

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-12-53-59>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАНОПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИТТРИЯ

© Роман Дмитриевич Капустин, Валерий Иванович Уваров,
Андрей Олегович Кириллов*, Владислав Олегович Копытский

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мержанова РАН (ИСМАН), Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8; *e-mail: kira@ism.ac.ru

*Статья поступила 5 июня 2023 г. Поступила после доработки 28 июня 2023 г.
Принята к публикации 23 октября 2023 г.*

Пористые керамические материалы с высокой производительностью фильтрования широко применяются в условиях интенсивных химических, термических и радиационных нагрузок. В работе представлены результаты исследования структуры и морфологии порового пространства керамических мембран. В качестве основного компонента-заполнителя использовали ультрадисперсный тугоплавкий порошок Y_2O_3 . Синтез осуществляли методами компактирования, технологического горения и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Применение ультрадисперсных спекающих добавок с высокоразвитой поверхностью (MgO — 5 мкм, SiC — 3, SiO_2 — 5 мкм) позволило обеспечить энергоэффективность синтеза высокопористых керамических материалов при низких температурах. Анализ структуры и порового пространства методом ртутной порометрии и альтернативными методами показал, что средний размер пор в синтезированном 3D матричном композиционном материале на основе матрицы из ортосиликата иттрия с наполнителем из оксида иттрия составляет 1,1 мкм, эквивалентный гидравлический диаметр пор — около 100 нм. Разница определяется вариативностью сечений и высокой извилистостью поровых каналов. Поскольку плотность материала составляет 2,3 г/см³, а прочность на сжатие — около 2 МПа, материал может легко подвергаться механической обработке твердосплавными инструментами и перспективен для создания изделий сложной формы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке энергоэффективной технологии одностадийного производства фильтров на основе оксида иттрия с высокой пористостью для применения в условиях воздействия радиационного излучения, агрессивных сред и высоких температур.

Ключевые слова: порошки Y_2O_3 ; кубическая сингония; компактирование; керамика; фильтр; нанопористость.

STUDY OF THE STRUCTURE OF YTTRIUM-BASED NANOPOROUS CERAMIC MATERIALS

© Roman D. Kapustin, Valery I. Uvarov, Andrey O. Kirillov*, Vladislav O. Kopytsky

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, RAS (ISMAN), 8, ul. Academica Osipyana, Chernogolovka, Moscow obl., 142432, Russia; *e-mail: kira@ism.ac.ru

Received June 5, 2023. Revised June 28, 2023. Accepted October 23, 2023.

Porous ceramic materials with high filtration performance are widely used in conditions of high chemical, thermal and radiation loads. The results of studying the structure and morphology of the pore space of ceramic membranes are presented. Ultradispersed refractory powder Y_2O_3 was used as a main component-filler. The synthesis was carried out using compaction, technological combustion and self-propagating high-temperature synthesis. The use of ultradisperse sintering additives with highly developed surface (MgO — 5 μm , SiC — 3, SiO_2 — 5 μm) allowed us to ensure the energy efficiency of synthesis of high-porous ceramic materials at low temperatures. Analysis of the structure and pore space using mercury porometry and alternative methods showed that the average pore size in the synthesized 3D matrix composite material based on yttrium orthosilicate matrix with yttrium oxide filler is 1.1 μm , the equivalent hydraulic pore diameter being about 100 nm. The difference is attributed to the variability of cross sections and high tortuosity of pore channels. Since the density of the material is 2.3 g/cm³ and the compressive strength is about 2 MPa, it can be easily machined with carbide tools being a promising material for manufacturing products with complex shapes. The obtained results can be used in developing energy-effi-

cient technologies of one-stage production of yttrium oxide-based filters with high porosity to be used under conditions of exposure to radiation, aggressive media and high temperatures.

Keywords: Y_2O_3 powders; cubic syngony; compacting; ceramics; filter; nanoporosity.

Введение

Пористые материалы и изделия, включая полимерные фильтры, широко применяют для различных задач фильтрации [1 – 3]. К недостаткам полимерных фильтров относят низкие прочность, коррозионную и термическую стойкости, а также малый срок службы [4].

Отсутствие большинства этих недостатков у фильтров из пористых керамических материалов позволяет использовать их при высоких температурах и в агрессивных средах в процессах фильтрации, разделения газов, различных электрохимических процессах, когда применение других материалов зачастую технологически невозможно [3]. Отметим, что радиационная стойкость керамических изделий из различных оксидов (алюминия (поли- и монокристаллического), бериллия, скандия, иттрия, циркония и др.) существенно различается [5].

