

УДК 66.067.124

В.Г. Бабашов¹, Н.М. Варрик¹, Т.А. Карасева¹

ПОРИСТАЯ КЕРАМИКА ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ И ГОРЯЧИХ ГАЗОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63

Представлен обзор высокопористых керамических материалов, применяемых в настоящее время для фильтрации расплавов металлов и горячих газов, а также приведены сведения о производителях фильтров и методах их получения. Газопроницаемость и высокая удельная поверхность в сочетании с огнеупорными свойствами позволяют использовать высокопористые оксиды в процессах, проводимых при высоких температурах в химических средах, когда другие материалы неприменимы. Рассмотрены пути повышения эксплуатационных свойств пористых керамических фильтров, таких как рабочая температура, прочность, окислительная стойкость, бимодальная пористость, а также возможности совершенствования технологического процесса их получения: снижение стоимости, повышение экологической безопасности производства, сокращение времени технологического цикла.

Ключевые слова: пористая керамика, керамические фильтры, фильтрация расплавов, тугоплавкие оксиды, дублирование полимерной матрицы, оксид алюминия.

V.G. Babashov¹, N.M. Varrik¹, T.A. Karaseva¹

POROUS CERAMIC FOR FILTRATION OF METAL MELTS AND HOT GASES (review)

Provides an overview of the highly porous ceramic materials currently used for filtration of metal melts and hot gases, filter manufacturers and methods for their production. Gas permeability and high specific surface area in combination with refractory properties allow using of highly porous oxides in processes carried out at high temperatures in chemical media when other materials are not applicable. Ways of improving the operational properties of porous ceramic filters, such as operating temperature, strength, oxidative resistance, bimodal porosity, as well as possibilities of improving the technological process of their production: reduced cost, increased environmental safety of production, reduced time of the technological cycle were considered.

Keywords: porous ceramics, ceramic filters, metal melts filtration, refractory oxides, duplication of polymer matrix, alumina.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время пористые высокотемпературные керамические материалы весьма востребованы во многих областях промышленности, поэтому разработка новых композиций и технологий их получения – одно из приоритетных направлений материаловедения [1]. Высокопористая керамика на основе тугоплавких оксидов применяется во многих отраслях промышленности в качестве тепло- и звукоизоляционных материалов, подложек химических и биологических катализаторов, фильтрующих элементов для очистки горячих газов и расплавов металлов, питьевой воды, растворов электролитов,

сточных вод предприятий. Газопроницаемость и высокая удельная поверхность в сочетании с огнеупорными свойствами позволяют использовать высокопористые оксиды в процессах, проводимых при высоких температурах в химических средах, когда другие материалы неприменимы.

Использование фильтрации при отливке металлов стало необходимым элементом технологии получения изделий высокого качества. Традиционные методы удаления включений из расплавов, например применение шлакоуловителей, недостаточны для обеспечения производства бездефектного изделия. В частности, алюминиевые сплавы часто содержат включения и нерастворимые примеси, а именно – частицы оксидных пленок, интерметаллиды, бориды, карбиды или иные нерастворимые соединения алюминия. Их наличие в литом продукте отрицательно сказывается на его свойствах при дальнейшей обработке – прокатке, штамповке, экструзии, полировке. Кроме того, нередко в производство идет вторичное сырье, и задача очистки его от примесей важна для получения качественного литого металла. Трудности с фильтрацией металлов в целом и алюминия в частности возникают из-за высокой агрессивности горячего металла, поэтому для изготовления фильтров необходимы материалы, имеющие достаточные химическую стойкость и прочность при высоких температурах в агрессивных средах [2].

В данной статье представлен обзор высокопористых керамических материалов, применяемых в настоящее время для фильтрации расплавов металлов и горячих газов, а также приведены сведения о методах их получения.

Керамические материалы для фильтрации расплавов и горячих газов и методы их получения

Пористые структуры характеризуются рядом параметров, совокупность которых позволяет определить их применимость в тех или иных условиях эксплуатации. К таким параметрам относятся пористость, ее вид (открытая или закрытая) и распределение по объему материала, форма и размеры пор, а также их удельная поверхность. Следует отметить, что для использования керамических материалов в качестве фильтров необходимо наличие разветвленной сети открытых пор, по возможности разного размера и с высокой удельной поверхностью.

