

УДК 67.019

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-4-10

## Дефекты при получении крупногабаритных полых пористых цилиндрических фильтров методом СВС

© 2017 г. Р.А. Юсупов, Н.И. Афанасьев, А.М. Шульпеков

Томский научный центр СО РАН

Статья поступила в редакцию 09.06.16 г., доработана 05.09.16 г., подписана в печать 08.09.16 г.

Актуальность работы связана с использованием за рубежом в биологии и медицине керамических фильтров для тонкой фильтрации воздуха и биологических жидкостей. Благодаря уникальному сочетанию химической и термической стойкости, высокой прочности и теплопроводности керамические фильтры применяются для очистки агрессивных жидкостей, перегретого пара высокого давления и других газов. Исследована зависимость скорости горения от относительной плотности и гранулометрического состава порошковых смесей системы  $\text{FeTiO}_3\text{-Al-Si-SiO}_2\text{-C}$ . Приведены экспериментальные результаты по влиянию плотности прессования и состава исходной шихты на качество получаемых изделий. Выявлены основные типы дефектов, возникающих в процессе синтеза. Установлены причины возникновения брака. Наличие в составе шихты частиц крупнее заданной дисперсности приводит к появлению в изделии проплавлений (каверн). Причина их образования заключается в повышенном содержании жидкой фазы в этих областях вследствие замедления скорости реакции и роста температуры. При увеличении плотности в изделиях формируются поперечные и продольные расслоения. Причиной расслоений является действие давления газообразных продуктов в условиях малой газопроницаемости образца, ухудшающейся с ростом плотности. Разработана технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза крупногабаритных пористых изделий (КГПИ) и представлены фотографии фильтр-элементов (ФЭ): для типовой промышленной газовой горелки ГГ-2; для очистки перегретого пара и обессоленной воды (ФЭ используются в технологических аппаратах по получению поливинилхлоридов в ОАО «Саянскимпласт»); для обезжелезивания воды из артезианских скважин. Для получения бездефектных КГПИ необходимо оптимальное соотношение гранулометрического состава и плотности образца, а также скорости реакции и скорости теплоотвода.

**Ключевые слова:** горение, фильтры, трещины, усадка.

**Юсупов Р.А.** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН (634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3). E-mail: rash1956@yandex.ru.

**Афанасьев Н.И.** – докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией металлических систем отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН. E-mail: af42@yandex.ru.

**Шульпеков А.М.** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН. E-mail: shulp@yandex.ru.

**Для цитирования:** Юсупов Р.А., Афанасьев Н.И., Шульпеков А.М. Дефекты при получении крупногабаритных полых пористых цилиндрических фильтров методом СВС // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 4. С. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-4-10.

*Yusupov R.A., Afanas'ev N.I., Shul'pekov A.M.*

### **Defects in large hollow porous cylindrical filters made by SHS**

The relevance of research is connected with the use of ceramic filters in biology and medicine for fine filtration of air and biological fluids abroad. Due to the unique combination of chemical and thermal resistance, high strength and thermal conductivity, ceramic filters are used to clean aggressive liquids, superheated high pressure steam and other gases. The dependence of burning rate on the relative density and granulometric composition of  $\text{FeTiO}_3\text{-Al-Si-SiO}_2\text{-C}$  powder mixtures is studied. The paper provides experimental results on the influence of initial charge compact density and composition on the quality of products obtained. The main types of defects appearing in the synthesis are identified. The causes of defects are found. Feedstock with particle sizes larger than specified values results in penetrations (cavities) occurring in the product. Their formation is caused by the increased liquid phase content in these regions due to decelerating reaction rate and rising temperature. Higher density results in transverse and longitudinal laminations in the product. Such laminations are formed under the pressure of gaseous products with the low gas permeability of the sample that declines as density increases. The technology of self-propagating high-temperature synthesis of large porous products is developed with the photographs of filtering elements presented: for the typical industrial gas burner GG-2, for superheated steam and demineralized water purification (filtering elements used in polyvinyl chloride process vessels at JSC «Sayanskhimplast»), for iron removal from artesian water. Defect-free large porous products can be obtained with an optimal ratio of the sample grain size distribution and density, as well as reaction rate and heat removal rate.