Наиболее сильное влияние облучение оказывает на механические свойства и коррозионную стойкость вследствие радиационного распухания кристаллической решетки материала и разрушения связей. Так, самое существенное деструктивное влияние на конструкционные узлы и элементы реакторов оказывает нейтронное облучение. Частицы — продукты ядерной реакции (например, нейтроны или ионы) — движутся с высокой скоростью до столкновения с препятствием. При соударении они передают свою кинетическую энергию атомам кристаллической решетки материалов, что приводит к каскаду атомных смещений и накоплению точечных дефектов в виде пар Френкеля [6].

Обратному процессу рекомбинации накопленных точечных дефектов препятствует каскадность их накопления. Анизотропность характера накапливаемых изменений зависит как от концентрации, так и конфигурации радиационных дефектов, определяемых анизотропией кристаллической решетки материала, подвергаемого бомбардировке. Чем ниже соразмерность трансляций (граней и углов) кристаллической решетки облучаемого материала, тем нестабильней процесс рекомбинации и выше анизотропия радиационного распухания. Таким образом, наиболее стабильными при воздействии радиации могут оставаться материалы, обладающие изотропной категорией системы кристаллической решетки, т.е. кубической [7].

Фильтрующие элементы из высокотемпературной керамики на основе оксида иттрия могут

не только выдерживать интенсивные радиационные и химические нагрузки, но и длительное время работать в условиях высоких плотностей потоков продуктов ядерного деления. Еще одно их преимущество — простота регенерации посредством периодического удаления накопившихся загрязнений (радиоактивной пыли) обратной продувкой или промывкой.

Эффективный синтез керамических материалов требует понимания механизмов регулирования пористости и проницаемости материалов в широких пределах, а также возможности получения материалов с заданной пористостью и величиной пор [8]. Необходима качественная оценка влияния структурно-размерных факторов на физико-механические характеристики синтезируемого материала.

Цель работы — исследование структуры и морфологии порового пространства керамических мембран (в том числе нанопористых) на основе оксида иттрия, синтезированных для фильтрующих элементов.

Материалы, методика, оборудование

В синтезируемом керамическом материале пористость и размер пор зависят от нескольких исходных технологических параметров, основные из которых — размер частиц исходных порошков, соотношение размера зерен заполнителя и связки в исходной шихте, а также давление прессования и режим термообработки материала.

Разработку функциональных радиационно-, термически- и коррозионно-стойких керамических материалов осуществляли на основе тугоплавкого порошка Y_2O_3 , обладающего кубической кристаллической решеткой. Отметим, что оксид иттрия имеет один важный технологический недостаток — инертность к спеканию, поэтому необходимо использовать либо высокие температуры обжига, либо специальные спекающие добавки, существенно снижающие эту температуру.

Для энергоэффективного синтеза высокопористых мембран с заданным размером пор на основе тугоплавких, инертных к спеканию компонентов применяли сочетание методов компактирования (прессования, экструзии), технологического горения и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [9, 10]. Это позволяло не использовать высокие температуры для спекания и упрочнения.