На сегодняшний день существует большое разнообразие фильтров, которые условно можно разделить на два класса: сетчатые и объемные. Изначально для фильтрации горячих потоков жидкостей и газов использовали материалы с регулярной пористостью, например сетчатые, прессованные или экструдированные фильтры [3]. Однако в настоящее время гораздо большее распространение получили объемные высокопористые фильтры на основе тугоплавких керамических материалов.

Сетчатые, прессованные и экструдированные фильтры

Сетчатые фильтры, выполненные из стеклотканей, позволяют улавливать твердые частицы при фильтрации расплавов и горячих газов (рис. 1). К сетчатым фильтрам относят стеклянные и металлические сетки, прессованные и экструдированные материалы. Они отделяют частицы размером, превышающим диаметр отверстия сетки, но не препятствуют прохождению более мелких частиц, поэтому способны улавливать лишь частицы довольно крупных размеров. Кроме того, накопление отфильтрованных частиц на поверхности фильтра вызывает образование осадка, так называемого кека, что приводит к уменьшению пропускной способности фильтра. Срок действия сетчатого фильтра небольшой – из-за быстрой деградации стеклянных волокон, работающих при температуре расплавленного металла.

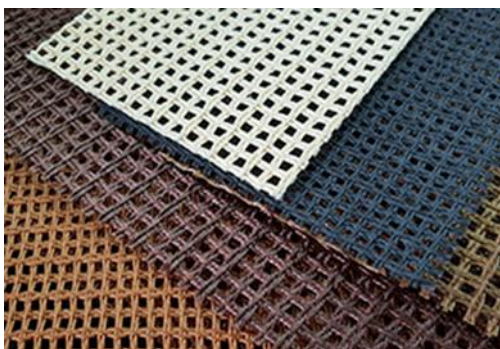


Рис. 1. Сетчатые фильтры компании ООО «СфероЛит» (г. Смоленск, Россия) [4]

Прессованные керамические фильтры содержат ряд сквозных каналов диаметром от 1 до 3 мм. По сравнению с сетчатыми фильтрами, они имеют большую высоту и меньший диаметр отверстий. Получают данные фильтры прессованием керамического шликера в пресс-форме с параллельно расположенными шпильками, благодаря которым в изделии формируются каналы.

Экструдированные фильтры – изделия круглого сечения со сквозными отверстиями диаметром от 1 до 5 мм. Способ их получения более трудоемкий и включает экструзию керамического шликера, содержащего порообразователи в виде шаров поливинилацетата, которые вытягиваются в цилиндры при экструзии и выгорают при термообработке [5, 6]. По прочности экструдированные фильтры уступают прессованным, и их применение ограничено.



Рис. 2. Прессованные и экструдированные керамические фильтры компании Fineway Ceramics (Канада) [7]

Недостатком и прессованных, и экструдированных фильтров является недостаточная фильтрационная способность, как и в случае сетчатых фильтров, так как частицы с малым размером могут проходить через каналы фильтра. На рис. 2 представлены прессованные и экструдированные керамические фильтры канадской компании Fineway Ceramics.

Высокопористые пенокерамические ячеистые фильтры

В последние десятилетия для фильтрации расплавов металлов широко используется высокопористая керамика из огнеупорных оксидов, например из оксидов алюминия, магния, кремния, циркония, которые обладают целым рядом ценных свойств: химической инертностью, низкой электропроводностью, высокой стойкостью к коррозии и др. Структура керамики представляет собой пространственный каркас с открытой пористостью с ячейками пор размером от 2 до 5 мм. Такая многомерность поровой структуры обеспечивает извилистый ток расплава металла, в отличие от одномерных каналов

прессованных и экструдированных фильтров, и повышает фильтрационную способность. Лабиринтные поры сначала задерживают крупные примеси, которые превышают диаметр пор, оседают на поверхности фильтра и образуют слой, начинающий уже через определенное время задерживать более мелкие частицы примесей. Скорость потока металла в фильтре уменьшается из-за многократного изменения направления движения, и мелкие частицы оседают на внутренней поверхности пор. При таком механизме фильтрации снижается турбулентность потока, которая может приводить к захвату пузырьков воздуха, что особенно негативно влияет на сплавы, склонные к окислению. Поэтому пенокерамические фильтры способны предотвращать вторичное окисление расплава в форме.