**Keywords:** burning, filters, cracks, shrinkage.

**Yusupov R.A.** – Cand. Sci. (Tech.), leader researcher of the Department of structural macrokinetics of the Tomsk scientific center (634055, Russia, Tomsk, Akademicheskii pr., 10/3), Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS). E-mail: rash1956@yandex.ru.

**Afnas'ev N.I.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), head of the metal systems laboratory, Department of structural macrokinetics, Tomsk scientific center SB RAS. E-mail: af42@yandex.ru.

**Shul'pekov A.M.** – Cand. Sci. (Tech.), leader researcher of the Department of structural macrokinetics, Tomsk scientific center SB RAS. E-mail: shulp@yandex.ru.

**Citation:** Yusupov R.A., Afnas'ev N.I., Shul'pekov A.M. Defekty pri poluchenii krupnogabaritnykh polykh poristykh tsilindricheskikh fil'trov metodom SVS. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 4. P. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-4-10.

## Введение

Традиционным средством очистки газовых и жидких сред являются керамические и металло-керамические фильтры, сфера использования которых непрерывно расширяется в различных областях промышленности благодаря уникальному сочетанию химической и термической стойкости, высокой прочности и теплопроводности. Керамические фильтры в настоящее время широко применяются за рубежом в биологии и медицине для тонкой фильтрации биологических жидкостей, воздуха [1–6].

В большинстве случаев пористые проницаемые изделия изготавливают методами порошковой металлургии, основанными на спекании их в высокотемпературных печах [7–11]. Однако при получении крупногабаритных пористых изделий (КГПИ) различной конфигурации необходимы сложное оборудование, большие промышленные площади, объемные печи с большим потреблением электроэнергии. Процесс является многостадийным, требует больших затрат времени и энергоресурсов, что влечет за собой высокую себестоимость и сдерживает широкое применение в промышленности.

Одним из передовых методов получения КГПИ является энергосберегающий процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), открытый акад. А.Г. Мержановым с соавт. [12] в 1967 г. Он заключается в использовании экзотермической реакции в порошковых системах, которая протекает в виде самораспространяющейся волны горения. В процессе СВС возникают высокие термические, концентрационные и диффузионные напряжения, которые могут приводить к растрескиванию изделий [13–15]. Влияние различных факторов на структуру и свойства изделий исследовано в работах [16–18].

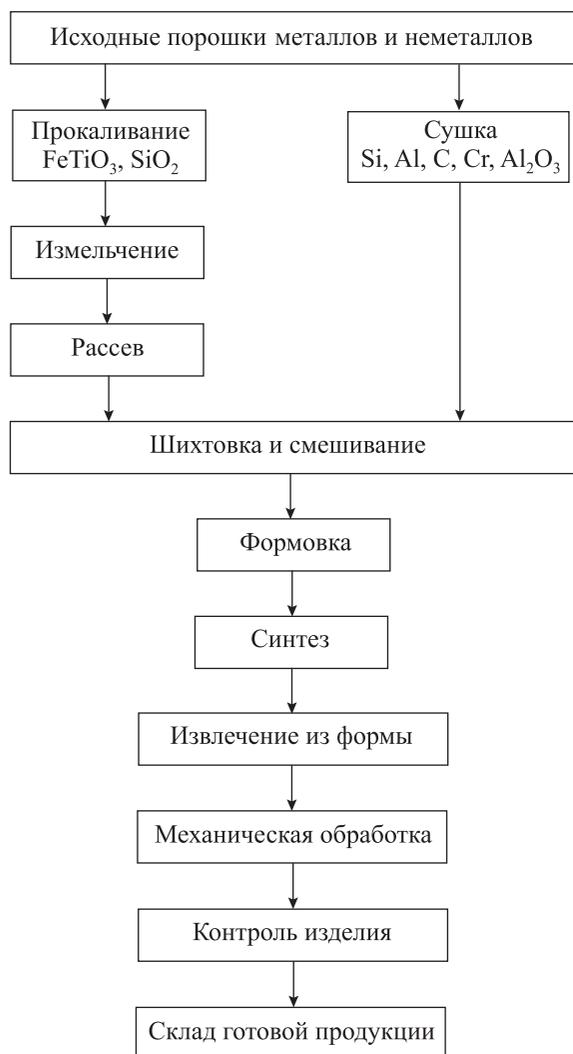
Цель настоящей работы заключается в разработке оптимальных режимов СВС, позволяющих получать бездефектные КГПИ.

