

УДК 54.058

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-2-55-63

Синтез нанопористых керамических материалов для фильтрации жидкостей и газов методом технологического горения

© 2020 г. М.И. Алымов, В.И. Уваров, Р.Д. Капустин, А.О. Кириллов, В.Э. Лорян

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН)
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская обл.

Статья поступила в редакцию 05.12.19 г., доработана 21.01.20 г., подписана в печать 31.01.20 г.

Проведены экспериментально-аналитические исследования по синтезу керамического материала на основе системы Ti–Al, обладающего наноразмерной пористой структурой. Результаты предыдущих исследований коллектива авторов показали, что пористые керамические материалы, предназначенные для фильтрации жидкостей и газов, целесообразно получать не путем послойного горения, а в режиме теплового взрыва (по всему объему образца). С применением метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) были получены нанопористые керамические мембраны из смеси порошков, мас. %: 40Ti + 60Al в одну стадию с образованием $TiAl_3$. Установлено, что синтезируемый материал состоит из основной фазы $TiAl_3$ с незначительным количеством окислившегося в Al_2O_3 и непрореагировавшего алюминия. Анализ микроструктуры излома образцов показал, что полученный материал обладает развитой поверхностью и высокой открытой пористостью. Эмпирически определенная ее величина составляет до 48 %, а величина пор – от 0,1 до 0,2 мкм. Эффективность полученного пористого материала для керамического СВС-фильтра на основе Ti–Al достигает 99,999 %, сопротивление газовому потоку – 100 мм вод. ст., фильтрационный показатель равен 0,062. Производительность ультрафильтрации газов составляет до 40 л/(см²·ч) при перепаде давления на фильтре 2 кПа, а воды – от 2 до 10 л/(см²·ч) при перепаде давления на фильтре 0,1 МПа. Изготовленные таким образом мембраны из керамических материалов с градиентной нанопористой структурой могут использоваться в качестве фильтроэлементов для малых установок, позволяющих производить тонкую очистку воды от бактерий, вирусов и растворенного органического углерода, а также для тонкой очистки воздуха и технологических газов от дисперсных микропримесей и радиоактивных аэрозолей. Разработанные мембранные СВС-фильтры также могут востребованы в установках, работающих в агрессивных средах и/или при высоких температурах (до 1000 °C).

Ключевые слова: мембрана, нанопористая структура, керамика, фильтры, горение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), тепловой взрыв.

Алымов М.И. – докт. техн. наук, чл.-кор. РАН, директор ИСМАН (142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Акад. Осипяна, 8). E-mail: director@ism.ac.ru.

Уваров В.И. – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) ИСМАН. E-mail: uvar@ism.ac.ru.

Капустин Р.Д. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории ударно-волновых процессов ИСМАН. E-mail: kapustin-roman@mail.ru.

Кириллов А.О. – аспирант, мл. науч. сотрудник лаборатории высокоэнергетических методов синтеза сверхвысокотемпературных керамических материалов ИСМАН. E-mail: avanfer@yandex.ru.

Лорян В.Э. – докт. техн. наук, зав. лабораторией СВС ИСМАН. E-mail: loryan@ism.ac.ru.

Для цитирования: Алымов М.И., Уваров В.И., Капустин Р.Д., Кириллов А.О., Лорян В.Э. Синтез нанопористых керамических материалов для фильтрации жидкостей и газов методом технологического горения. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. No. 2. С. 55–63.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-2-55-63.

Alymov M.I., Uvarov V.I., Kapustin R.D., Kirillov A.O., Loryan V.E.

Synthesis of nanoporous ceramic materials for filtration of liquids and gases by technological combustion method

Experimental and analytical studies on the synthesis of a Ti–Al-based ceramic material with a nanoscale porous structure were conducted. The results of previous studies conducted by the authors showed that it is reasonable to obtain porous ceramic materials designed for filtration of liquids and gases by thermal explosion (throughout the sample) rather than by layer-by-layer

combustion. Self-propagating high-temperature synthesis (SHS) was used to obtain nanoporous ceramic membranes from a mixture of powders, wt.%: 40Ti + 60Al in one stage with the $TiAl_3$ formation. It was found that the synthesized material consists of the main phase $TiAl_3$ with a small amount of aluminum oxidized into Al_2O_3 and unreacted. The microstructural analysis of the sample fracture showed that the resulting material has a developed surface and high open porosity. Empirically investigated open porosity is up to 48%, and the pore size ranges from 0.1 to 0.2 μm . The efficiency of the porous material obtained for the Ti-Al-based ceramic SHS filter reaches 99.999 %, gas flow resistance is 100 mmHg, filtration index is 0.062. Gas ultrafiltration capacity is up to 40 l/(cm²·h) at a pressure drop on the filter of 2 kPa, and water ultrafiltration capacity ranges from 2 to 10 l/(cm²·h) at a pressure drop on the filter of 0.1 MPa. Membranes made of ceramic materials with a gradient nanoporous structure by this method can be used as filter elements for small units providing fine water cleaning from bacteria, viruses, dissolved organic carbon, as well as for fine cleaning of air, process gases from dispersed micro-impurities and radioactive aerosols. The membrane SHS filters developed can also be used in units operating in aggressive environments and/or at high temperatures (up to 1000 °C).

