

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОГНЕВЗРЫВОПРЕГРАДИТЕЛЯ

При добыче каменного угля преобладающим является подземный способ, обеспечивающий более высокое качество полезного ископаемого. В угольных шахтах при разработке газоносных пластов происходят выделения метана, являющегося причиной формирования взрывоопасной смеси при его смешивании с шахтным воздухом, а также способствующему самовозгоранию угля. Для контроля рудничной атмосферы используются сигнализаторы метана. Термокаталитический датчик является основным элементом такого газоанализатора. Датчик помещается в воздухопроницаемый корпус, называемый огневзрывопреградителем. В данной статье рассматривается возможность замены материала, идущего на изготовление огневзрывопреградителя. В основе существующего материала лежит никелевый порошок, его предлагается заменить на металлокерамическую связку. Состав керамического материала детали разработан авторами и приводится в статье. Замена материала приведет к существенному снижению стоимости детали и упрощению технологии изготовления.

Ключевые слова: газоанализатор, метан, огневзрывопреградитель, никелевый порошок, керамическая связка.

Введение. При добыче каменного угля подземным способом чрезвычайно важно обеспечить безопасные условия труда шахтеров. Так как наряду с пылью рудничная атмосфера может содержать различные взрывчатые, токсичные, радиоактивные и инертные газы, то безопасность во многом определяется надежностью газоаналитических приборов и аппаратуры.

Для измерения концентрации метана наибольшее распространение получили непрерывно действующие приборы, основанные на термокаталитическом принципе. Принцип действия термохимического (термокаталитического) датчика основан на беспламенном сжигании (окислении) метана на поверхности каталитически активного элемента и измерении количества выделившегося при этом тепла [1]. Поступление анализируемой газовой смеси в реакционную камеру и удаление продуктов реакции окисления осуществляются благодаря диффузии через поры (отверстия) газообменного фильтра-огневзрывопреградителя [2]. При эксплуатации газоанализатора в производственных условиях поступающая из рудничной атмосферы газовая смесь проникает через поры огневзрывопреградителя в реакционную камеру. При этом метан поступает на рабочий точечный чувствительный элемент (ТЧЭ) и окисляется на нем. Так как катали-

тически активный элемент является катализатором глубокого окисления, реакция идет так же, как и при обычном горении:



Продукты реакции (CO_2 и H_2O) вследствие градиента концентрации диффундируют через поры газообменного фильтра (огневзрывопреградителя) наружу. Внутри камеры наблюдается повышение температуры газовой смеси. Превышение этой температуры над температурой воздуха, омывающего стенки камеры, зависит от ее размеров и конструкции и может составлять от нескольких градусов до 450 °С. При достижении дозврывной концентрации метана (более 5 % по объему) срабатывает звуковой сигнализатор, оповещающий об опасности.

Исходя из этого, к материалу огневзрывопреградителя предъявляются высокие прочностные требования и наличие запаса теплостойкости. В то же время он должен обладать достаточной проницаемостью для обеспечения циркулирования газовой смеси из атмосферы в реакционную камеру и для удаления продуктов химической реакции наружу. Поэтому разработка нового, более дешевого, материала для изготовления огневзрывопреградителя является актуальной задачей.



Рис. 1. Огневзрывопреградитель, изготовленный из материала на основе никелевого порошка

Постановка задачи. По существующей на сегодняшний день технологии огневзрывопреградитель (рис. 1) получают из пористого металлокерамического материала на основе никелевого порошка. Как известно, никель весьма дорогостоящий ме-

талл, что существенно повышает себестоимость газообменного фильтра.

Целью данного исследования является разработка нового композиционного материала, компоненты которого являлись бы более экономичными. При этом новый материал должен удовлетворять эксплуатационным характеристикам, таким как воздухопроницаемость и прочность.

Воздухопроницаемость материала детали должна быть в пределах 16–90 л/мин при давлении потока воздуха ($5,86 \pm 0,02$) кПа. Требования к механической прочности составляют обеспечивать механическую прочность (не менее 300 МПа) при давлении воздуха не менее 981 кПа.