Технология изготовления пористой керамики, применяемой для фильтрации, зависит от требуемой поровой структуры и назначения фильтров. При создании подложек мембран и фильтров необходимо обеспечить получение керамики с высокими пористостью и проницаемостью к потокам, размером пор, лежащим в узком диапазоне, и достаточной прочностью для планируемых условий эксплуатации. Необходимо предусматривать, что в процессе эксплуатации на поверхности пор фильтрующих элементов появляется слой осадка, меняющий проницаемость материала.

Методы получения высокопористых керамических фильтров основаны преимущественно на принципе использования керамических шликеров в сочетании с органическими материалами, которые применяются для образования пор. При этом технологии получения пор могут различаться.

Один из распространенных методов получения пор – метод выгорающих добавок. Он заключается во введении в исходную массу добавок, которые в последующем удаляются с помощью различных процессов разложения. В результате в керамическом теле изделия остаются поры. Пористое изделие, содержащее выгорающие добавки, получают пластическим формованием, полусухим прессованием или литьем. Удаление порообразующих добавок происходит в зависимости от их природы: осуществляется испарением, возгонкой, химическим взаимодействием, выжиганием органических составляющих – как из сырого необожженного материала, так и в процессе его изготовления при термообработке. В качестве выгорающих добавок могут использоваться предварительно раздробленные древесные или иные отходы, опилки, уголь, золы, побочные продукты бумажной, угольной промышленности [8, 9], полимерные микрогранулы [10], полиуретановые пористые матрицы [11–13]. Получаемая таким образом пористая керамика может быть дополнительно модифицирована для придания ей гидрофобных свойств: на пористую керамику, полученную методом дублирования полимерной матрицы, дополнительно наносят активные вещества в виде водной суспензии, которые придают пористым материалам целевые свойства [12].

Метод вспенивания состоит из приготовления пеномассы, ее сушки и обжига. Пористую структуру создают путем низкотемпературного вспенивания масс при газовыделении, а ее закрепление проводят при обжиге. Пенообразованию способствует низкое поверхностное натяжение на границе раздела «жидкость–воздух», содействующее образованию тонких пленок, а наличие жидкости определенной вязкости противодействует разрыву возникающих пленок. Трудностью реализации рассматриваемого метода является получение пористой структуры достаточной прочности на стадии вспенивания и обеспечение прочности без деформации на стадии спекания. Метод вспенивания включает как добавление поверхностно-активного вещества (ПАВ) в керамический шликер, который энергично перемешивают вместе с воздушными пузырьками, так и предварительное приготовление пены с последующим добавлением ее в суспензию. Разновидностью данной методики является вариант, когда вместо органических ПАВ используют стабилизированную жидкую фазу пены с керамическими наночастицами

(диаметром <100 нм), что приводит к образованию тонкой плотноупакованной структуры на поверхности пузырьков, которая фиксируется после сублимационной сушки и спекания. Преимуществом этого варианта является высокая пористость материала при высокой прочности.

Метод вспучивания при обжиге массы или отдельных ее компонентов, таких как расширенный полистирол или вспученный перлитовый песок, по сути мало отличается от метода образования пузырьков газа в результате химических реакций взаимодействия или разложения вводимых добавок во время размягчения или расплавления массы и может быть отнесен в эту же группу [14–16].