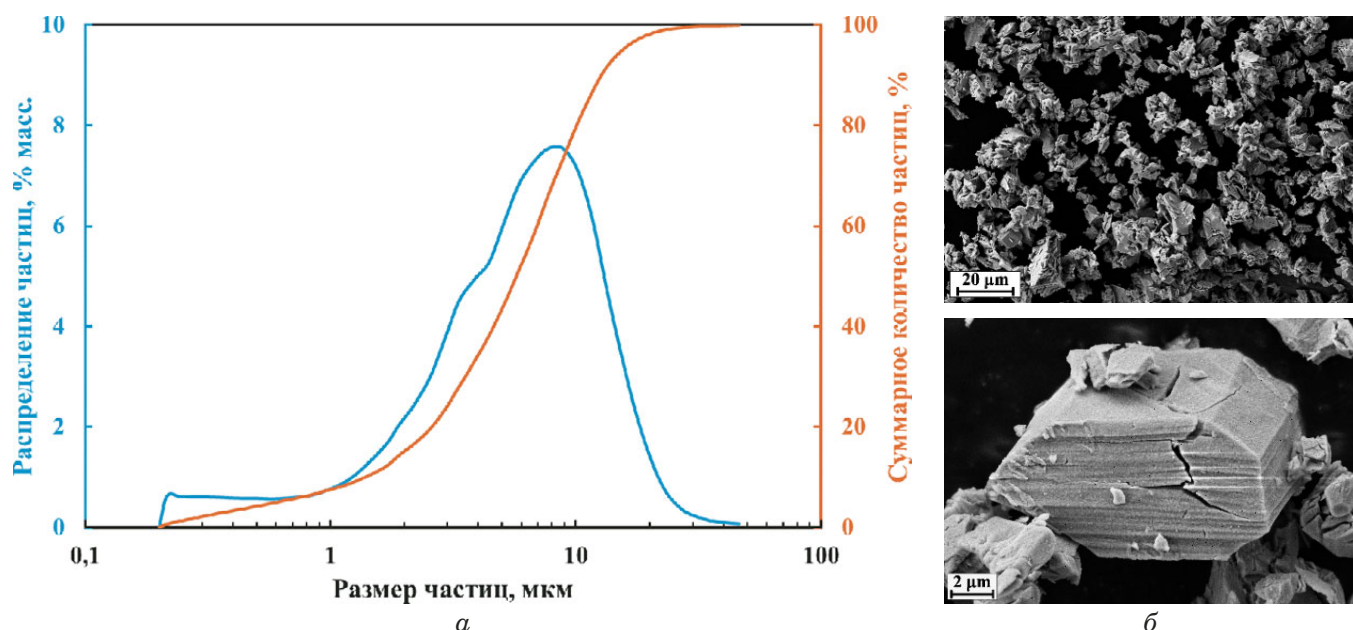


Рис. 1. Распределение частиц исходного порошка Y_2O_3 по размерам (а) и его микроструктура (б)

Fig. 1. Particle size distribution (a) and the microstructure (b) of the original Y_2O_3 powder

В качестве основного компонента (заполнителя) в исходной порошковой смеси применяли ультрадисперсный порошок Y_2O_3 марки Ито-В. Распределение частиц порошка по размерам определяли на лазерном анализаторе частиц Micro Sizer 201 [11]. Результат измерений представлен на рис. 1.

Размеры частиц заполнителя Y_2O_3 варьировались от 0,2 до 50 мкм, при этом основная масса частиц (80 %) обладала размерами от 3 до 20 мкм. Удельная поверхность исходного порошка Y_2O_3 составляла $3,2 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для интенсификации спекания и усиления связи между зернами заполнителя в качестве связки в исходную шихту вводили добавки ультрадисперсных компонент с высокоразвитой поверхностью: MgO — <5 мкм (ГОСТ 4526–75); SiC — ~3; SiO_2 — ~5 мкм (марки SYLOID AL-1 FP). Кроме того, для связки вводили порошок карбида кремния, приготовленный методом СВС. Полученный таким образом продукт синтеза включал β -фазу карбида кремния (90 % масс.) и представлял собой конгломераты, состоящие из частиц равноосной формы со средним диаметром 2 – 3 мкм.

Смешение порошка заполнителя Y_2O_3 со спекающими добавками проводили в смесителе типа drum tumbler в течение 2 ч (скорость — 30 об/мин), одноосное прессование — на гидравлическом прессе при давлении 40 – 70 МПа в течение 15 с. Полученные в форме диска (диаметр — 40, толщина — 8 мм) образцы (рис. 2) спекали в лабораторной камерной электропечи в среде воздуха при температуре 1400 °С.



Рис. 2. Синтезированный экспериментальный образец

Fig. 2. Synthesized experimental sample

Структуру синтезированных материалов (фазовый состав, размерности, формфакторы микроструктурных составляющих) исследовали методами рентгенофазового анализа (CuK α -излучение, $2\theta = 20 - 80^\circ$) и сканирующей электронной микроскопии (Zeiss Ultra+, Oxford Inca spectrometer and Aztec software). Открытую пористость изготовленных мембран определяли методом вакуумирования с последующим насыщением жидкости (ГОСТ 2409–80), удельную поверхность — одноточечным методом БЭТ (методом Брунауэра, Эммета и Теллера на основе теории полимолекулярной адсорбции) на приборе «Газохром-3101».

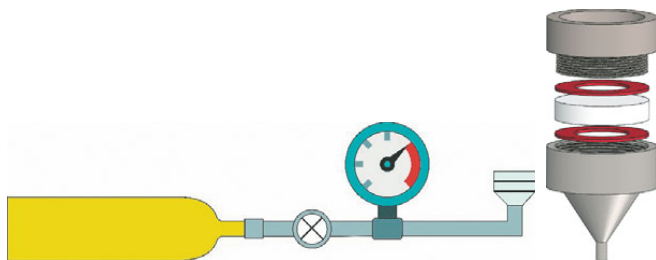


Рис. 3. Установка для определения размера пор керамических образцов

Fig. 3. Pore size test rig for ceramic samples

Размер полученных пор определяли также методом точки пузырька, для чего использовали специализированную лабораторную установку (рис. 3). Данный способ применим при исследовании полимерных ультра- и микрофильтрационных мембран с размером пор 0,1 – 15 мкм. Метод заключается в измерении минимального давления газа, требуемого для прохождения пузырька газа через поры плоской гидрофильной (гидрофобной) мембраны, пропитанной водой (спиртом).