При спекании огневзрывопреградителя из материала на основе никелевого порошка используется дорогостоящая печь с водородной атмосферой. Возможность ее замены на печь более простой конструкции с воздушной атмосферой при работе с новым материалом существенно упростила и удешевила технологию получения рассматриваемой детали.

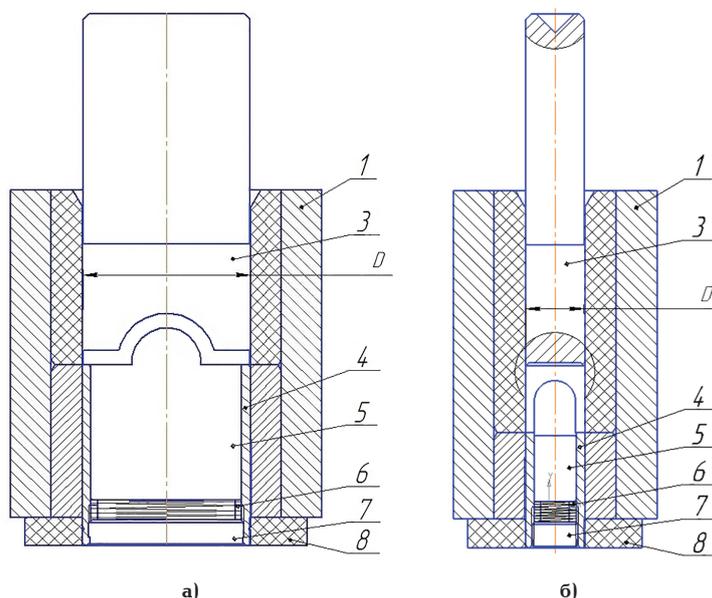


Рис. 2. Пресс-форма:

- а) 1 — матрица со вставкой (2), 3 — пуансон, 4 — съёмник,
5 — знак центральный, 6 — пружина, 7 — пробка, 8 — прокладка;
б) 1 — матрица со вставкой (2), 3 — пуансон, 4 — съёмник,
5 — знак центральный, 6 — пружина, 7 — пробка, 8 — прокладка

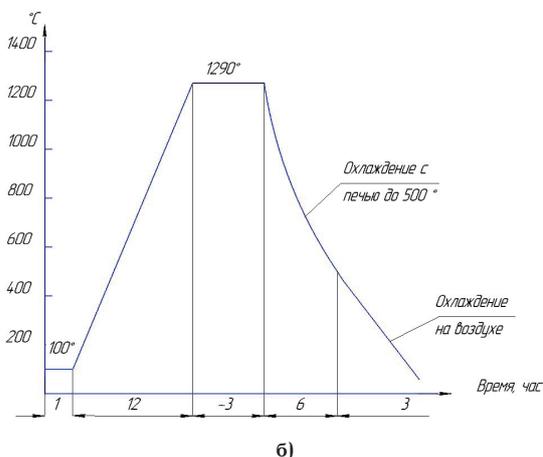
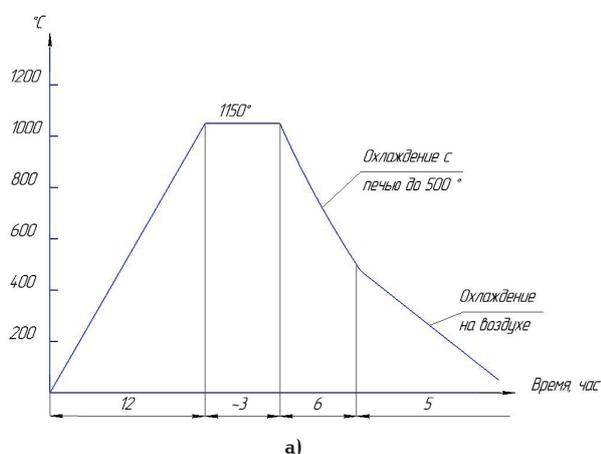
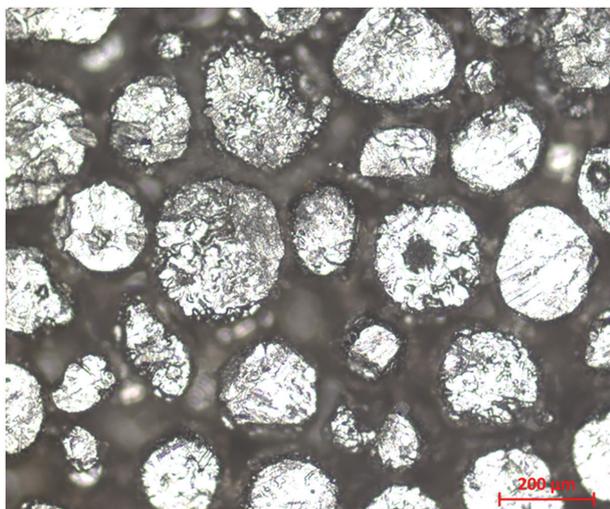