## Технология получения КГПИ методом СВС

Технология СВС основана на сжигании порошковой шихты в специальных реакторах, и структура СВС-продуктов зависит от целого ряда факторов, среди которых основное значение имеют состав и структура шихты, параметры синтеза, объемная скорость выделения примесных газов и наличие жидкой фазы в волне горения. Технологическая карта получения КГПИ (рис. 1) отрабатывалась на опытном участке отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН. В основу были положены результаты исследований горения смесей порошков в установке постоянного давления с использованием природных минералов [19, 20].

Для определения скорости распространения фронта горения по образцу использовали базисный метод, основанный на измерении времени прохождения волны горения при известном расстоянии по вертикали между датчиками. Максимальную температуру горения определяли вольфрам-рениевыми термодарами ВР5–ВР20.

Процесс получения фильтров состоит из трех последовательных стадий: приготовление экзотермической смеси, формовка, синтез изделий с необходимой геометрией. На первом этапе исходные порошки проходят термическую обработку с целью удаления влаги, измельчаются до необходимой дисперсности, взвешиваются в заданном процентном соотношении и смешиваются для равномерного распределения частиц в смеси. Вторая стадия заключается в размещении реакционной

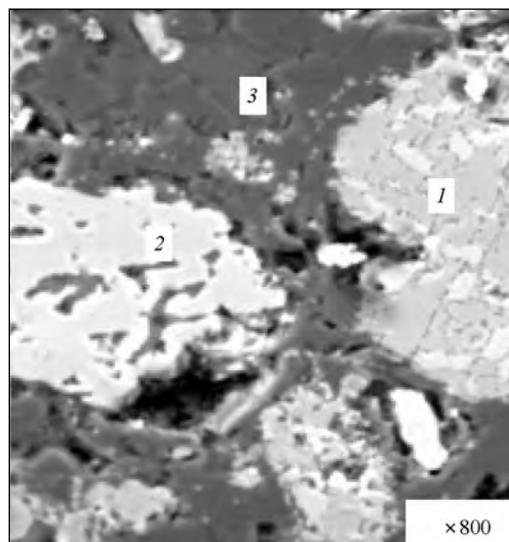


**Рис. 1.** Технологическая схема получения пористых проницаемых изделий методом СВС

смеси в формообразующем реакторе и прессовании с заданной плотностью. На следующей ступени проводится СВ-синтез шихты, реализуемый в виде волны горения.

На рис. 2. представлена микроструктура продуктов реакции. Цифрами обозначены фазы, химический состав. Структура конечного продукта состоит из взаимопроникающих фаз, которые представляют собой оксид алюминия, карбиды, нитриды, интерметаллиды и твердые растворы на основе металлов.

Исследования показывают, что с увеличением габаритов пористых изделий растет эффективность данного метода по сравнению с методами порошковой металлургии [21]. Однако при получении КГПИ методом СВС пришлось решать ряд сложных задач, связанных с высокими температу-



**Рис. 2.** Микроструктура конечного продукта реакции смеси, мас. %:  $64,21\text{FeTiO}_3 + 23,09\text{Al} + 10\text{Si} + 2,7\text{C}$   
 Содержание элементов, мас. %:  
 1 – 32Si, 27Ti, 0,5Cr, 1,0Mn, 29Fe, 10,5N  
 2 – 35Si, 31Ti, 0,6Cr, 1,0Mn, 33Fe  
 3 – 48Al, 0,7Si, 1,4Ti, 49O

рами синтеза, быстротечностью протекания процесса и, как следствие, с большими выделениями тепловой энергии за короткий промежуток времени, отсутствием конструкторских разработок по созданию специализированного оборудования.