Обсуждение результатов

Строение пористой керамики зависит от размера и формы зерен заполнителя, его соотношения со спекающейся упрочняющей тонкозернистой составляющей, от давления прессования, наличия и количества пластификаторов и жидких органических связок, облегчающих прессование, и от режимов термообработки [12, 13].

На основе массива эмпирических данных по синтезу пористых керамических материалов [14, 15] было определено, что для получения фильтров с целевым размером пор 100 – 200 нм исходный порошок-заполнитель Y_2O_3 необходимо смешать с ультрадисперсными спекающими добавками в соотношении 87:13 по массе.

Существенное влияние на порообразование оказывает также прилагаемое давление прессования, которое дает возможность регулировать пористость материала и в некоторых пределах менять размер пор, что позволяет получить материал с требуемыми свойствами.

Плотность образцов при холодном прессовании нелинейно возрастает с повышением давления прессования в пресс-формах, и кривая уплотнения порошкового материала включает три основные стадии [4, 16]. На первой происходит укладка частиц, прежде всего за счет устранения свободных пространств между ними и увеличения площади контактов в процессе взаимного скольжения частиц, но без их деформации. Вторая стадия не всегда ярко выражена. Основное ее проявление — упругая деформация (отталкива-

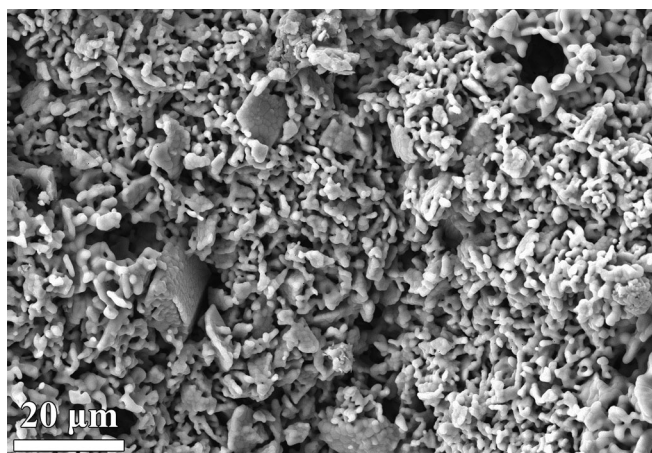


Рис. 4. Микроструктура излома образца

Fig. 4. Microstructure of the sample fracture

ние) частиц, поскольку большая часть пустот была ликвидирована на первой стадии. Вследствие этого частицы плотно соприкасаются друг с другом и оказывают сопротивление сжатию. На третьей стадии деформация частиц становится необратимой пластической либо происходит хрупкое разрушение частиц.

С увеличением плотности уменьшается поровое пространство в материале. Следовательно, зависимости пористости и размера пор от давления прессования будут обратными по отношению к кривой зависимости плотности от давления прессования.

Для достижения требуемых прочностных и эксплуатационных свойств мембраны следует проводить прессование в области давлений в пределах упругой деформации (вторая стадия). Экспериментально было установлено, что оптимальная область давлений прессования для используемой порошковой смеси — 40 – 70 МПа. В этих пределах возможно достижение целевого размера пор материала с обеспечением максимальной пористости при одновременном получении оптимальных физико-механических характеристик.

На рис. 4 приведена микроструктура излома пористого керамического образца. Морфология материала позволяет сделать вывод о высоко-развитой пористой структуре, представляющей собой трехмерную ячеистую сеть, которая несколько неоднородна по размеру и форм-фактору основных структурных элементов. Очевидно, это связано с тем, что порошок заполнителя при размере большинства зерен около 10 мкм обладал вариативностью размеров основной массы частиц в пределах 3 – 20 мкм.

Агрегаты оксида иттрия, частично сохранившиеся после прохождения процесса синтеза, равномерно распределены в объеме материала (см.