Рис. 3. График термической обработки металлокерамического огневзрывопреградителя: а) на никелевой основе; б) на основе разрабатываемого материала



a)



b)

Рис. 4. Структура материала:
а) на основе порошка никеля; б) на основе карбида кремния

Таблица 1

Состав зеленого карбида кремния, %

SiO	Fe	C
не менее 98	не более 0,2	не более 0,4

Таблица 2

Состав керамической связки, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
55–65	20–32	6–9	1,0	1,0	1,0

Существующая технология. В настоящий момент материал получают путем смешивания металлического порошка никеля (количество примесей не превышает 0,6 % Cu, 0,1 % C, 0,03 % Si) со стеаратом цинка ($[(CH_3(CH_2)_{16}COO)_2Zn]$), который при спекании выгорает и обеспечивает достаточную пористость огневзрывопреградителя. Затем выполняется прессование в специализированной установке (рис. 2а) и последующее спекание в печи с водородной атмосферой для предотвращения нежелательного окисления [3]. Повышенного эффекта при спекании заготовок из монометаллических (состоящих из одного компонента металла) порошков можно достигнуть при их нагревании до температуры, составляющей 72–92 % от температуры плавления металла (температура плавления никеля (Ni) — 1455 °С).

Для получения необходимой прочности проводится термическая обработка по режиму, представленному на рис. 3. Результаты оптической металлографии показывают, что образец состоит из частиц никеля размером 100–200 мкм, покрытых тонким слоем связующего вещества (рис. 4а).

Таким образом, технология получения представленной детали является материально-затратной и сложной. Использование в качестве материала детали металлокерамики предоставляет возможность

получения изделия со строго заданной регулируемой пористостью. Состав металлокерамики легко варьировать, добиваясь получения необходимой пористости, теплостойкости и прочности [4–9].

Применение в качестве основы порошка карбида кремния и металлокерамической связки вместо никеля может привести к снижению расходов на материал на порядок.

Результаты экспериментов. В качестве нового материала предложено использовать пористый карбид кремния, который имеет широкое распространение в различных отраслях промышленности из-за его уникальной комбинации свойств, таких как высокая механическая прочность, хорошая химическая стойкость, высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения, а также высокая устойчивость к тепловому удару [10–14]. Рассматриваемый в работе материал имел следующий состав: 76 % зеленого карбида кремния (зернистость 16–10), 2 % — декстрина, 22 % — керамической связки. Химический состав зеленого карбида кремния и керамической связки приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Добавление оксида алюминия уменьшает размер пор и размер частиц пористой мембраны SiC, что связано, главным образом, с образованием тонкого слоя SiO₂ — Al₂O₃ на поверхности частиц карбида кремния.