## Результаты экспериментов

Согласно представленной технологии получения пористых материалов, нами были изготовлены следующие фильтр-элементы (ФЭ):

- в качестве насадки для типовой промышленной газовой горелки ГГ-2 (рис. 3);
- для очистки перегретого пара и обессоленной воды (рис. 4), — ФЭ используются в технологических аппаратах по получению ПВХ в ОАО «Саянскхимпласт»;

- для обезжелезивания воды из артезианских скважин (наружный диаметр ФЭ — 120 мм, внутренний диаметр — 80 мм, длина — 300 мм) и др.

Компоненты исходной шихты для получения пористых материалов с заданными эксплуатационными характеристиками находились в следующих пределах, мас. %:  $51,28\text{—}73,56\text{FeTiO}_3$ ;  $22,47\text{—}29,75\text{Al}$ ;  $0\text{—}15,0\text{Si}$ ;  $0\text{—}18,76\text{SiO}_2$ ;  $0\text{—}3,48\text{C}$ .

В результате экспериментов выявлен ряд характерных причин возникновения брака при получении пористых изделий. Так, при подготовке



**Рис. 3.** Фильтрационный элемент + горелка ГГ-2

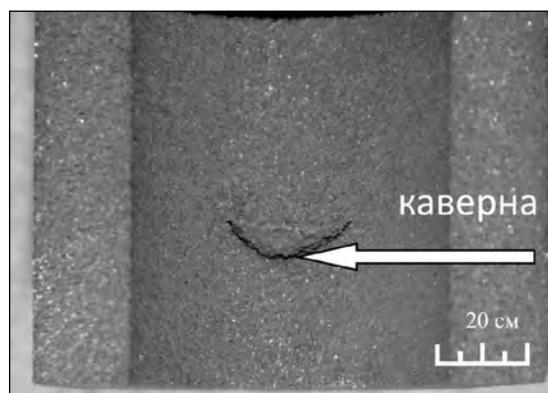
Размеры ФЭ: наружный диаметр – 240 мм, внутренний диаметр – 195 мм, длина – 1350 мм



**Рис. 4.** Фильтр-патроны

Наружный диаметр – 70 мм, внутренний диаметр – 40 мм, длина – 1000 мм

шихты важную роль играет гранулометрический размер порошков. При попадании в шихту частиц крупнее заданной дисперсности в процессе синтеза смеси появляются проплавления (каверны) (рис. 5). Причиной их возникновения является повышенное содержание жидкой фазы в этих областях, обусловленное замедлением реакции. Это подтверждается тем, что скорость горения (состав шихты, мас. %: 73,74FeTiO<sub>3</sub> + 26,23Al) при увеличении размера исходных частиц ( $d$ ) уменьшается с 2,32 мм/с ( $d < 40$  мкм) до 1,14 мм/с ( $d = 100 \pm 160$  мкм), а температура в реакционной зоне составляет 2170 К. При данной температуре большинство образующихся фаз при протекании алюмотермической реакции находятся в расплавленном состоянии. В результате увеличения времени нахождения образующихся фаз в жидком состоя-



**Рис. 5.** Фрагмент фильтра с каверной

нии происходит коалесценция капель в слитки и тем самым нарушается образование каркаса пористого материала.

Зависимости скорости горения от относительной плотности смесей имеют экстремальный характер (рис. 6), который объясняется различными тенденциями в изменении теплофизических и кинетических характеристик системы. Различие в скорости горения образцов составов 1 и 2 при относительной плотности до 0,6 отн. ед. обуславливается разницей в теплопроводности образцов за счет различного содержания алюминия в смеси. При большей плотности, когда обеспечивается максимально плотный контакт между частицами в смеси, этот эффект нивелируется. Максимум зависимости  $u(\rho_{отн})$  формируется, по-видимому, следующим образом. С повышением плотности увеличивается теплопроводность материала, улучшаются условия протекания гетерогенной реакции за счет роста числа контактов между частицами компонентов; в результате скорость горения возрастает. Одновременно с увеличением плотности усиливается расслоение образца в процессе реакции, что ведет к уменьшению скорости распространения тепла и скорости горения. Причиной расслоения является, по-видимому, действие давления газообразных продуктов реакции в условиях малой газопроницаемости образца, ухудшающейся с ростом плотности. Данное расслоение наблюдается на изделиях с повышенной относительной плотностью (рис. 7).