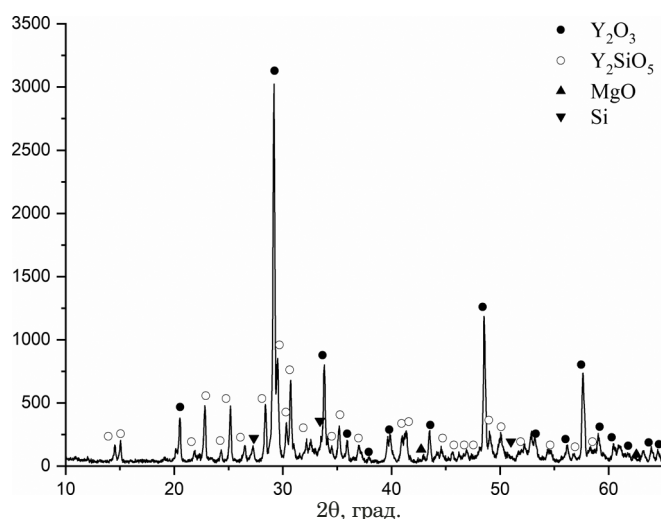


Рис. 5. Фазовый состав пористого керамического материала

Fig. 5. Phase composition of a porous ceramic material

рис. 4). При этом по краям частиц наблюдается наличие литых структур, образованных в результате жидкофазного спекания. Остальной объем материала составляют высокоразвитые дендритные структуры в виде непрерывной матрицы. Эти синтезированные структуры визуальнo идентифицируются как ортосиликат иттрия (Y_2SiO_5) [17, 18], образовавшийся в процессе спекания в жидкой фазе с участием связующих добавок. Добавки кремнийорганических связок в процессе синтеза образуют активный SiO_2 , взаимодействующий с оксидом иттрия с образованием Y_2SiO_5 .

Данные структуры формируют прочный каркас мембраны с развитой сетчато-ячеистой структурой. Морфология материала обладает неоднородностью в микромасштабе, но в макромасштабе она однородна во всех направлениях. Таким образом, синтезирован 3D матричный изотропный композиционный керамический материал с матрицей на основе ортосиликата иттрия и наполнителем из Y_2O_3 .

Поры в синтезированном материале имеют формы в основном округлые и эллипсоидные. Видимый размер пор варьируется от 0,2 до 2 мкм, что на порядок меньше размера частиц наполнителя (± 10 мкм). Однако определение пористости и размера пор образцов по снимкам электронной микроскопии затруднено, поскольку поры, как правило, характеризуются объемной пространственной структурой переменного диаметра.

Получили следующие результаты исследования порового пространства: средняя открытая пористость — 48 %, удельная поверхность — $1,8 \text{ м}^2/\text{г}$, эквивалентный гидравлический диаметр открытых пор — 100 нм.

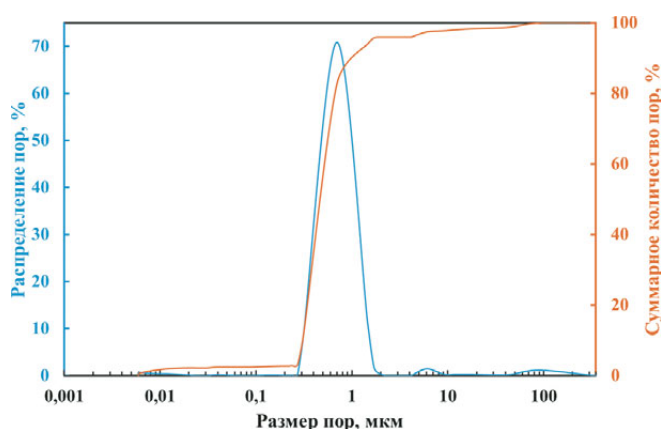


Рис. 6. Распределение пор по размерам в материале (метод ртутной порометрии)

Fig. 6. Pore size distribution in the material (mercury porosimetry method)

Анализ фазового состава излома пористого керамического материала, проведенный с помощью РФА, выявил наличие Y_2O_3 , ортосиликата иттрия и оксида магния (рис. 5). Заметим, что ортосиликат иттрия образовался в результате частичного взаимодействия порошков в процессе жидкофазного спекания ультрадисперсных добавок SiO_2 и карбида кремния.

Методом ртутной порометрии установили, что пористый керамический материал на основе заполнителя Y_2O_3 обладает практически идентичным медианным размером пор как по объему интрузии ртути, так и по площади поверхности. В сочетании с дендритными структурами ортосиликата иттрия сформирован материал с развитой поверхностью с обеспечением формирования в нем преобладающего количества пор наноразмерного диапазона (более 76 %) (рис. 6).