Keywords: membrane, nanoporous structure, ceramics, filters, combustion, self-propagating high-temperature synthesis (SHS), thermal explosion.

Alymov M.I. – Dr. Sci. (Tech.), Corresponding member of Russian Academy of Sciences, Director of Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN) (142432, Russia, Moscow reg., Chernogolovka, Acad. Osipyan str., 8). E-mail: director@ism.ac.ru.

Uvarov V.I. – Cand. Sci. (Tech.), Leading research scientist, Laboratory of self-propagating high-temperature synthesis, ISMAN. E-mail: uvar@ism.ac.ru.

Kapustin R.D. – Cand. Sci. (Tech.), Senior research scientist, Laboratory of shock-wave processes, ISMAN. E-mail: kapustin-roman@mail.ru.

Kirillov A.O. – Post-graduate student, Junior researcher, Laboratory of high-energy methods of synthesis of ultrahigh-temperature ceramic materials, ISMAN. E-mail: avanfer@yandex.ru.

Loryan V.E. – Dr. Sci. (Tech.), Head of Laboratory of self-propagating high-temperature synthesis, ISMAN. E-mail: loryan@ism.ac.ru.

Citation: Alymov M.I., Uvarov V.I., Kapustin R.D., Kirillov A.O., Loryan V.E. Synthesis of nanoporous ceramic materials for filtration of liquids and gases by technological combustion method. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2020. No. 2. P. 55–63 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-2-55-63.

Введение

В настоящее время для проведения разделения или очистки газов и жидкостей от микро- и макрозагрязнений существует широкий выбор различных методик, таких как перегонка и ректификация, адсорбция и экстракция и др. [1–3]. Одним из наиболее энергоэффективных способов для осуществления данных процессов является применение полупроницаемых мембран. В частности, опреснение морской воды мембранным методом (обратным осмосом [4]) требует энергозатрат всего порядка 2,0–2,5 кВт·ч/м³, что как минимум на порядок меньше, чем требуется для ее дистилляции [5, 6].

В нефтехимической и химической отраслях промышленности они применяются для разделения азеотропных смесей, выделения из многокомпонентных растворов высокомолекулярных соединений, а также их концентрирования или очистки.

В биотехнологии и медицинской промышленности мембраны используются для выделения и очистки биологически активных веществ, вакцин, ферментов и т.п., в пищевой промышленности — для концентрирования фруктовых и овощных со-

ков, а также молока, получения высококачественного сахара, очистки винно-водочных изделий и т.п. Широкое применение нашли баромембранные методы при обработке воды и водных растворов, а также очистке сточных вод [7].

Широкое распространение получили мембраны с анизотропной структурой (градиентной пористостью), которые имеют поверхностный тонкопористый слой толщиной 1–100 мкм (называемый «активным» или «селективным»), представляющий собой селективный барьер, на котором разделяются компоненты [8]. Анизотропная структура мембран позволяет регенерировать их с помощью обратного тока очищенной жидкости или газа [9]. В зависимости от процесса фильтрования жидкости применяют мембраны с различной величиной пор селективного слоя (d):

Процесс	d , мкм
Обратный осмос.....	0,0001–0,001
Ультрафильтрация.....	0,001–0,02
Микрофильтрация	0,02–10,0

Современные фильтры для тонкой очистки воздуха и технологических газов от дисперсных микропримесей также имеют анизотропную структуру [10, 11].

Следует отметить, что производимые в настоящее время органические полимерные фильтры обладают существенными недостатками, такими как низкие показатели прочности, коррозионной стойкости и термостойкости, а также неимение сорбционных свойств и т.п. [12–15]. Большинство из них отсутствуют у фильтров из пористых керамических материалов, которые используются, например, когда процессы фильтрации, разделения газов, различные электрохимические процессы и т.п. проводятся при высоких температурах и в агрессивных средах. Другие материалы здесь оказываются непригодными. Особым преимуществом таких фильтров является возможность их регенерирования путем термообработки или промывки кислотами либо другими растворителями [16].