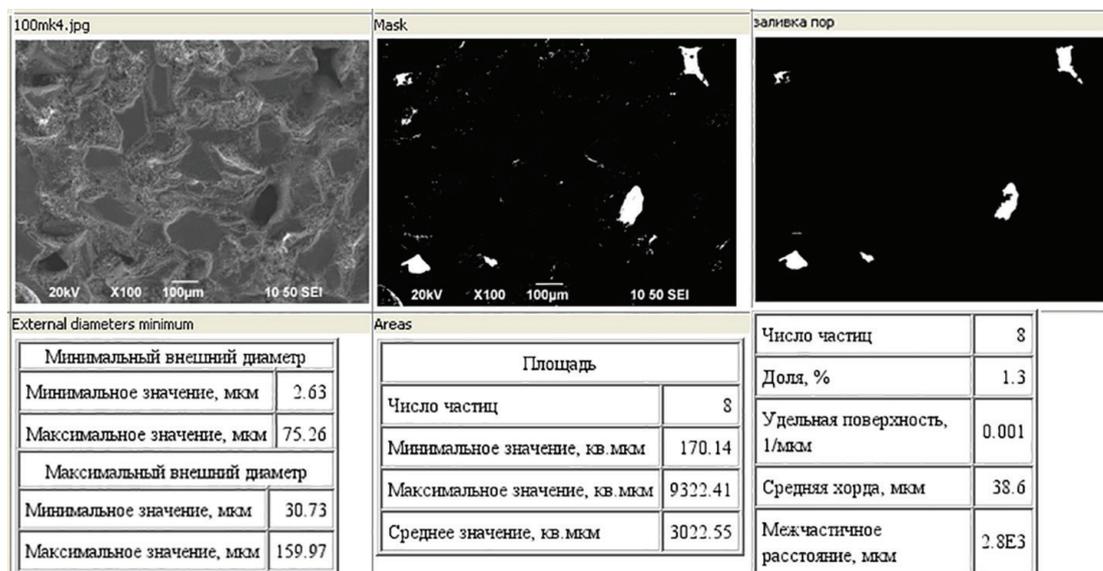


Рис. 5. Оценка доли и размера пор в исследуемом материале

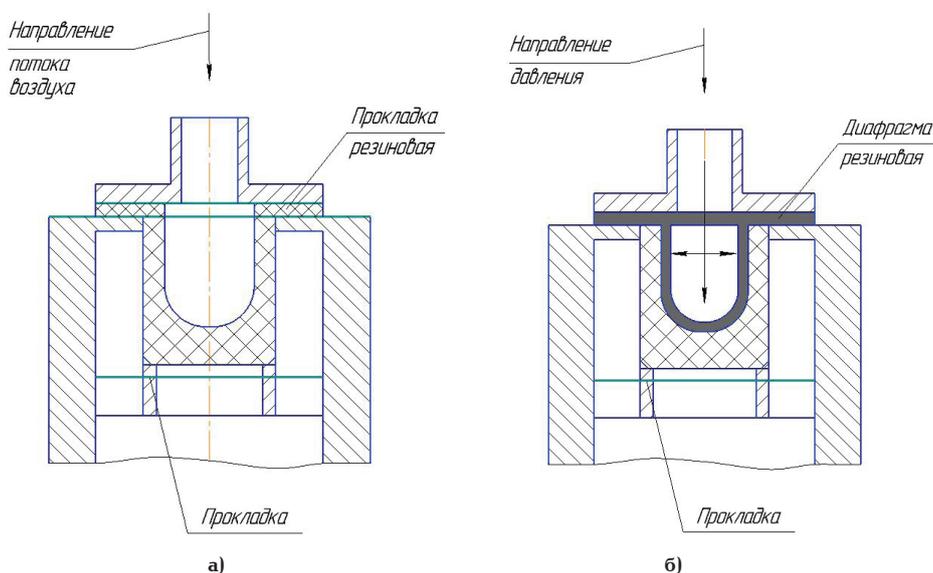


Рис. 6. Схемы испытаний: а) на воздухопроницаемость; б) на механическую прочность

При прессовании материала данного состава не удалось получить конфигурацию детали, приведенную на рис. 1. Поэтому была изменена форма детали. Огневзрывопопреградитель в новой конфигурации представляет собой полый цилиндр с глухим дном, и его прессовка происходит по схеме, представленной на рис. 2б, на том же пневматическом прессе, который применяется для прессования детали из никелевого порошка.