В таблице приведены физико-механические характеристики синтезированного композиционного материала, состоящего из матрицы на основе ортосиликата иттрия с наполнителем из оксида иттрия.

Проведенные исследования показали, что пористость и удельная поверхность, измеренные ртутной порометрией и альтернативными способами, хорошо коррелируют между собой для данного материала, большинство пор которого превышают 100 – 200 нм. Средний размер пор, определенный методом ртутной порометрии (1111 нм), примерно на порядок превосходит эквивалентный гидравлический диаметр каналов (100 нм) в материале, измеренный методом точки пузырька. Это связано прежде всего с вариативностью сечения открытых поровых каналов в сочетании с их высокой извилистостью — отношением истинного пути течения среды через поровое пространство материала к толщине образца.

Физико-механические характеристики синтезированного композиционного материала

Physical and mechanical characteristics of the synthesized composite material

Характеристика	Метод	Значение
Удельная поверхность, м ² /г	БЭТ	1,8
Общая поверхность пор, м ² /г	Ртутная порометрия	0,838
Медианный размер пор по объему, нм	Ртутная порометрия	1241,7
Медианный размер пор по поверхности, нм	Ртутная порометрия	981,4
Средний размер пор (4V/A), нм	Ртутная порометрия	1111
Размер пор, нм	По точке пузырька (ГОСТ 26849–86)	100
Плотность, г/см ³	Ртутная порометрия	2,3126
Пористость, %	Вакуумирование и насыщение (ГОСТ 2409–80)	48
Пористость, %	Ртутная порометрия	53,8252
Коэффициент извилистости	Ртутная порометрия	32
Проницаемость (по воздуху), мДарси	ГОСТ 11573–98	400
Проницаемость (жидкостная), мДарси	Ртутная порометрия	3,4896

Данное соотношение в синтезированном пористом материале на основе Y₂O₃, определенное методом ртутной порометрии, составило около 1/32. Такой очень высокий показатель извилистости можно объяснить 3D матричной морфологией микроструктуры, включающей пространственную сеть дендритных наноструктур на основе ортосиликата иттрия и заполнителя из Y₂O₃.

Заметим, что в исследованиях пористых сред широко применяют теорию «гидравлического радиуса», основанную на уравнении Козени и учитывающую коэффициент извилистости поровых каналов. Поэтому для синтезированного материала не только вариативность сечений каналов, но и их высокая извилистость (в данном случае коэффициент — 32) определяют существенные различия средних размеров пор, рассчитанных на основании результатов измерений методами ртутной порометрии и точки пузырька.

Обладая порами в основном субмикронного размера и эквивалентным гидравлическим диаметром каналов 100 нм, синтезированный пористый керамический материал газопроницаем, а его жидкостная проницаемость составляет около 3,5 мДарси. Такие характеристики позволяют создавать изделия (например, керамические фильтры) на его основе, способные работать в условиях воздействия высоких температур, агрессивных сред и радиационного излучения.

Заключение

При создании пористых керамических материалов на основе инертного к спеканию Y₂O₃ применяли сочетание методов компактирования, технологического горения и СВС, для повышения энергоэффективности синтеза — ультрадисперсные спекающие добавки с высокоразвитой поверхностью (MgO — <5 мкм, SiC — ~3, SiO₂ — ~5 мкм). Методами СЭМ и РФА установили, что

в результате фазовых превращений синтезируется ортосиликат иттрия в виде высокоразвитых сетчато-ячеистых дендритных наноструктур как следствие частичного взаимодействия порошков оксида иттрия и ультрадисперсных добавок в процессе жидкофазного спекания. Анализ структуры и параметров порового пространства методом ртутной порометрии и альтернативными методами выявил высокую корреляцию измеренных параметров пористости и удельной поверхности для исследуемого материала, размеры большинства пор которого превышают 100 – 200 нм. Однако средний размер пор, определенный методом ртутной порометрии (1111 нм), примерно на порядок превышает эквивалентный гидравлический диаметр каналов (100 нм), измеренный методом точки пузырька, вследствие неоднородности пространственной структуры и высокой извилистости поровых каналов.

Синтезирован 3D матричный композиционный материал на основе матрицы из ортосиликата иттрия с наполнителем из оксида иттрия (открытая пористость — более 50 %, удельная поверхность — около 1,8 м²/г). Средний размер пор в материале — 1,1 мкм, при этом эквивалентный гидравлический диаметр пор — около 100 нм, разница определяется вариативностью сечений и высокой (коэффициент — 32) извилистостью поровых каналов. Поскольку плотность материала — 2,3 г/см³, а прочность на сжатие — около 2 МПа, он легко подвергается механической обработке твердосплавными инструментами и перспективен для создания изделий сложной формы.

