 % порового объема. Для оставшихся 40 % объема характерно наличие более крупных пор с диаметрами 30–140 мкм, причем их количество снижается с увеличением диаметра.

Необходимо отметить такой интересный факт, для всех образцов доля пор с диаметрами менее 10 мкм незначительна.

Следующие результаты (рис. 6) более четко демонстрируют, какой набор значений диаметров пор соответствует каждому образцу. Здесь изображены графики функции $g(D)$ для образцов Б1, Б2, Б3.

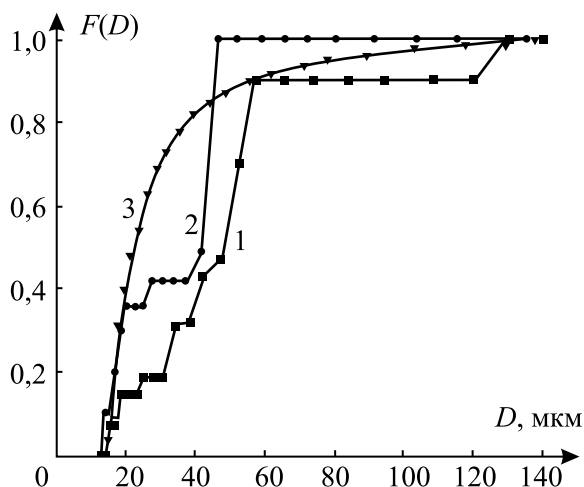
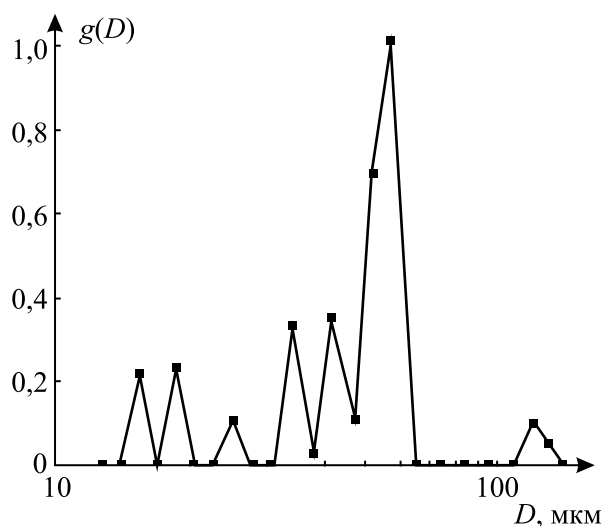
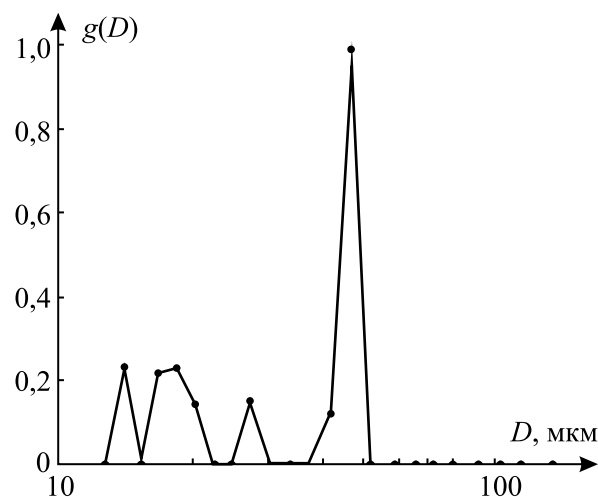


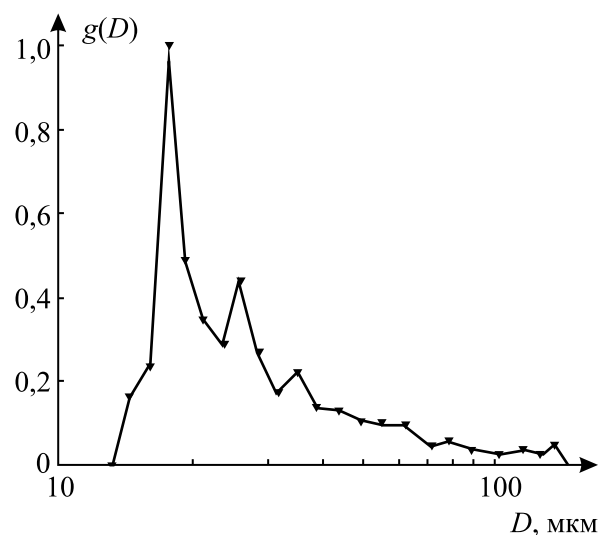
Рис. 5. Интегральная функция распределения поровых каналов по диаметрам $F(D)$ для образцов: 1 – Б1; 2 – Б2; 3 – Б3



а



б



в

Рис. 6. Функция $g(D)$:
а – образец Б1; б – образец Б2; в – образец Б3

Из рисунка 6 следует, что в образцах Б1 и Б3 присутствует довольно много крупных пор с диаметром порядка 120 мкм. В образцах Б2 такие поры отсутствуют. Кроме того, во всех образцах присутствуют поры с диаметрами от 10 мкм до 60 мкм. Однако характер распределения пор по размерам существенно различается. Для образцов Б1 и Б2 функция распределения имеет дискретный набор локальных максимумов. Так, для образцов Б1 этот набор имеет следующий состав: 14, 18, 24, 34, 43, 58, 140 мкм; для образцов Б2: 10, 18, 27, 48 мкм. С другой стороны, для образца из партии Б3 (см. рис. 6, в) характерна другая структура порового пространства, которая совершенно отличается от структуры предыдущих образцов. Видно, что поровое пространство образца представляет собой сеть каналов переменного сечения с монотонным набором значений диаметров от 10 мкм до 140 мкм.