Метод химического порообразования, т. е. получения пористой керамики путем генерации пор за счет уменьшения объема керамической массы материала, происходящего вследствие реакций дегидроксилирования или декарбонизации, можно отнести к третьему варианту поризации керамики. Если целевым продуктом является высокотемпературная теплоизоляция, то разложение гидратированных/карбонизированных неорганических соединений считают наиболее надежным и применимым на практике благодаря использованию дешевых соединений и исходных компонентов, образующих керамический шликер, и отсутствию токсичных выделений. В качестве генератора пор в плотных матрицах оксида алюминия Al_2O_3 обычно используют гидроксид алюминия $Al(OH)_3$, присутствие которого обеспечивает уменьшение объема на 60% при нагреве >600 °С. По этой методике можно получать структуры, пригодные для использования в качестве фильтров, с пористостью 62–82%. Однако если термически разложенные образцы гидроксида алюминия нагреть выше 1100 °С, то трансформация фаз оксида алюминия приведет к образованию высокореактивных оксидов алюминия с субмикронными порами, которые в контакте с матрицей $\alpha-Al_2O_3$ активно спекаются и в свою очередь приводят к снижению пористости материала. Для преодоления этого недостатка используют более крупные частицы гидроксида алюминия с меньшей площадью поверхности, что способствует меньшей реактивности частиц и образованию более крупных пор. Вместе с тем этот механизм, вероятно, действует как замедлитель фазовых превращений, и сведений о том, эффективен ли он в условиях длительной работы керамики при высоких температурах, нет [17–21].

Данный метод также использовался в комбинации с методом выгорающих добавок для получения керамики с бимодальной пористостью. Бимодальная пористость обеспечивается за счет одновременного применения ультрадисперсного оксидного керамического порошка и добавок-порообразователей: для обеспечения крупных пор в смесь вводят термоудаляемую дисперсную органическую добавку-порообразователь, а для формирования мелких пор – дисперсный гидроксид того же элемента, что и спекаемая керамика, который разлагается при низкотемпературном отжиге на оксид и водяной пар [13]. При этом выгорающие частицы органического порообразователя оставляют пустоты – поры, морфология которых наследует морфологию органических частиц порообразователя.

Фильтрующие элементы, анализаторы, компоненты химического и газового оборудования из пористой проницаемой оксидной керамики, по сравнению с аналогичными элементами, изготовленными из других материалов, имеют ряд преимуществ: высокую температуру эксплуатации (>1500 °С), устойчивость в химически агрессивных средах, механическую прочность (в том числе при повышенных температурах), стойкость к микробиологическому разрушению. Такие изделия можно очищать воздухом, обратным током жидкости, промывкой в агрессивных жидкостях (в кислотах и щелочах), прокаливанием, воздействием ультразвука, а также стерилизовать растворами, содержащими хлор, или «острым» паром. В настоящее время наиболее широкое распространение получили керамические материалы на основе оксида алюминия.

Оксидную керамику с открытой пористостью до 95% чаще всего получают методом дублирования полимерной матрицы с высокопроницаемой ячеистой структурой, который является разновидностью метода выгорающих добавок, а также совмещен с методом шликерного литья. На высокопористую полимерную структуру наносят шликер керамического порошка, а затем выжигают. В качестве полимерной ячеистой матрицы чаще всего используют различные виды пенополиуретанов, а в качестве заполняющего поры ячеистой матрицы шликера – прекерамический золь, который кристаллизуется в керамику при последующем обжиге.

Среди компаний, разрабатывающих и производящих керамические высокопористые фильтры, следует отметить швейцарскую компанию Swiss Aluminium Ltd [21–27]. Запатентованные ею в 1970-х гг. керамические фильтры содержали 40–95% оксида алюминия, 1–25% оксида хрома, 1–12% бентонита и 2,5–5% вяжущего агента, в качестве которого использовали ортофосфат алюминия. Равномерную пропитку органического пористого материала (пенополиуретана) керамическим шликером обеспечивали с помощью его прохождения через пару роликов.

Известными производителями пенокерамических фильтров являются американская компания Selee [28–30] и немецкая компания Drache [31]. Во многие страны поставляет пенофильтры китайская компания SQ Group. Отмечены также охранные документы на пенокерамические фильтры у немецких [32], британских [33, 34], японских [35–37], китайских [38–40] и российских [5, 6, 8, 9, 12, 13] разработчиков.

Для фильтрации разных сплавов используют фильтры различного состава. Например, для сталей – фильтры, которые изготовлены на основе оксида циркония или карбида кремния и которые можно применять при температуре 1700 °С. Фильтрация стали требует абсолютную химическую чистоту материала и высокие прочность и надежность фильтров. Для фильтрации расплава чугуна подходят фильтры на основе карбида кремния, отличающегося повышенной прочностью, стойкостью к термоудару и воздействию химикатов. Рабочая температура этих фильтров составляет 1500 °С. Для очистки расплавов алюминия используют пенокерамические фильтры на основе оксида алюминия с рабочей температурой до 1150 °С. В качестве примера можно привести линейку фильтров, производимую китайской компанией SQ Group (рис. 3). На российском рынке ее представляет ООО «Научно-технический центр промышленных технологий» (г. Санкт-Петербург).