После смешивания новый материал проходил операции прессования и спекания. Серия проведенных экспериментов показала, что наиболее рациональным является следующий температурный режим спекания материала на основе карбида кремния: ступенчатый нагрев при температуре ступеньки 100 °С с выдержкой около часа до температуры 1290 °С. Время спекания составляет около трех часов, после чего следует замедленное охлаждение вместе с печью до температуры 500 °С и дальнейшее охлаждение на спокойном воздухе [15]. График процесса приведен на рис. 3б.

Металлографические исследования образцов проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer A1m (Carl Zeiss). Оценка пористости выполнялась на металлографическом анализаторе SIAMS 700.

Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-5700.

Структура материала на основе карбида кремния более дисперсна по сравнению с порошком никеля. Пространство между частицами карбида кремния размером 50–100 мкм заполняет керамическая связка, снижая таким образом пористость материала и повышая его прочность. В процессе спекания композиции карбид кремния — керамическая связка при 1000 °С на поверхности зерен полевого шпата происходит разрушение глины и появляются бурые субмикроскопические агрегаты, в то время как зерна карбида кремния не претерпевают изменений. Зерна карбида кремния окружены неоднородной темно-серой связку-

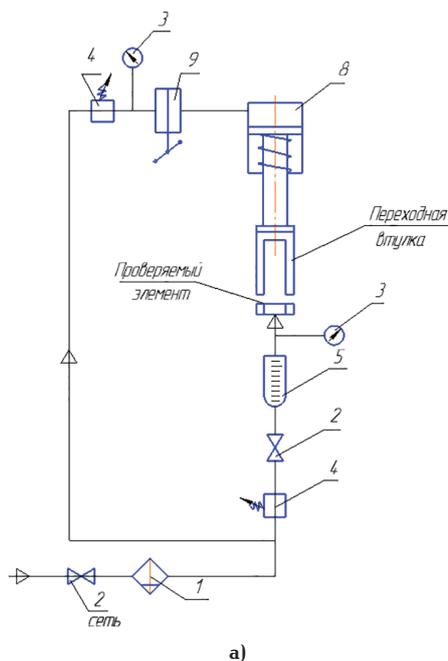


Рис. 7. Испытательный стенд: а) схема: 1 — влагоотделитель, 2 — вентиль, 3 — манометр образцовый, 4 — регулятор давления, 5 — ротаметр, 6 — вентиль, 7 — манометр, 8 — пневмакамера, 9 — педаль для распределения; б) общий вид

ющей массой, которая состоит из зерен полевого шпата, смешанных с глинистой составляющей. При $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ связка остекловывается и располагается вокруг зерна карбида кремния (рис. 4б).

Связка похожа на серую массу. Карбид кремния не образует жидкой фазы при температурах до $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, и при горячем прессовании уплотнение осуществляется в основном за счет перемещения частиц и незначительной пластической деформации. Разрушение такого материала носит хрупкий межзеренный характер.

Оценка пористости в материале на основе карбида кремния приведена на рис. 5.

Из рисунка видно, что доля пористости исследуемого материала составляет всего $1,3\%$ с минимальным значением диаметра поры $2,63\text{ }\mu\text{m}$ и максимальным в $159,97\text{ }\mu\text{m}$. При этом схема распределения пор скорее некластеризованная. При такой схеме значения прочности материалов возрастают в несколько раз по сравнению с «кластерным» распределением даже при одинаковых значениях пористости. Расчетный предел прочности при такой пористости достигает 366 МПа .

На заключительном этапе экспериментальных исследований проводилось испытание детали на прочность и воздухопроницаемость материала по схемам, представленным на рис. 6.