В работе [18] получено уравнение для избыточного давления газа:

$$P = ku(D - d)^2 \rho v,$$

где  $u$  — линейная скорость горения;  $D$  — внешний диаметр цилиндра;  $d$  — его внутренний диаметр;

$\rho$  — плотность образца;  $v$  — объем газа, выделяющегося из единицы массы шихты; коэффициент  $k$  зависит от проницаемости, плотности и вязкости газа.

Одним из основных параметров, с помощью которого можно управлять избыточным давлением, является скорость горения. Однако при ее уменьшении реакция может перейти в спиновый, очаговый или автоколебательный режим, что еще больше увеличивает вероятность растрескивания образца (рис. 8).

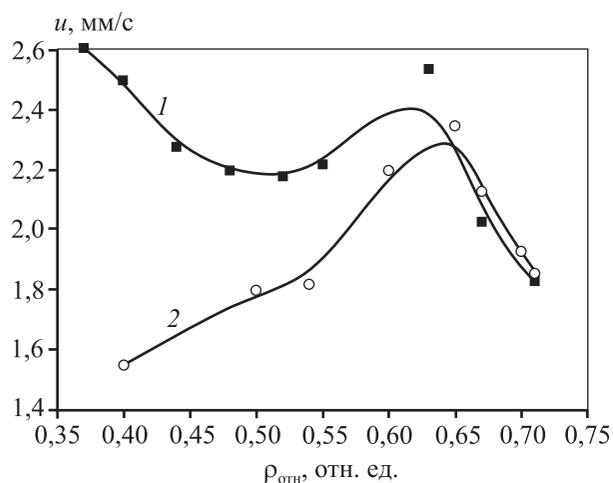
Для снижения давления газообразных продуктов горения и предотвращения разрушения образца авторы [22] предлагают проделывать отверстия

в заготовке. Этот способ технологически невыгоден, так как требует на заключительном этапе заделывания этих отверстий.

Существует ряд других причин, приводящих к растрескиванию образца. Одна из них связана с объемной усадкой (спеканием) материала в процессе горения. Самоуплотнение образца способствует интенсификации теплопереноса и горения. С уменьшением плотности от 0,55 до 0,35 скорость горения повышается с одновременным увеличением объемной усадки от 7 до 20 % (кр. 1 на рис. 6). На кр. 2 рис. 6 аналогичного роста скорости горения не наблюдается, что коррелирует с малой величиной усадки, ограничивающейся 5–8 %. На зависимость скорости горения от плотности влияет также равномерность растекания расплава в среде твердых компонентов.

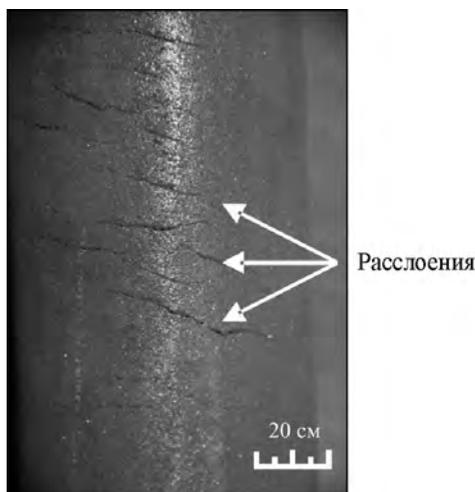
Необходимо отметить, что изменения скорости горения за счет повышения теплопроводности реакционной системы при уплотнении исходной смеси и при самоуплотнении материала не равнозначны. В первом случае нарастает расслоение образца при горении, что ограничивает теплопередачу. Во втором случае процесс спекания ведет к ликвидации структурных дефектов образца, что способствует теплопередаче.