Гранулометрический состав порошков и поровое пространство керамики

Таким образом, наблюдается два типа порового пространства. В первом случае (образцы Б1 и Б2) поровое пространство – это сеть каналов с дискретным набором значений диаметров, причем наибольший вклад в поровый объем вносит одна группа крупных пор. Другой тип порового пространства представлен образцами Б3. В этом случае поровое пространство состоит из каналов, диаметры которых образуют монотонно изменяющийся ряд значений. Наибольший объем порового пространства приходится на группу самых мелких каналов. Такое различие в структуре порового пространства, вероятно, следует искать в различии гранулометрического состава порошкового материала.

Для ответа на этот вопрос было проведено исследование по определению гранулометрических характеристик использованных порошков. Для этих целей применялся лазерный дифракционный анализатор размера частиц. При выполнении дисперсионного анализа порошковых проб с помощью этого прибора была получена дифференциальная функция распределения частиц порошка $q(d)$ по размерам d . Фактически, величина $q(d)$ соответствует счетной концентрации частиц размером d . Эта характеристика широко используется при анализе состава и структуры сыпучих материалов (см. например [2]).

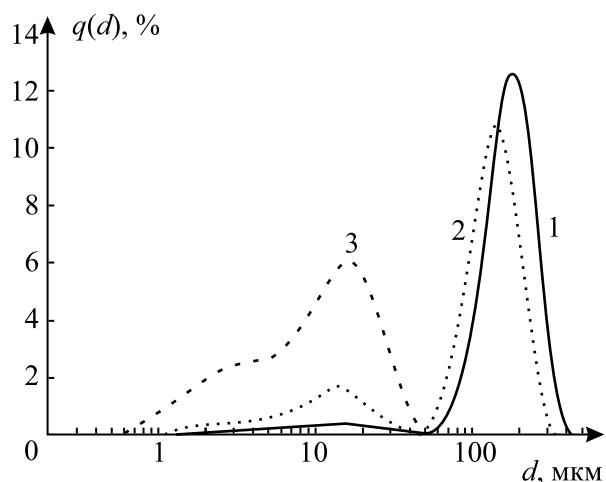


Рис. 7. Дифференциальная функция распределения частиц порошка по размерам для различной продолжительности t механической обработки:

1 – исходный порошок; 2 – $t = 1,5$ ч; 3 – $t = 25$ ч

На рисунке 7 представлены функции $q(d)$, полученные для порошков электрокорунда, которые подвергались механической обработке различной продолжительности t . Из графиков на рис. 7 следует, что до проведения обработки проба порошка содержала частицы с размерами от 60 мкм до 400 мкм, и $q(d)$ имеет один максимум при $d = 150$ мкм, причем размах распределения $\tau = 1,02$. Здесь

$$\tau = (d_{90} - d_{10})/d_{50},$$

где d_n определяется таким образом, что число частиц с диаметрами меньше d_n составляет n % всех частиц.

После непродолжительной механической обработки (1,5 ч) пробы порошка в шаровой мельнице количество крупных частиц в ней уменьшилось, но они по-прежнему присутствовали в пробе. Кроме того, положение максимума дифференциальной кривой распределения смещается в сторону уменьшения d , и при этом появляются частицы с диаметрами в диапазоне $1 < d < 10$ мкм. Вероятно, здесь наблюдается процесс деагломерации крупных частиц порошка или дробление немонолитных частиц. Такое небольшое механическое воздействие на порошок, приводящее к разрушению некоторых агрегатов, не приводит к существенному изменению функции распределения частиц по размерам. При более длительном механическом воздействии на частицы порошка происходит их дробление, что находит отражение

в виде функции $q(d)$. Максимум дифференциальной кривой распределения приходится на $d \approx 15$ мкм, причем размах распределения τ увеличивается более чем в два раза.

Таким образом, для изготовления образцов Б1 и Б2 использовались узкофракционные порошки (им соответствует распределение с размахом $\tau \approx 1$), которые, вероятно, не склонны к образованию агломератов, что приводит к образованию поровой структуры с небольшим набором характерных диаметров каналов. При этом среднее значение диаметра наибольшей части каналов монотонно меняется с изменением среднего значения размеров частиц порошка.