При испытании на прочность огнезрывопреградитель устанавливался в опору приспособления. В него вставлялся пуансон, покрытый полиуретаном для распределения давления. На диск приспособления устанавливался груз 10 кг и выдерживался в течение минуты.

Для испытания материала на воздухопроницаемость был разработан специальный стенд (рис. 7).

Стенд для определения газопроницаемости по воздуху состоит из монтажного стола и пульта приборов. На монтажном столе установлена пневмоголовка для зажима огнезрывопреградителя в кронштейне через переходную втулку. Воздух под давлением поступает в кронштейн и проходит

через поры оболочки. Перед началом испытаний открывался вентиль 2, и по манометру 3 определялось давление в системе стенда. Затем огнезрывопреградитель устанавливался в гнездо кронштейна, на него надвигалась переходная втулка и прижималась пневмоцилиндром.

Далее открывался вентиль сети 2 и вентилем сброса 6 устанавливался перепад давления в $0,6\text{ МПа}$ на образцовом манометре 7. С ротаметра 5 снимались показания газопроницаемости по воздуху огнезрывопреградителя.

Обсуждение результатов. Разработанный материал при испытаниях показал удовлетворительные прочностные показатели. Деталь сохраняла исходную форму под воздействием прилагаемой нагрузки без изменения структуры. Надо заметить, что деталь в первоначальной конфигурации не проходила испытания на прочность, что привело к изменению формы детали в сторону упрощения. В своей последней модификации все полученные огнезрывопреградители сохранили исходные кондиционные характеристики.

При испытаниях материала на воздухопроницаемость верхний уровень поплавка ротаметра всегда был выше красной черты, соответствующей 16 л/мин с учетом паспорта на ротаметр. Согласно требованиям, приведенным во втором разделе данной работы, подобный уровень воздухопроницаемости является удовлетворительным.

Технология изготовления огнезрывопреградителя из предложенного материала позволяет устанавливать пресс-форму на пневматический пресс, который использовался для получения детали из никелевого порошка.

Это позволяет избежать необходимости приобретения нового оборудования. Кроме того, при применении нового материала для изготовления детали появляется возможность отказаться от дорогостоящей и сложной в использовании печи с водородной атмосферой, заменив ее на более экономичную печь с воздушной атмосферой.

Расчет суммарной стоимости компонентов материала показал, что разработанный состав обеспечивает снижение стоимости на порядок.

Выводы и заключение. В результате проведенных исследований был разработан новый материал, рекомендуемый для изготовления газовых фильтров (огневзрывопогреградителей). Для испытания огневзрывопогреградителя на прочность и воздухопроницаемость был сконструирован специальный испытательный стенд, который может и в дальнейшем применяться для контроля качества готовых деталей. В ходе проверки детали на прочность, было обнаружено, что существующая конфигурация детали должна быть изменена в сторону упрощения. Конечная форма детали представляет собой полый цилиндр с глухим дном. Разработанный материал показал удовлетворительные показатели воздухопроницаемости и прошел испытания на прочность.

Химический состав рассматриваемого материала позволяет использовать для спекания печь с воздушной атмосферой взамен дорогостоящей печи с водородной атмосферой, применяемой для спекания детали из никелевого порошка.

Суммарная стоимость компонентов сплава на порядок ниже стоимости компонентов материала из никелевого сплава. Учитывая, что в общем случае себестоимость продукции на 60 % определяется стоимостью материала, применение более экономичного материала приведет к существенному снижению стоимости детали.