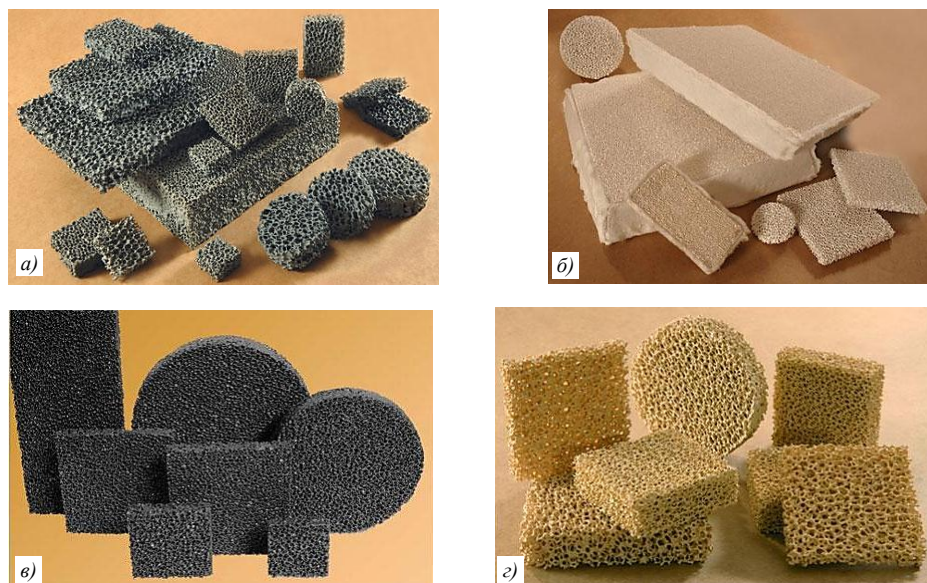


Рис. 3. Пенокерамические фильтры для фильтрации чугуна (а), алюминия (б), стали (в) и фильтры на основе оксида циркония для фильтрации стали (з) компании SQ Group (Китай) [41]

В настоящее время практически все литейные производства применяют процесс фильтрования расплава для повышения качества металла. В последние десятилетия были улучшены не только свойства пенокерамических фильтров и конструкции фильтровальных установок, но и технологии их изготовления. В частности, разработаны мелкопористые фильтры с повышенной прочностью, созданы фильтрационные системы для высокоскоростного литья, двухступенчатые системы, процесс фильтрации автоматизирован.

Однако керамические фильтры имеют и ряд недостатков. В первую очередь следует отметить их невысокую механическую прочность, обусловленную природной хрупкостью керамики; проблемой может стать их растрескивание вследствие термоудара или химической коррозии при контакте с расплавом металла. Керамические и стекловидные связки при высоких температурах могут размягчаться, вызывая эрозию пенофильтров. Кроме того, при контакте с потоком расплавленного металла происходит забивание пор частицами загрязнений.

Технологии получения пенофильтров также не лишены недостатков. К ним следует отнести: высокую стоимость производства; недостаточную экологическую безопасность, связанную с выгоранием органических порообразующих материалов; сложность получения фильтров больших размеров в связи с их усадкой и деформацией при обжиге.

Исследования разработчиков направлены на устранение этих недостатков.

В патентах компании Swiss Aluminium Ltd керамический шликер содержит добавку керамических волокон, которые при термообработке образуют внутри пор ворсистую поверхность [23–25]. В результате пенофильтр имеет повышенную прочность и фильтрующую способность. Кроме того, для повышения прочности пенокерамического фильтра из его состава исключают алюмофосфатные связующие, заменяя их на оксидные золь-гель связующие, имеющие мелкую пористость. В результате получают фильтры с бимодальной пористостью.