С другой стороны, для образцов Б3 использовался порошок с полидисперсным распределением (размах распределения $\tau > 2$). При этом, как отмечалось в работе [11], порошки, которые подвергались длительному измельчению (механической активации), склонны к образованию агломератов, и, следовательно, при компактировании такого порошка возможно образование поровых каналов не только между исходными частицами, но и их агломератами и агрегатами. Присутствие в компакте крупноразмерных агломератов (и агрегатов), по-видимому, может приводить и к образованию межагломератных пор (см. [3]), размеры которых существенно превосходят максимальный размер частиц порошка. В этом случае поровое пространство образцов представляет собой совокупность каналов, диаметры которых имеют широкий спектр значений.

Отсутствие во всех образцах мелких (менее 10 мкм) пор, можно объяснить тем, что такие поры заполняются расплавленными частицами связующего материала (глины).

Заключение

В результате проведенных исследований продемонстрирована возможность применения экструзионного порозиметра для определения количественных параметров поровой структуры пористой керамики. Показано, что большую часть порового пространства пористой керамики, изготовленной с применением узкофракционных порошков, составляют наиболее крупные поры, размер которых зависит от среднего размера частиц порошка. С другой стороны, если при производстве керамики используется порошок с полидисперсным фракционным составом, наблюдается широкий

спектр размеров поровых каналов, причем, чем мельче поры, тем больший вклад они вносят в поровое пространство керамики.

Полученная информация о значениях характерных диаметров сквозных каналов пористой керамики дает возможность целенаправленного получения материала с требуемой структурой, которая наиболее оптимальна для конкретного изделия. Так, однородность порового пространства керамического материала повышается, если при его получении применяются порошки с более узким фракционным составом. Следовательно, фильтрующие элементы, изготовленные на основе таких материалов, будут обладать повышенной производительностью и селективностью.

Работа выполнена на оборудовании и при поддержке сотрудников центра коллективного пользования «Научно-технологические технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет».

Список литературы

1. Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б. Создание новых пористых проницаемых керамических материалов и технологий изделий из них – реальный путь для технологического прорыва в основных отраслях промышленности // Новые огнеупоры. 2008. № 11. С. 103–109.
2. Химическая технология керамики: учеб. пособие для вузов / под ред. проф. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. – 496 с.
3. Галахов А.В. Структура порошкового компакта. Часть 1. Неоднородность упаковки частиц // Новые огнеупоры. 2014. № 5. С. 22–32.
4. Регулирование открытой пористости и прочности варьированием зернового состава керамики на основе электроплавленного корунда с фарфоровой связкой / А.В. Беляков, Зо Е Мо У, Н.А. Попова, Йе Аунг Мин, Чжо Лвин У // Новые огнеупоры. 2016. № 2. С. 34–37.
5. Галахов А.В. Структура порошкового компакта. Часть 2. Методы повышения однородности упаковки частиц // Новые огнеупоры. 2014. № 6. С. 33–37.
6. Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б. Разработка пористого проницаемого керамического материала и технологии фильтрующих элементов для свечевых фильтроваль-

- ных аппаратов // Новые огнеупоры. 2009. № 1. С. 103–109.
7. Cuperus F.P., Bargeman D., Smolders C.A. Permporometry: The determination of the size distribution of active pores in UF membranes // Journal of Membrane Science. 1992. Vol. 71. P. 57–67.
8. Akshaya Jena, Krishna Gupta. Accuracy and reproducibility of pore size determined by flow porometry // Proceedings of the 14th Annual Technical Conference, The American Filtration & Separation Society, May 1-4, 2001, Tampa, Florida, 2001. P.112–116.
9. Akshaya Jena, Krishna Gupta. Use of multiple test techniques for evaluation of complex pore structures // Proceedings of the 15th Annual Technical Conference, April 9-12, 2002, Galveston. Texas, American Filtration & Separation Society, 2002. P. 98–103.
10. Количественный анализ поровой структуры керамики с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображения / Б.Л. Красный, В.П. Тарасовский, А.Б. Красный, А.Ю. Омаров // Новые огнеупоры. 2013. № 8. С. 40–44.
11. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. – 239 с.

Материал поступил в редакцию 23.05.16

ПОНОМАРЕВ Сергей Григорьевич E-mail: s.ponomarev@mami.ru Тел.: (495) 276-33-83	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории материаловедения ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет». Сфера научных интересов: математическое моделирование физических процессов, композиционные материалы. Автор 28 научных работ.
РЫБАЛЬЧЕНКО Виктор Викторович E-mail: v.rybalchenko@mami.ru Тел.: (495) 620-35-66	Директор центра коллективного пользования «Научное оборудование в машиностроении» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет». Сфера научных интересов: материаловедение и композиционные материалы. Автор девяти научных работ.
ВАСИН Александр Александрович E-mail: a.vasin@mami.ru Тел.: (495) 276-32-51	Кандидат технических наук, заведующий лабораторией материаловедения ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет». Сфера научных интересов: технология керамики и огнеупоров. Автор 25 научных работ.
ГОРДЕЕВА Ольга Александровна E-mail: gordeeva@mami.ru Тел.: (495) 223-05-23 доб. 1274	Проректор по административной и правовой работе ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет». Сфера научных интересов: технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов. Автор четырех научных работ.