Библиографический список

1. Dudzińska A. Analysis of sorption and desorption of unsaturated hydrocarbons: Ethylene, propylene and acetylene on hard coals // *Fuel*. 2019. Vol. 246. P. 232–243. DOI: 10.1016/J.FUEL.2019.02.130.
2. Inceoğlu D. N., Özbay İ., Karademir A. VOC and PAH characterization of petroleum coke at maximum thermal decomposition temperature // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 2019. Vol. 41 (11). P. 1305–1314. DOI: 10.1080/15567036.2018.1548509.
3. Baux A., Nouvian L., Arnaud K. [et al.]. Synthesis and properties of multiscale porosity TiC-SiC ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39 (8). P. 2601–2616. DOI: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2019.02.031.
4. Матренин С. В., Слосман А. И. *Техническая керамика*. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 75 с.
5. Ривас П. Д. Э., Носенко В. А., Данилов Д. В. Химическая подготовка карбида кремния для получения самосвязанного карбида кремния // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2016. № 2 (316). С. 37–40.
6. Almansour A. S., Morscher, G. N. Tensile creep behavior of SiCf/SiC ceramic matrix minicomposites // *Journal of the European Ceramic Society*. 2020. № 40 (15). С. 5132–5146.
7. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Механизм диффузии монооксидов углерода и кремния в кристалле кубического карбида кремния // *Физика твердого тела*. 2019. Т. 61, № 12. С. 2334–2337.
8. Марков Ю. М., Закамов Д. В., Грачкова Д. В. Синтез порошка композиции нитрид кремния — карбид кремния в режиме СВЧ // *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. № 5 (26). С. 97–102.
9. Chen M., Shang R., Sberna P. M. [et al.]. Highly permeable silicon carbide-alumina ultrafiltration membranes for oil-in-water filtration produced with low-pressure chemical vapor deposition //

Separation and Purification Technology. 2020. № 253. P. 117496. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117496.

10. Латухина Н., Чепурнов В., Писаренко Г. Новые перспективы старых материалов: кремний и карбид кремния // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2013. № 4 (126). С. 104–110.

11. Arthanari S., Li Y., Nie L. [et al.]. Microstructural evolution and properties analysis of laser surface melted and Al/SiC clad magnesium-rare earth alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. № 848. P. 156598. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156598.

12. Курбаткина Е. И., Косолапов Д. В., Ходыкин Л. Г. [и др.]. Исследование влияния добавки кремния на фазовый состав алюминиевых композиционных материалов, армированных частицами карбида кремния // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 5 6. С. 35–38.

13. Гнесин Б. А. Возможности управления связностью карбида кремния в композиционных материалах карбид кремния — силициды молибдена // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*. 2014. № 12. С. 941–950. DOI: 10.7463/1214.0751844.

14. Li W., Shirvan K. Implications of SiC irradiation creep and annealing to UN-SiC fuel rod behavior // *Journal of Nuclear Materials*. 2020. № 542. P. 152479.

15. Rashad M., Sabu U., Logesh G. [et al.]. Development of porous mullite and mullite-Al₂O₃ composite for microfiltration membrane applications // *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 219. P. 74–81. DOI: 10.1016/J.SEPPUR.2019.03.013.

ПАНТЮХОВА Ксения Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 7161-2236

AuthorID (РИНЦ): 755568

AuthorID (SCOPUS): 57203591576

БУРГОНОВА Оксана Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» ОмГТУ. SPIN-код: 9859-7548

AuthorID (РИНЦ): 675336

AuthorID (SCOPUS): 57103594000

ФИЛИППОВ Юрий Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Оборудование и технология сварочного производства» ОмГТУ. SPIN-код: 4766-1795

AuthorID (РИНЦ): 175491

AuthorID (SCOPUS): 7006252515

УЛЯШЕВА Галина Петровна, инженер ООО НПО «Электроточприбор», г. Омск.

Адрес для переписки: ks.76@yandex.ru

Для цитирования

Пантюхова К. Н., Бургонова О. Ю., Филиппов Ю. О., Уляшева Г. П. Усовершенствование технологии изготовления огневзрывопогреградителя // *Омский научный вестник*. 2020. № 5 (173). С. 29–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-29-34.

Статья поступила в редакцию 07.09.2020 г.

© К. Н. Пантюхова, О. Ю. Бургонова, Ю. О. Филиппов, Г. П. Уляшева