В патенте компании Swiss Aluminium Ltd [25] предложено не использовать связующие, содержащие стеклофазу. Вместо этого пенополиуретановую губку пропитывают шликером, содержащим гидроксид алюминия (предпочтительно в виде бемита $Al_2O_3 \cdot H_2O$). По золь-гель методу в результате спекания при термообработке получают прочные оксидные керамические связи, свободные как от фосфатов, так и от органических материалов, чувствительных к химическому воздействию. Керамический пористый материал может быть изготовлен не только из оксида алюминия, но и из оксида циркония, муллита, кордиерита.

В патенте Национального исследовательского Томского государственного университета [13] керамический гидроксид берут в виде двух размерных фракций – в виде мелкодисперсного и ультрамелкодисперсного порошка, а в качестве порообразующих добавок, доля которых достигает 70% (объемн.), используют сферические частицы сверхвысокомолекулярного полиэтилена или частицы канифоли неправильной формы. Смесь формуют холодным прессованием, затем подвергают термообработке при 300 °С для удаления порообразующих добавок и спеканию при температуре 1500–1600 °С в течение часа. Происходит разложение гидроксида на оксид и водяной пар, оставляющий поры и соединяющие их каналы. В результате получают прочный высокопористый керамический материал с бимодальной пористостью – поры со средним размером 10 и 100 мкм.

Отмечены также сообщения о получении пористых керамических фильтров с использованием полых керамических сфер. Полые сферы, спеченные с огнеупорными керамическими порошковыми материалами с добавлением стеклосвязки, образуют однородную пористую структуру [26, 42]. К преимуществам такого вида пористых керамик

относят: возможность получения заданной пористости благодаря комбинации размеров керамических порошковых зерен и полых керамических сфер; большую контактную поверхность, повышающую фильтрационную способность; высокую термостойкость керамики. На рис. 4 представлен вариант пористой структуры ООО «Кит-Строй СПб» с использованием полых корундовых сфер [42].

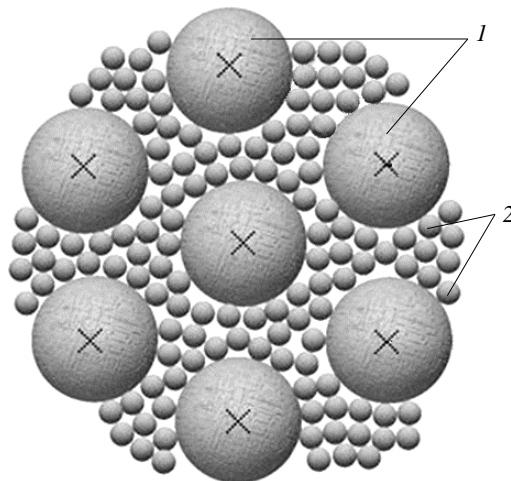


Рис. 4. Пористая структура с использованием полых корундовых сфер [42]:
1 – полые керамические сферы; 2 – порошковые керамические частицы

Интерес представляют публикации, касающиеся исследований реологических характеристик шликерных суспензий на основе оксида алюминия, предназначенных для изготовления керамических фильтров [43–45]. Показано, что замена в шликерах воды, используемой в качестве технологической связки, на водный раствор карбамида и оксихлорида алюминия приводит к увеличению текучести суспензий, что способствует улучшению формуемости заготовок и повышению механических характеристик керамических материалов. Разработчики также изучают влияние пластифицирующих добавок в керамический шликер и режимов обжига пропитанных заготовок на свойства получаемых высокопористых керамических материалов для высокотемпературных фильтров [46–49].

Заключения

В настоящее время термостойкая высокопористая керамика весьма востребована в различных отраслях промышленности, в частности для фильтрации растворов, литейных металлических сплавов, горячих газов. На рынке представлены различные виды пористой керамики для фильтров – как из оксидов алюминия, циркония или из сочетаний оксида алюминия с оксидами кремния и магния, так и из карбидов кремния или титана. В основном производстве пенокерамики занимаются зарубежные компании: швейцарские Pyrotek и Swiss Aluminium Ltd, немецкие ASK Chemicals и Drache Umwelttechnik, американская Selee, китайская SQ Group, канадская Fineway Ceramics, чешская Lanic и др. Керамические фильтры стали неотъемлемой частью литейного производства и прочно заняли свою нишу на рынке пористой керамики.