Из литературы известны работы по получению пористых материалов, например на основе TiAl_3 , путем статического прессования с последующим реактивным спеканием [17]. Однако его применение для производства пористых материалов технологически затруднено, а сам способ требует существенных энергозатрат.

Также зачастую у фильтров из однослойного пористого материала, полученного методом прессования и спекания, с изотропным распределением пористости и величины пор наблюдается быстрое снижение проницаемости из-за закупорки пор коллоидными и взвешенными частицами, содержащимися в фильтруемых растворах [18].

В настоящее время широко применяется самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [19] неорганических веществ, который успешно конкурирует с традиционными печными методами при создании прогрессивной энергосберегающей и безотходной технологии получения керамики в ходе реакции в режиме теплового взрыва [20].

Проведение процессов СВС при давлении ниже атмосферного позволяет эффективно получать пористые материалы на основе тугоплавких соединений. В работе [8] было показано, что пористая структура, например в системах $\text{Ti}-\text{C}$, образуется в волне горения путем вспенивания жидкого компонента (металла) примесным газовыделением. Процесс СВС для изготовления высокотемпературных материалов, в том числе пористых, явля-

ется энергетически выгодным, так как разогрев шихты, синтез и спекание конечных материалов в основном происходят не за счет внешнего нагрева, а за счет выделения тепла при протекании экзотермической химической реакции между компонентами шихты с большим тепловыделением. Это обеспечивает возможность распространения волны горения в самоподдерживающем режиме.

Технология СВС характеризуется высокой температурой синтеза (1500–4000 °С) и большой скоростью распространения фронта горения (0,5–15 см/с), которые обеспечивают высокую производительность процесса и чистоту материала [21]. Естественно, что указанные преимущества делают весьма заманчивым использование этого метода для синтеза многих тугоплавких соединений, в том числе мембран с высокой пористостью и необходимым размером пор, отвечающих основным требованиям, таким как коррозионная стойкость, термостойкость и др.

Целью данной работы являлось создание нанопористых керамических материалов для фильтроэлементов малых установок, позволяющих производить тонкую очистку воды от бактерий, вирусов, растворенного органического углерода, а также воздуха и технологических газов от дисперсных микропримесей и радиоактивных аэрозолей.

Методы исследования и используемые материалы

Методика подготовки экспериментальных образцов предусматривала приготовление порошковых смесей сухим способом в барабанах при скорости вращения 30 об/мин в течение 2 ч. Для получения шихты использовалась смесь порошков Ti (марки ПТОМ) и Al (АСД-4) в массовом соотношении 40 : 60 соответственно.

Микроструктуры порошка алюминия со средним размером частиц $d \sim 10$ мкм и титана с $d = 15\text{--}20$ мкм показаны на рис. 1. Частицы Ti образуют конгломераты, которые разрушаются мелющими телами в шаровой мельнице в ходе механоактивации смеси.

По результатам анализа микроструктур каких-либо значительных дополнительных включений в исходных порошках не обнаружено. Полученную шихту загружали в графитовую пресс-форму и подвергали спеканию при температуре 1395 °С в вакуумной печи. На рис. 2 представлен режим термохимического синтеза для системы $\text{Ti}-\text{Al}$.

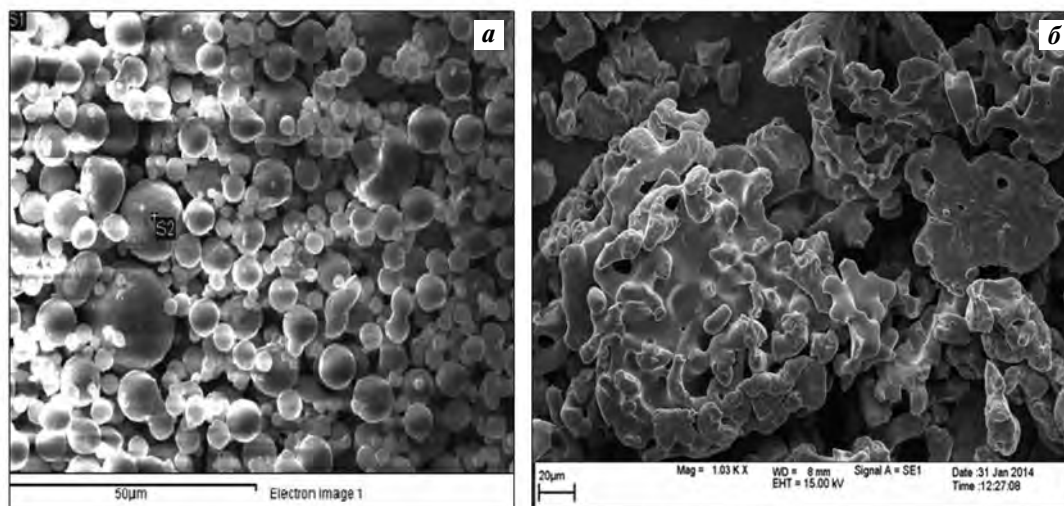


Рис. 1. Микроструктура исходных порошков Al (а) и Ti (б)