Финансирование

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-23-00739).

ЛИТЕРАТУРА

1. Артюшин В. Р., Волокитин Г. Г., Лысак Г. В. и др. Система очистки сточных вод с использованием полипропиленового тонковолокнистого материала / Вестник ТГАСУ. 2011. Т. 1. № 30. С. 170 – 177.
2. Weston M. H., Peterson G. W., Browe M. A., et al. Removal of airborne toxic chemicals by porous organic polymers containing metal-catecholates / Chem. Commun. 2013. Vol. 29. P. 2995 – 2997. DOI: 10.1039/c3cc40475g
3. Chmielewski A., Harasimowicz M., Zakrzewska-Trznadel G. Membrane technologies for liquid radioactive waste treatment / Czech. J. Phys. 1999. Vol. 49. N 1. P. 979 – 985. DOI: 10.1007/s10582-999-1027-y
4. Сирота В. В., Груздева Е. В., Иванисенко В. В. Влияние давления прессования на структуру и механические свойства керамики ZrO_2 — 8 % Y_2O_3 / Научные ведомости БелГУ. 2012. Т. 11. № 130. С. 127 – 133.
5. Астапова Е. С., Костюков Н. С. Влияние реакторного облучения на $\alpha-Al_2O_3$ в электроизоляционной керамике / Атомная энергия. 1995. Т. 78. С. 336 – 338.
6. Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С. и др. Моделирование образования каскада смещений и переходных ионизационных процессов в кремниевых полупроводниковых структурах при нейтронном воздействии / Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 9. С. 1279 – 1284. DOI: 10.21883/FTP.2019.09.48139.23
7. Балкевич В. Л. Техническая керамика. — М.: Стройиздат, 1984. — 256 с.
8. Uvarov V. I., Kapustin R. D., Kirillov A. O., et al. Influence of structural-dimensional factor and catalytically active additives of Fe_2O_3/Cr_2O_3 in $\alpha-Al_2O_3$ -based membranes on hydrocarbon dehydrogenation / J. As. Ceram. Soc. 2021. Vol. 9. N 3. P. 806 – 814. DOI: 10.1080/21870764.2021.1920133
9. Borovinskaya I., Merzhanov A., Uvarov V. Capillary-porous SHS materials for filtration of liquids and gases / Science-production. 2001. Vol. 10. P. 28 – 32.
10. Levashov E. A., Mukasyan A. S., Rogachev A. S., et al. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings / Int. Mater. Rev. 2017. Vol. 62. P. 203 – 239. DOI: 10.1080/09506608.2016.1243291
11. Карпюк П. В., Кузнецова Д. Е., Богатов К. Б., Досовицкий Г. А. Определение гранулометрического состава порошков алюмоиттриевого граната методом лазерной дифракции / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 9. С. 35 – 40.
12. Бакунов В. С., Балкевич В. Л., Гузман И. Я., Лукин Е. С. Практикум по технологии керамики и огнеупоров. — М.: Стройиздат, 1972. — 352 с.
13. Гузман И. Я. Химическая технология керамики: учеб. пособие для вузов. — М.: Стройматериалы, 2003. — 496 с.
14. Uvarov V. I., Kapustin R. D., Fedotov A. S., et al. Synthesis of porous ceramic materials for catalytically active membranes by technological combustion and sintering / Glass Ceram. 2020. Vol. 77. P. 221 – 225. DOI: 10.1007/s10717-020-00275-8
15. Uvarov V. I., Kapustin R. D., Kirillov A. O. Nanoporous high-temperature filters based on ceramic SHS materials / Ceram. Int. 2020. Vol. 46. N 14. P. 23180 – 23185. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.098
16. Остроушко А. А., Могильников Ю. В. Физико-химические основы получения твердотельных материалов электронной техники: учеб. пособие для вузов. — Екатеринбург: Уральский ун-т, 2011. — 158 с.
17. Suna Z., Wang J., Li M., et al. Mechanical properties and damage tolerance of Y_2SiO_5 / J. Eur. Ceram. Soc. 2008. Vol. 28. P. 2895 – 2900. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.04.029
18. Wu Z., Sun L., Wang J. Synthesis and characterization of porous Y_2SiO_5 with low linear shrinkage, high porosity and high strength / Ceram. Int. 2016. Vol. 42. P. 14894 – 14900. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.07.014