Согласно [19, 23], пористый продукт реакции формируется из суспензионного состояния (расплав — твердые частицы) как в волне, так и за волной реакции. Температура горения в центре образца выше, чем на периферии, на  $\geq 50 \div 100$  К. Из-за того, что теплоотдача с наружных стенок изделия больше, чем внутри, процесс кристаллизации на внешней поверхности начинается раньше. Согласно данным металлографического анализа, поровая структура изменяется от центра образца к периферии в сторону уменьшения. Градиент температуры, возникающий в процессе охлаждения образца,

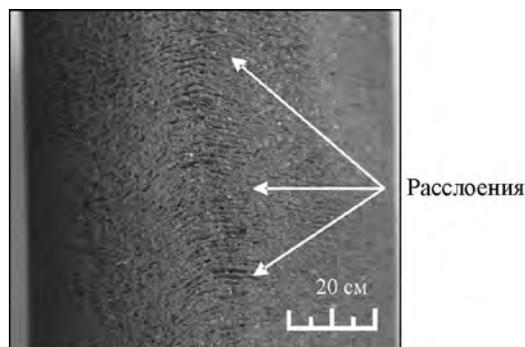


**Рис. 6.** Зависимость скорости горения смеси от относительной плотности

1 —  $44,95\text{FeTiO}_3 + 25,95\text{Al} + 16,4\text{SiO}_2 + 10\text{Si} + 2,7\text{C}$   
 2 —  $54,58\text{FeTiO}_3 + 19,62\text{Al} + 23,1\text{Si} + 2,7\text{C}$



**Рис. 7.** Фрагмент фильтра с поперечным расслоением



**Рис. 8.** Фрагмент сгоревшего в автоколебательном режиме фильтра с поперечным растрескиванием

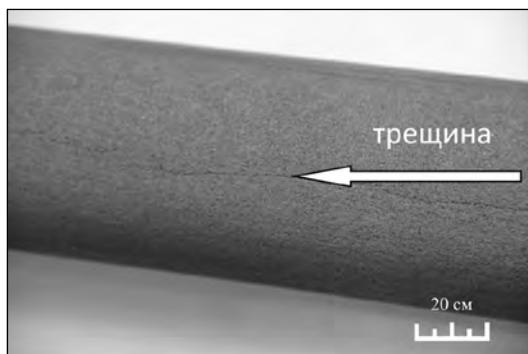


Рис. 9. Фрагмент фильтра с продольной трещиной

приводит к появлению термических напряжений, что также способствует его растрескиванию. На внутренней поверхности образца возникают сжимающие напряжения, а на внешней — растягивающие, что обуславливает образование продольных трещин (рис. 9).

## Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что растрескивание образца связано с избыточным давлением выделяющегося газа, спеканием образца и термическими напряжениями. Уменьшение избыточного давления может быть достигнуто за счет снижения температуры и скорости горения. Этому способствует разбавление исходной шихты конечным продуктом. При этом в шихте увеличивается количество твердой фазы, что приводит одновременно к уменьшению усадки образца.

Для снижения градиента температуры в радиальном направлении необходимо регулировать теплоотвод с внешней и внутренней поверхностей полого цилиндра. Это может быть достигнуто за счет теплоизоляции внешней поверхности и отвода тепла с внутренней поверхности.

## Литература

1. *Kawai Ch., Matsuura T., Yamakawa A.* Separation-permeation performance of porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics composed of columnar  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  grains as membrane filters for micro-filtration // *J. Mater. Sci.* 1999. Vol. 34. No. 5. P. 893—896.
2. *Yang L., Ning X., Chen K., Zhou H.* Preparation and properties of hydroxyapatite filters for microbial filtration // *Ceram. Int.* 2007. Vol. 33. No. 3. P. 483—489.
3. *Luo M., Gao J., Qiao G., Jin Z.* Synthesis of wood-derived

ceramics from biological templates // *Prog. Chem.* 2008. Vol. 20. No. 6. P. 989—1000.