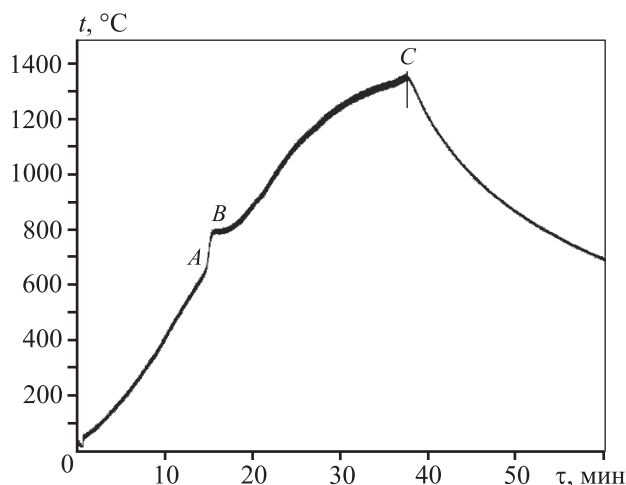


Рис. 2. Режим термохимического синтеза образца со стадией теплового взрыва

A и *B* – начало и окончание процесса теплового взрыва соответственно, *C* – начало процесса плавления материала с последующей релаксацией

Так как главным для фильтров является наличие сквозных открытых пор (т.е. отсутствие закрытой пористости), представлялось целесообразным проводить синтез пористого материала не методом послойного горения, а в режиме теплового взрыва (по всему объему образца). Таким образом, исходную шихту внешним нагревом доводили до температуры самовоспламенения (которая примерно равна $t_{пл}$ Al), после чего происходило самопроизвольное горение шихты по объему в режиме теплового взрыва. Далее температуру образца внешним нагревом доводили до температуры начала плавления

с последующим образованием $TiAl_3$ по эвтектической реакции согласно диаграмме состояния Ti–Al (рис. 3).

Из некоторых исследований [22] известно, что при $t \sim 1300\div 1350$ °C скорость диффузии алюминия значительно больше, чем титана в фазе $TiAl_3$, которая является единственной фазой, образующейся в ходе твердой диффузионной реакции Ti и Al. Движение и расход элемента Al должны быть уравновешены противоположным потоком вакансий, что приведет к их повышенному количеству вблизи исходных положений атомов Al. Избыточные вакансии могут конденсироваться в поры, чтобы уменьшить свободную энергию Гиббса для системы, т.е. потребление металла Al приводит непосредственно к образованию пор. Максимальная открытая пористость сплавов Ti–Al составляет ≈ 59 % при массовом соотношении Ti : Al = 40 : 60. При дальнейшем повышении содержания Al открытая пористость начинает постепенно уменьшаться, так как остаточный Al, когда он выходит за пределы своей температуры плавления, становится жидким и покрывает зерна $TiAl_3$ [22].

Методика эксперимента предусматривала проведение рентгенофазового анализа синтезированных образцов, а также анализ микроструктуры их изломов методом СЭМ для оценки размерности структурных составляющих пористого материала. Однако по снимкам электронной микроскопии невозможно получить точную информацию о пористости образцов, поскольку поры, как правило, имеют объемную пространственную структуру переменного диаметра. Величина открытых пор –