REFERENCES

1. Artyushin V. R., Volokitin G. G., Lysak G. V., et al. Waste-water treatment system using polypropylene thin fiber material / Vestn. TGASU. 2011. Vol. 1. N 30. P. 170 – 177 [in Russian].
2. Weston M. H., Peterson G. W., Browe M. A., et al. Removal of airborne toxic chemicals by porous organic polymers containing metal-catecholates / Chem. Commun. 2013. Vol. 29. P. 2995 – 2997. DOI: 10.1039/c3cc40475g
3. Chmielewski A., Harasimowicz M., Zakrzewska-Trznadel G. Membrane technologies for liquid radioactive waste treatment / Czech. J. Phys. 1999. Vol. 49. N 1. P. 979 – 985. DOI: 10.1007/s10582-999-1027-y
4. Sirota V. V., Gruzdeva E. V., Ivanisenko V. V. Influence of pressing pressure on structure and mechanical properties of ceramics ZrO_2 — 8 % Y_2O_3 / Nauch. Vedom. BelGU. 2012. Vol. 11. N 130. P. 127 – 133 [in Russian].
5. Astapova E. S., Kostyukov N. S. Influence of reactor irradiation on $\alpha-Al_2O_3$ in electric insulating ceramics / Atom. Énergiya. 1995. Vol. 78. P. 336 – 338 [in Russian].
6. Zabavichev I. Yu., Potekhin A. A., Puzanov A. S., et al. Modeling of displacement cascade formation and transient ionization processes in silicon semiconductor structures under neutron effect / Physics and technique of semiconductors. 2019. Vol. 53. N 9. P. 1279 – 1284 [in Russian]. DOI: 10.21883/FTP.2019.09.48139.23
7. Balkevich V. L. Technical ceramics. — Moscow: Stroyizdat, 1984. — 256 p. [in Russian].
8. Uvarov V. I., Kapustin R. D., Kirillov A. O., et al. Influence of structural-dimensional factor and catalytically active additives of Fe_2O_3/Cr_2O_3 in $\alpha-Al_2O_3$ -based membranes on hydrocarbon dehydrogenation / J. As. Ceram. Soc. 2021. Vol. 9. N 3. P. 806 – 814. DOI: 10.1080/21870764.2021.1920133
9. Borovinskaya I., Merzhanov A., Uvarov V. Capillary-porous SHS materials for filtration of liquids and gases / Science-production. 2001. Vol. 10. P. 28 – 32.
10. Levashov E. A., Mukasyan A. S., Rogachev A. S., et al. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings / Int. Mater. Rev. 2017. Vol. 62. P. 203 – 239. DOI: 10.1080/09506608.2016.1243291
11. Karpyuk P. V., Kuznetsova D. E., Bogatov K. B., Dosovitsky G. A. Determination of the YAG Powder Particle Size Distribution by Laser Diffraction Method / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2017. Vol. 83. N 9. P. 35 – 40 [in Russian].
12. Bakunov V. S., Balkevich V. L., Guzman I. Ya., Lukin E. S. Workshop on the technology of ceramics and refractories. — Moscow: Stroyizdat, 1972. — 352 p. [in Russian].
13. Guzman I. Ya. Chemical technology of ceramics. — Moscow: Stroymaterialy, 2003. — 496 p. [in Russian].
14. Uvarov V. I., Kapustin R. D., Fedotov A. S., et al. Synthesis of porous ceramic materials for catalytically active membranes by technological combustion and sintering / Glass Ceram. 2020. Vol. 77. P. 221 – 225. DOI: 10.1007/s10717-020-00275-8
15. Uvarov V. I., Kapustin R. D., Kirillov A. O. Nanoporous high-temperature filters based on ceramic SHS materials / Ceram. Int. 2020. Vol. 46. N 14. P. 23180 – 23185. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.098
16. Ostroushko A. A., Mogilnikov Yu. V. Physico-chemical bases of production of solid-phase materials of electronic engineering textbook for universities. — Yekaterinburg: Uralsky universitet, 2011. — 158 p. [in Russian].
17. Suna Z., Wang J., Li M., et al. Mechanical properties and damage tolerance of Y_2SiO_5 / J. Eur. Ceram. Soc. 2008. Vol. 28. P. 2895 – 2900. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.04.029
18. Wu Z., Sun L., Wang J. Synthesis and characterization of porous Y_2SiO_5 with low linear shrinkage, high porosity and high strength / Ceram. Int. 2016. Vol. 42. P. 14894 – 14900. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.07.014