Высокопористые ячеистые фильтры, получаемые методом дублирования полимерных матриц, обладают рядом преимуществ: стойкостью к восстановительной среде при температуре расплавов, стойкостью к термоудару, высокой эффективностью фильтрации благодаря наличию разветвленной сети открытых пор. Однако современные исследования разработчиков материалов направлены на устранение ряда недостатков пенокерамики, а именно – недостаточной прочности, высокой стоимости, низкой экологичности производства. Направления поисков включают как создание новых композиций

керамических материалов и получение различных комбинаций пористости, так и совершенствование имеющихся технологий получения пористой керамики. Использование различных порообразующих полимерных материалов, получение требуемых составов керамики из разных прекурсоров, изучение влияния параметров технологического процесса (пропитки или литья керамических прекурсоров, их формования и последующей термообработки) – это лишь некоторые аспекты поисковых работ в области совершенствования высокопористой керамики для процессов фильтрации.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
2. Анциферов В.Н., Беклемышев А.М., Гилев В.Г. и др. Проблемы порошкового материаловедения. Часть II. Высокопористые проницаемые материалы. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 262 с.
3. Иванченкова Л.Г. Классификация фильтров для рафинирования металлов // Огнеупоры. 1991. №2. С. 28–29.
4. Каталог продукции ООО «СфероЛит». URL: <https://sferolit.ru> (дата обращения: 20.07.2020).
5. Способ изготовления пенокерамического фильтра из карбида титана: пат. 2280536 Рос. Федерация; заявл. 27.12.04; опубл. 27.07.06.
6. Керамическая масса и способ изготовления пористых изделий из нее: пат. 2047582 Рос. Федерация; заявл. 17.07.92; опубл. 10.11.95.
7. Компания FineWay Ceramics (Канада): сайт. URL: <http://finewayceramics.com> (дата обращения: 20.07.2020).
8. Керамическая масса для изготовления фильтрующих изделий: а. с. 1323551 СССР; заявл. 19.11.85; опубл. 15.07.87.
9. Способ изготовления керамического композиционного материала: пат. 2355665 Рос. Федерация; заявл. 25.07.07; опубл. 20.05.08.
10. Муканова А.Ж., Каныгина О.Н. Проблема создания порового пространства в кремнеземистой керамике для экологически чистых фильтров // Вектор науки ТГУ. 2013. №3. С. 77–79.
11. Способ изготовления высокопористых ячеистых керамических изделий: пат. 2377224 Рос. Федерация; заявл. 14.04.08; опубл. 27.12.09.
12. Способ изготовления высокопористых ячеистых керамических материалов: пат. 2580959 Рос. Федерация; заявл. 08.04.15; опубл. 10.04.16.
13. Способ получения пористой керамики с бимодальным распределением пористости: пат. 2691207 Рос. Федерация; заявл. 26.12.17; опубл. 11.06.19.
14. Talsicukur Z., Balaban C., Kuskonmaz N. Production of ceramic foam filters for molten metal filtration using expanded polystyrene // Journal of the European Ceramic Society. 2007. Vol. 27. P. 637–640.
15. Способ изготовления легковесных керамических изделий: а. с. 1323554 СССР; заявл. 19.11.85; опубл. 15.07.87.
16. Gonzenback U.T., Studart A.R., Steinlin D., Tervoot E., Gauckler J.L. Processing of particle-stabilized wet foams into porous ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2007. Vol. 90. No. 11. P. 3407–3414.
17. Salomao R., Villas Boas M.O.C., Pandolfelli V.C. Porous alumina-spinel ceramics for high temperature applications // Ceramics International. 2011. Vol. 37. P. 1393–1399.
18. Способ получения пористой структуры керамического материала: пат. 2483043 Рос. Федерация; заявл. 12.05.11; опубл. 20.11.12.
19. Зо Е Мо У. Пористая и высокопористая керамика из оксида алюминия и карбида кремния: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2019. 35 с.
20. Guo X., Nakanishi K., Kanamori K. et al. Preparation of macroporous cordierite monoliths via the sol-gel process accompanied by phase separation // Journal of the European Ceramic Society. 2014. Vol. 34. P. 817–823.
21. Ceramic Foam Filter: pat. 3947363 US; filed 28.03.75; publ. 30.03.76.
22. Method of Preparation of Ceramic Foam: pat. 4075303 US; filed 22.02.77; publ. 21.02.78.
23. Molten Metal Filter: pat. 4265659 US; filed 09.10.79; publ.05.05.81.
24. Molten Metal Filter: pat. 4342664 US; filed 23.05.80; publ. 03.08.82.