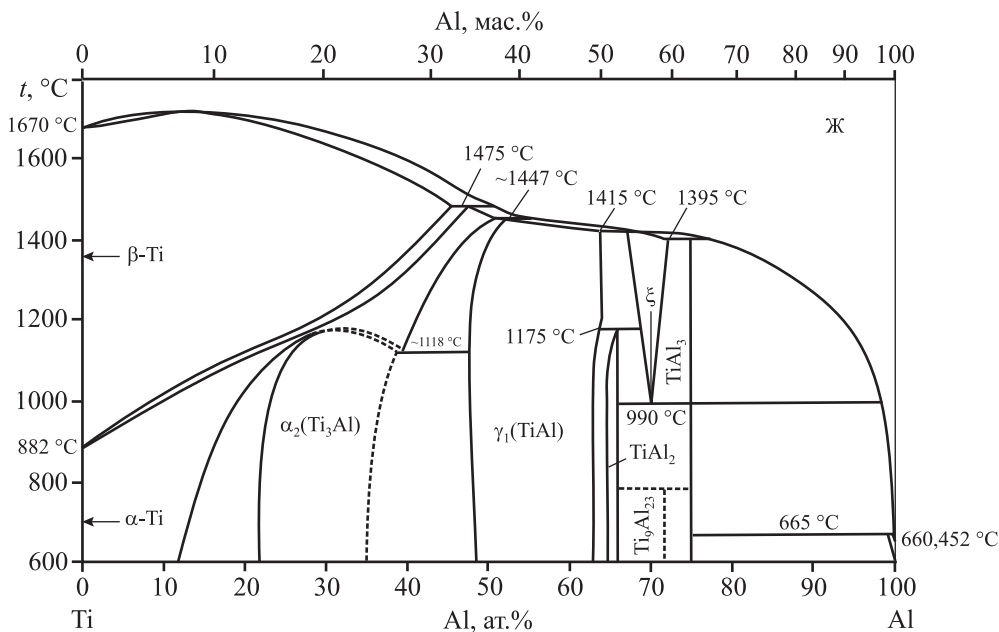


Рис. 3. Диаграмма состояния системы Ti–Al

это эквивалентный гидравлический диаметр канала, по которому движется флюид (газ или жидкость).

В связи с этим для определения открытой пористости изготовленных мембран использован метод гидростатического взвешивания, а размеры полученных пор определялись методом точки пузырька. Последний является одним из наиболее простых способов оценки максимального размера пор (ГОСТ Р 50516-93). Указанный стандарт распространяется на полимерные ультра- и микрофильтрационные гидрофильные и гидрофобные мембраны и устанавливает методику определения точки пузырька мембран с максимальным размером пор от 0,1 до 15 мкм по дистиллированной воде или спирту. Способ заключается в определении минимального давления газа, необходимого для продавливания пузырька газа через поры плоской гидрофильной мембраны, пропитанной водой или спиртом.

Применительно к мембране это выглядит следующим образом: верхняя ее часть находится в контакте с жидкостью (в данном случае — водой), которая заполняет все поры мембраны, если выполняется условие смачивания; нижняя часть мембраны контактирует с газом (воздухом), и при постепенном увеличении его давления пузырек воздуха будет проникать через пору (при выполнении условия равенства радиусов пузырька и поры), т.е. мембранный фильтр, насыщенный жидкостью, не пропускает воздух при тех давлени-

ях, которые обеспечивают его фильтрацию через сухой фильтр (диффузионное течение газа). Однако при увеличении давления достигается состояние, при котором сила поверхностного натяжения в крупных порах преодолевается, и жидкость из них выталкивается (объемное течение газа). Суть метода состоит в измерении давления, необходимого для проскока воздуха через мембрану (начала объемного течения газа), заполненную жидкостью, которая по отношению к ней является смачивающей.

Величина пор изготовленных мембран определялась расчетом по формуле Лапласа для «модели цилиндрических пор» и согласно ГОСТ 26849-86 (метод определения величины пор) на основании результатов измерений давления проскока методом точки пузырька.

Максимальный размер пор вычисляли по формуле

$$2\pi R\sigma\cos\theta = \pi R^2(\Delta p - h\gamma g),$$

где R — радиус капилляра, см; σ — сила поверхностного натяжения жидкости, дин/см; θ — угол смачивания, град; h — высота столба жидкости над поверхностью образца, см; γ — плотность жидкости, г/см³; g — ускорение силы тяжести, см/с²; Δp — перепад давления газа, необходимого для продавливания пузырька газа через поры мембраны, Па [23].

Кроме измерения величины пор и их распределения, для полноценной характеристики мембран

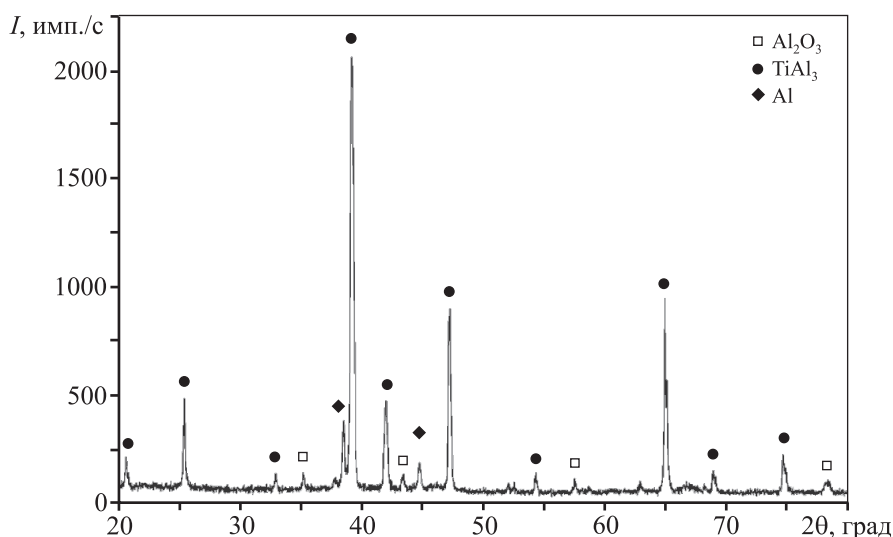


Рис. 4. Рентгенограмма образца на основе Ti–Al после термообработки при $t = 1395\text{ }^{\circ}\text{C}$