4. *Luyten J., Mullens S., Thijs I.* Designing with pores-synthesis and applications // *Kona Powder Particle J.* 2010. Vol. 28. P. 131—142.
5. *Jimbo H., Miki N.* Gastric-fluid-utilizing micro battery for micro medical devices // *Sensors Actuat. B: Chem.* 2008. Vol. 134. No. 1. P. 219—224.
6. *Hammel E.C., Ighodaro O.L.-R., Okoli O.I.* Processing and properties of advanced porous ceramics: an application based review // *Ceram. Int.* 2014. Vol. 40. No. 10. P. 15351—15370.
7. *Арте К., Оустек К.* Металлокерамические фильтры / Пер. с нем. М.: Судпромгиз, 1959.
8. *Белов С.В.* Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981.
9. *Андреевский Р.А.* Пористые металлокерамические материалы. М.: Металлургия, 1964.
10. *Павловская Е.И., Шибряев Б.Ф.* Металлокерамические фильтры. М.: Недра, 1967.
11. *Анциферов В.Н., Пещеренко С.Н.* Пористые вещества как новый класс материалов // *Перспект. материалы.* 2000. No. 5. С. 5—8.
12. *Мержанов А.Г., Боровинская И.П.* Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений // *Докл. АН СССР.* 1972. Т. 204. No. 2. С. 366—369.
13. *Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М., Мержанов А.Г.* О влиянии капиллярного растекания на горение безгазовых систем // *Физика горения и взрыва.* 1981. Т. 17. No. 6. С. 10—15.
14. *Юхвид В.И.* Закономерности фазоразделения в металлотермических процессах // *Изв. АН СССР. Металлы.* 1980. No. 6. С. 61—64.
15. *Макаренко А.Г.* Технология керамических материалов на основе СВС с фильтрацией газов // *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2001. No. 2. С. 64—68.
16. *Wisutmethangoon S., Denmud N., Sikong L.* Characteristics and compressive properties of porous TiNi alloy synthesized by SHS technique. // *Mater. Sci. Eng. A.* 2009. No. 515. P. 93—97.
17. *Hehmet Kaya, Nuri Orhan, Gul Tosun.* The effect of the combustion channels on the compressive strength of porous TiNi shape memory alloy fabricated by SHS as implant material // *Current Opin. Solis State Mater. Sci.* 2010. No. 14. P. 21—25.
18. *Frank W. Zok., Carlos G. Levi.* Mechanical properties of porous-matrix ceramics composites // *Adv. Eng. Mater.* 2001. No. 1—2. P. 15—23.
19. *Кирдяшкин А.И., Юсупов Р.А., Максимов Ю.М., Кутлер В.Д.* Закономерности технологического горения порошковых систем на минеральной основе при получении пористых композиционных материала-