25. Process of Preparing a Ceramic Foam: pat. 4610832 US; filed 26.09.84; publ. 09.09.86.
26. Porous Ceramic Filter Body and Manufacturing Method Thereof: pat. 4678758 US; filed 27.01.84; publ. 07.07.87.
27. Ceramic Foam: pat. 4803025 US; filed 23.04.84; publ. 07.02.89.
28. Method and Apparatus for Removing Liquid Salts From Liquid Metal: pat. 6036743 USA; 08/957930; filed 27.10.97; publ. 14.03.00.
29. Dual Stage Ceramic Foam Filtration System and Method: pat. EP863217; filed 03.03.97; publ. 09.09.98.
30. Ceramic Foam Filter Having a Protective Sleeve: pat. 5456833 US; filed 02.05.94; publ. 10.10.95.
31. Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen: pat. 20318773U1 DE; filed 01.12.03; publ. 12.05.05.
32. Ceramic Material Permitting the Passage of Fluids and Based on Silicon Powder Reaction-banded in the Presence of Carbon: pat. 5093289 US; filed 14.02.89; publ. 03.03.92.
33. Ceramic Foam Filters: pat. 5190897 US; filed 20.09.91; publ. 02.03.93.
34. Low Expansion Corrosion Resistant Ceramic Foam Filters for Molten Aluminum Filtration: pat. 8518528 US; filed 02.04.07; publ. 27.08.13.
35. Process for the Production of Porous Ceramic Molded Articles: pat. 4472331 US; filed 22.02.83; publ. 18.09.84.
36. Manufacturing Method of a Ceramics Body Having Through Holes: pat. 4664858 US; filed 13.08.85; publ. 12.05.87.
37. High-Temperature Ceramic Filter: pat. 5676833 US; filed 08.02.96; publ. 14.10.97.
38. Silicon carbide foam ceramic filter: pat. 100536985 China; filed 24.08.07; publ. 09.09.09.
39. Preparation method of magnesian foamed ceramic filter for casting: pat. 101138691 China; filed 10.07.07; publ. 12.03.08.
40. Method for preparing ceramic filter with composite pore diameter: pat. 101165003 China; filed 06.09.07; publ. 23.04.08.
41. Компания Shengguan Group «SQ Group» (Китай) (официальный представитель в России ООО «Научно-технический центр промышленных технологий»): сайт. URL: www.sq-spb.ru (дата обращения: 21.07.2020).
42. Компания ООО «Кит-Строй СПб»: сайт. URL: <http://t-tiss.com> (дата обращения: 20.07.2020).
43. Тарасовский В.П., Красный Б.Л., Кошкин В.И. и др. Количественный анализ структуры проницаемой керамики из порошка узкофракционированного электрокорунда и полых корундовых микросфер // Новые огнеупоры. 2016. №6. С. 49–52.
44. Бучилин Н.В., Прагер Е.П. Реологические характеристики шликерных суспензий на основе оксида алюминия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-6-6.
45. Бучилин Н.В., Прагер Е.П. К вопросу о реологических характеристиках шликерных суспензий на основе оксида алюминия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-6-6.
46. Бучилин Н.В., Люлюкина Г.Ю. Особенности спекания высокопористых керамических материалов на основе оксида алюминия // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 40–46. DOI: 10.8577/2071-9140-2016-0-4-40-46.
47. Бучилин Н.В., Прагер Е.П., Ивахненко Ю.А. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики шликеров для получения пористых керамических материалов на основе оксида алюминия // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №8 (44). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-6-6.
48. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Максимов В.Г., Самородова О.Н. Изучение структуры и свойств образцов керамического композиционного материала на основе муллита // Авиационные материалы и технологии. 2020. №1 (58). С. 54–63. DOI: 10.8577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
49. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.