применяют тестирование по модельным аэрозольным частицам. Обычно при выборе мембран необходимо знать эффективность пористого материала (E) и сопротивление газовому потоку (Δp) в стандартных условиях. Величину Δp выражают в паскалях или миллиметрах водяного столба при скорости течения газа через мембрану $v = 1\text{ см/с}$. При этом качество пористого материала характеризует фильтрационный показатель

$$\gamma = -\lg K/\Delta p,$$

который не зависит от толщины материала, а определяется совершенством организации структуры порового пространства. Здесь K — коэффициент проскока частиц, т.е. отношение концентрации модельных частиц до (N_0) и после (N) фильтра. Эффективность пористого материала находится по формуле [24, 25]

$$E = (1 - N/N_0) \cdot 100\%.$$

Результаты и их обсуждение

В рамках работы были проведены исследования по получению керамических материалов с градиентной нанопористой структурой методами прессования порошков с последующей их термообработкой в режиме СВС.

Рентгенофазовый анализ экспериментальных образцов (рис. 4) показал наличие основной фазы TiAl_3 с незначительным количеством окислившегося (в Al_2O_3) и непрореагировавшего алюминия.

На рис. 5 представлена микроструктура излома экспериментального образца. Исходя из результатов ее анализа можно сделать предварительный вывод о том, что полученный материал действительно обладает развитой поверхностью и высокой открытой пористостью с размерами пор от 50 до 300 нм.

Открытая пористость изготовленных мембран (рис. 6), оцененная методом гидростатического взвешивания, составила 48 %. Размер открытых пор синтезированного образца, рассчитанный по формуле Лапласа для «модели цилиндрических пор» на основании результатов измерений давле-

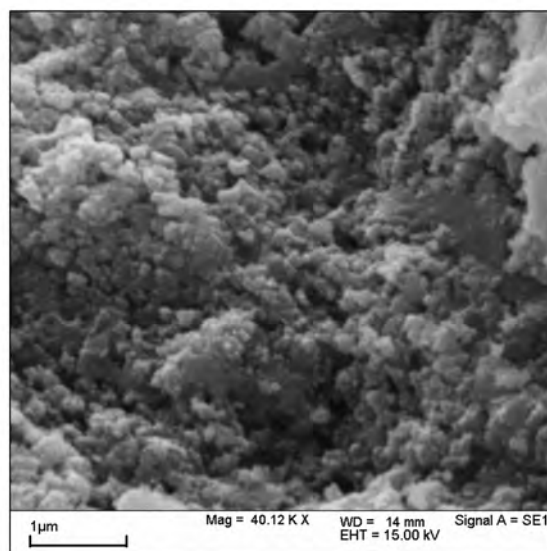


Рис. 5. Микроструктура излома образца



Рис. 6. Мембрана на основе нанопористого материала Ti—Al

ний проскока методом точки пузырька, оказался равным 0,10 мкм.

Для более полной характеристики мембран было выполнено тестирование по модельным аэрозольным частицам. Характеристики керамических мембранных СВС-фильтров на основе Ti—Al для фильтрации жидкостей и газов представлены ниже:

Коэффициент проскока модельных частиц	$0,7 \cdot 10^{-6}$
Перепад давления [23] Δp , мм вод. ст.	100
Фильтрационный показатель γ	0,062
Размер пор d , мкм	0,1—0,2
Пористость, %	>40
Температура эксплуатации t , °C	до 1000
Эффективность фильтрации дисперсных микропримесей с размером частиц более 0,01 мкм E , %	до 99,999
Производительность ультрафильтрации [26], л/(см ² ·ч)	
воды при перепаде давления на фильтре 0,1 МПа	до 10
газов при перепаде давления на фильтре 2 кПа	до 40
Геометрические размеры образцов, мм, не более	
диски	Ø200
цилиндры, трубы, стаканы	Ø40×1000

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что методом СВС из смеси порошков Ti + Al (в массовом соотношении 40 : 60) в режиме теплового взрыва возможно энергоэффективно в одну стадию с образованием TiAl₃ создавать нанопори-

стые керамические материалы и изделия на их основе.