- лов // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. No. 5. С. 85—89.
20. Юсупов Р.А., Кирдяшкин А.И., Балашов В.Б. Способ изготовления пористых труб: Пат. 1818800 (РФ). 1996.
  21. Кванин В.Л., Балихина Н.Т. Получение крупногабаритных твердосплавных изделий — одно из технологических направлений, использующих процесс СВС // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2006. No. 5. С. 50—61.
  22. Вадченко С.Г., Балихина Н.Т., Кванин В.Л. Особенности горения полых цилиндрических тел // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. No. 4. С. 53—58.
  23. Мазной А.С., Кирдяшкин А.И., Китлер В.Д., Максимов Ю.М., Юсупов Р.А. Структурные особенности пористых материалов, сформированных волной самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Перспект. материалы. 2013. No. 3. С. 5—13.
  - ganicheskikh soedinenii [SHS refractory inorganic compounds]. *Dokl. AN SSSR*. 1972. Vol. 204. No. 2. P. 366—369.
  13. Kirdyashkin A.I., Maksimov Yu.M., Merzhanov A.G. O vliyaniy kapillyarnogo rastekaniya na gorenije bezgazovykh system [On the influence of the capillary spreading of combustion without gas systems]. *Fizika gorenija i vzryva*. 1981. Vol. 17. No. 6. P. 10—15.
  14. Yukhvid V.I. Zakonomernosti fazorazdeleniya v metal-lotermicheskikh protsessakh [Laws of gas separation processes in metallothermic]. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1980. No. 6. P. 61—64.
  15. Makarenko A.G. Tekhnologiya keramicheskikh materialov na osnove SVS s fil'tratsiei gazov [Technology of ceramic materials based on SHS filtering gases]. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2001. No. 2. P. 64—68.
  16. Wisutmethangoon S., Denmud N., Sikong L. Characteristics and compressive properties of porous TiNi alloy synthesized by SHS technique. *Mater. Sci. Eng. A*. 2009. No. 515. P. 93—97.
  17. Hehmet Kaya, Nuri Orhan, Gul Tosun. The effect of the combustion channels on the compressive strength of porous TiNi shape memory alloy fabricated by SHS as implant material. *Current Opin. Solis State Mater. Sci*. 2010. No. 14. P. 21—25.
  18. Frank W. Zok., Carlos G. Levi. Mechanical properties of porous-matrix ceramics composites. *Adv. Eng. Mater*. 2001. No. 1—2. P. 15—23.
  19. Kirdyashkin A.I., Yusupov R.A., Maksimov Yu.M., Kitler V.D. Zakonomernosti tekhnologicheskogo gorenija poroshkovykh system na mineral'noi osnove pri poluchenii poristykh kompozitsionnykh materialov [Laws of the process of burning powder systemic mineral base in the preparation of porous composite materials]. *Fizika gorenija i vzryva*. 2002. Vol. 38. No. 5. P. 85—89.
  20. Yusupov R.A., Kirdyashkin A.I., Balashov V.B. Sposob izgotovleniya poristykh trub [A process for producing porous tubes]: Pat. 1818800 (RF). 1996.
  21. Kvanin V.L., Balikhina N.T. Poluchenie krupnogabaritnykh tverdosplavnykh izdelii — odno iz tekhnologicheskikh napravlenii, ispol'zuyushchikh protsess SVS [Production of large-sized carbide products — one of the technological areas using SHS process]. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2006. No. 5. P. 50—61.
  22. Vадченко S.G., Balikhina N.T., Kvanin V.L. Osobennosti gorenija polykh tsilindricheskikh tel [Features burning hollow cylindrical bodies]. *Fizika gorenija i vzryva*. 2002. Vol. 38. No. 4. P. 53—58.
  23. Maznoi A.S., Kirdyashkin A.I., Kitler V.D., Maksimov Yu.M., Yusupov R.A. Strukturnye osobennosti poristykh materialov, sformirovannykh volnoi samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza [The structural features of porous materials, the wave SHS]. *Perspektivnye materialy*. 2013. No. 3. P. 5—13.

## References

1. Kawai Ch., Matsuura T., Yamakawa A. Separation-permeation performance of porous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics composed of columnar β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> grains as membrane filters for micro-filtration. *J. Mater. Sci*. 1999. Vol. 34. No. 5. P. 893—896.
2. Yang L., Ning X., Chen K., Zhou H. Preparation and properties of hydroxyapatite filters for microbial filtration. *Ceram. Int*. 2007. Vol. 33. No. 3. P. 483—489.
3. Luo M., Gao J., Qiao G., Jin Z. Synthesis of wood-derived ceramics from biological templates. *Prog. Chem*. 2008. Vol. 20. No. 6. P. 989—1000.
4. Luyten J., Mullens S., Thijs I. Designing with pores-synthesis and applications. *Kona Powder Particle J*. 2010. Vol. 28. P. 131—142.
5. Jimbo H., Miki N. Gastric-fluid-utilizing micro battery for micro medical devices. *Sensors Actuat. B: Chem*. 2008. Vol. 134. No. 1. P. 219—224.
6. Hammel E.C., Ighodaro O.L.-R., Okoli O.I. Processing and properties of advanced porous ceramics: an application based review. *Ceram. Int*. 2014. Vol. 40. No. 10. P. 15351—15370.
7. Arte K., Oustek K. Metallokeramicheskie fil'try [Metal ceramic filters]. Moscow: Sudpromgiz, 1959.
8. Belov S.V. Poristye metally v mashinostroenii [The porous metals in engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1981.
9. Andrievskii R.A. Poristye metallokeramicheskie materialy [Porous metal-ceramic materials]. Moscow: Metallurgiya, 1964.
10. Pavlovskaya E.I., Shibryaev B.F. Metallokeramicheskie fil'try [Metalceramic filter]. Moscow: Nedra, 1967.
11. Antsiferov V.N., Peshcherenko S.N. Poristye veshchestva kak novyi klass materialov [The porous material as a new class of materials]. *Perspektivnye materialy*. 2000. No. 5. P. 5—8.
12. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyi sintez tugoplavkikh neor-