2. По результатам РФА установлено, что полученный материал состоит из основной фазы TiAl₃ с незначительным количеством окислившегося (в Al₂O₃) и непрореагировавшего алюминия. Анализ микроструктуры его излома показал наличие развитой поверхности и высокой открытой пористости.

3. Эмпирически исследованная открытая пористость полученного материала достигает 48 %, а величина пор — от 0,1 до 0,2 мкм. Эффективность пористого материала для керамического СВС-фильтра на основе Ti—Al составила 99,999 %, сопротивление газовому потоку — 100 мм вод. ст., фильтрационный показатель — 0,062.

4. Производительность ультрафильтрации газов при перепаде давления на фильтре 2 кПа не более 40 л/(см²·ч), а воды — от 2 до 10 л/(см²·ч) при перепаде давления на фильтре 0,1 МПа.

5. Полученные мембранные СВС-фильтры эффективны для применения в малых установках для тонкой очистки воды от бактерий, вирусов, растворенного органического углерода, а также воздуха и технологических газов от дисперсных микропримесей и радиоактивных аэрозолей. Также они могут использоваться в установках, работающих в агрессивных средах и/или при высоких температурах (до 1000 °C).

Литература/References

1. Никитина С.Ю., Рудаков О.Б. Ионообменный реактор для очистки пищевого этанола от микропримесей. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2012. Т. 12. Вып. 6. С. 1018—1024.
Nikitina S.Yu., Rudakov O.B. Ion exchange reactor for purification of food ethanol from trace impurities. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2012. Vol. 12. Iss.6. P. 1018—1024 (In Russ.).

2. Zhigang Lei, Chengna Dai, Jiqin Zhu, Biaohua Chen. Extractive distillation with ionic liquids: A review. *Journal Review. Separations: Materials, Devices and Processes*. Vol. 60. Iss. 9. P. 3312—3329. DOI: 10.1002/aic.14537.
3. Фарахов М.И., Лантев А.Г. Энергоэффективное оборудование разделения и очистки веществ в химической технологии. *Вестник Казанского технол. ун-та*. 2011. No. 9. С. 152—158.
Farakhov M.I., Laptev A.G. Energy-efficient equipment for separation and purification of substances in chemical technology. *Vestnik Kazanskogo tekhnol. univ*. 2011. No. 9. P. 152—158 (In Russ.).
4. Sagar Sharma, Earaf Momin, Shivam Singh, Nilesh Singh. Desalination of seawater by reverse osmosis (Ro) method. *Int. J. Innovat. Sci. Res. Technol*. 2018. Vol. 3. Iss. 4. P. 159—162. <https://ru.scribd.com/document/377348802/Desalination-of-Seawater-by-Reverse-Osmosis-Ro-Method>.
5. Darwish M.A., Al-Asfour F. Energy consumption in equivalent work by different desalting methods. *Case Study for Kuwait, Desalination*. 2002. No.152. P. 83—92.
6. Maheshwari G.P., Al-Ramadhan M., Al-Abdulhadi M. Energy requirement of water production in dual-purpose plants. *Desalination*. 1995. No. 101. P.133—140.
7. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы: Теория и расчет. М.: Химия, 1986.
Dytnerskii Yu.I. Baromembrane processes: Theory and calculation. Moscow: Khimiya, 1986 (In Russ).
8. Боровинская И.П., Мержанов А.Г., Уваров В.И. Капиллярно-пористые СВС-материалы для фильтрации жидкостей и газов. *Наука — производству*. 2001. No. 10. С. 28—32.
Borovinskaya I.P., Merzhanov A.G., Uvarov V.I. Capillary-porous SHS materials for filtration of liquids and gases. *Nauka — proizvodstvu*. 2001. No. 10. P. 28—32 (In Russ.).
9. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1980.
Kiparisov S.S., Libenson G.A. Powder metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1980 (In Russ.).
10. Youchang Xiao, Tai-Shung Chung, Mei Lin Chng, Shouji Tamai, Akihiro Yamaguchi. Structure and properties relationships for aromatic polyimides and their derived carbon membranes: experimental and simulation approaches. *J. Phys. Chem*. 2005. Vol.109. Iss. 40. P. 18741—18748. DOI: 10.1021/jp0501771.
11. Lachman I.M., Lewis R.M. Anisotropic cordierite monolith: Pat. 3885977 (USA). 1975.
12. Кирш В.А. Фильтрация субмикронных аэрозолей волокнистыми фильтрами: Автореф. дис. ... докт. физ-мат. наук. М.: ИФХЭ, 2012.
Kirsh V.A. Filtration of submicron aerosols by fiber filters: Abstr. diss. of Dr. Sci. (Phys-Math.). Moscow: IPCE, 2012 (In Russ.). https://www.researchgate.net/publication/233885121_filtration_of_submicron_aerosols_by_fibrous_filters_DSci_Thesis_synopsis_2012_In_Russian.
13. Артюшин В.Р., Волокитин Г.Г., Лысак Г.В., Лысак И.А., Малиновская Т.Д., Чайковская О.Н. Система очистки сточных вод с использованием полипропиленового тонковолокнистого материала. *Водоочистка*. 2012. No. 2. С. 51—55.
Artyushin V.R., Volokitin G.G., Lysak G.V., Lysak I.A., Malinovskaya T.D., Tchaikovskiy O.N. Wastewater treatment system using polypropylene thin-fiber material. *Vodo-ochistka*. 2012. No. 2. P. 51—55 (In Russ.).
14. Barboza S.D., Seeley W.P., Shucosky A.C. Gas backwash of pleated filters: Pat. 5468397 (USA). 1995.
15. Weston M.H., Peterson G.W., Browe M.A., Jones P.M., Farha O.K., Hupp J.T., Nguyen SonBinh. Removal of airborne toxic chemicals by porous organic polymers containing metal-catecholates. *Chem. Commun*. 2013. Iss. 29. P. 2995—2997. DOI: 10.1039/C3CC40475G.
16. Salmimies R., Kallash J., Ekberg B., Görresd G., Andreasene J.-P., Becke R., Häkkinen A. The scaling and regeneration of the ceramic filter medium used in the dewatering of a magnetite concentrate. *Int. J. Miner. Process*. 2013. Vol. 119. P. 21—26. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.12.006.
17. Xinyang Jiao, Xiaohong Wang, Peizhong Feng, Yanan Liu, Laiqi Zhang, Farid Akhtar. Microstructure evolution and pore formation mechanism of porous TiAl₃ intermetallics via reactive sintering. *Acta Metal. Sinica* (Eng. Lett.). 2018. Vol. 31. Iss. 4. P. 440—448. DOI: 10.1007/s40195-017-0663-7.
18. Уваров В.И., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Способ получения пористого материала и материал, полученный этим способом: Пат. 2175904 (РФ). 2011.
Uvarov V.I., Borovinskaya I.P., Merzhanov A.G. The method of producing porous material and the material obtained by this method: Pat. 2175904 (RF) 2011 (In Russ.).
19. Levashov E.A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Shtansky D.V. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *Int. Mater. Rev*. 2017. Vol. 62. No.4. P. 203—239. DOI: 10.1080/09506608.2016.1243291.
20. Quanlin Shi, Botao Qin, Peizhong Feng, Huashen Ran, Binbin Song, Jianzhong Wang, Yuan Ge. Synthesis, microstructure and properties of Ti—Al porous intermetallic compounds prepared by a thermal explosion reaction. *RSC Advances*. 2015. Iss. 57. P. 46339—46347. <https://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/RA/2015/C5RA04047G#!div>.

21. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов. Черноголовка: ИСМАН, 1998.
Merzhanov A.G. Combustion processes and materials synthesis. Chernogolovka: ISMAN, 1998 (In Russ.).
22. Jiang Y., He Y.H., Xu N.P., Zou J., Huang B.Y., Liu C.T. Effects of the Al content on pore structures of porous TiAl alloys. *Intermetallics*. 2008. Vol. 16. Iss. 2. P. 327–332. DOI: 10.1016/j.intermet.2007.11.002.
23. Бакунов В.С., Балкевич В.Л., Гузман И.Я., Лукин Е.С. Практикум по технологии керамики и огнеупоров. М.: Стройиздат, 1972.
Bakunov V.S., Balkevich V.L., Guzman I.Ya., Lukin E.S. Workshop on the technology of ceramics and refractories. Moscow: Strojizdat, 1972 (In Russ.).
24. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. М.: Химия, 1978.
Klimenko A.P. Methods and instruments for measuring dust concentration. Moscow: Khimiya, 1978 (In Russ.).
25. Ван де Г. Холст. Рассеяние света малыми частицами. М.: Иностранная литература, 1961.
Van de G. Hulst. Light scattering by small particles, Moscow: Inostrannaya literatura, 1961 (In Russ.).
26. Уваров В.И., Боровинская И.П., Загнитко А.В., Троценко Н.М., Лукин Е.С. Фильтры для установок по получению воды для инъекционных растворов (апиrogenной воды). *Огнеупоры и техническая керамика*. 2003. No. 5. С. 22–28.
Uvarov V.I., Borovinskaya I.P., Zagnitko A.V., Trotsenko N.M., Lukin E.S. Filters for installations for the production of water for injection solutions (pyrogen-free water). *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2003. No. 5. P. 22–28 (In Russ.).