

УДК 621.762

ВИБРОСТОЙКИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОРИСТЫЕ ПРОНИЦАЕМЫЕ СВС-МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОКАЛИНЫ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ И ДОБАВКАМИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ

Коломеец Максим Александрович¹,
kolomeets.m@yandex.ru

Мельберт Алла Александровна²,
aamelbert@mail.ru

Маецкий Александр Владимирович²,
maetsky@rambler.ru

Новосёлова Татьяна Васильевна³,
tatnovos@mail.ru

Тубалов Николай Павлович²,
manemale@mail.ru

Яковлева Ольга Владимировна⁴,
yakovlevaoly@mail.ru

¹ Алтайский государственный медицинский университет,
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 40.

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

³ Политехнический институт (филиал) Донского государственного технического университета,
Россия, 347904, г. Таганрог, ул. Петровская, 109-а.

⁴ Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
Казахстан, 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протожанова, 69.

Постоянно возрастающий интерес к практическому использованию пористых проницаемых металлокерамических материалов в машиностроении обусловлен необходимостью выпуска устройств для очистки газообразных выбросов в атмосферу от вредных веществ.

Пористые проницаемые материалы, получаемые с использованием технологий самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), открытого академиком А.Г. Мержановым и описанного научными школами СФУ (г. Красноярск), НГТУ (г. Новосибирск), АлтГТУ (г. Барнаул) и др., обладают целым рядом преимуществ. К основным из них можно отнести следующие: низкая энергоёмкость получения, возможность использования отходов машиностроения и металлургии, изготовление фильтров с высокими физико-механическими качествами и функциональными свойствами. Фильтры для очистки отработавших газов, полученные по СВС-технологиям, обладая достаточной механической прочностью на сжатие и изгиб, ударной вязкостью, коррозионной стойкостью при использовании на энергетических и автотранспортных средствах, подвержены разрушениям от вибраций.

Целью исследования является создание вибростойких металлокерамических пористых проницаемых материалов на основе окалина легированной стали, оксидов цветных металлов, алюминия и ферросилиция, полученных с применением СВС-технологий методом подбора состава шихты.

Результаты. Базовыми компонентами шихты являются Fe_2O_3 (окалина легированной стали) + Al_2O_3 (электрокорунд) + Al . Выбранный состав шихты получения проницаемых металлокерамических материалов на основе этих реагентов с добавлением (5–20) % CrO_2 (или Cr_2O_3), Cr , Ni и (0,5–1,5) % $FeSi$ (ферросилиция) позволяет получить виброустойчивый материал для фильтров отработавших газов на транспорте. Увеличение содержания по массе в % в указанных пределах компонентов, участвующих в синтезе (Fe_2O_3 , Cr , Ni , и $FeSi$), приводит к увеличению модуля упругости, что увеличивает жесткость получаемых материалов.

Ключевые слова:

СВС-материал, оксиды металлов, мелкозернистость, модуль упругости, виброустойчивость.

Введение

Пористые проницаемые металлокерамические материалы (ПММ), получаемые с использованием технологий самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1], описанного научными школами СФУ (г. Красноярск), НГТУ (г. Новосибирск), АлтГТУ (г. Барнаул) и др. [2–8], обладают

целым рядом преимуществ. К основным из них можно отнести следующие: получение СВС-продукта без энергозатрат, возможность использования отходов машиностроения и металлургии, изготовление фильтров с высокими физико-механическими качествами и функциональными свойствами.

Поскольку фильтрующие элементы отработавших газов работают в условиях различных по амплитудам и частотным параметрам колебательных процессов – это предопределяет высокий уровень динамических напряжений, возникающих в ПММ.

Поэтому фильтры, полученные по СВС-технологиям, обладая достаточными механической прочностью на сжатие и изгиб, ударной вязкостью, коррозионной стойкостью при использовании на энергетических и автотранспортных средствах, должны обладать вибростойкостью до 150...400 Гц [9–16].

Для установления механизма вибрации воспользуемся определением для вибро смещения и виброускорения. Вибро смещение – максимальные границы перемещения контролируемой точки (макроэлемента фильтра) в процессе вибрации относительно оси, параллельной сечению фильтра. Виброускорение характеризует силовое динамическое взаимодействие элементов внутри фильтрующего элемента, вызванное внешним воздействием со стороны динамической системы.

Экспериментально вышеуказанные физические величины, а также амплитуда, частота и разность фаз определяются измерителем вибрационных параметров ИВП-1 и спектрометром-индикатором СИ-1. Аналитически вибро смещение осуществляется путем расчета динамической системы для определения сил инерции, действующих в связке двигатель–фильтр. При заданных граничных условиях по разным осям для цилиндрической модели методом конечных элементов (МКЭ) получаем распределение перемещений (на торцах фильтра смещение равно нулю). Положение же любого элемента фильтра в системе двигателя–фильтр определяется координатами его центра масс и углом поворота элемента относительно глобальной системы координат, а динамическое поведение многомассовой механической системы описывается уравнением Лагранжа для систем с голономными связями в вариационной форме [11].

Проблема повышения вибростойкости СВС-материалов может быть частично решена путем подбора состава шихты. Основу получаемой шихты СВС-материалов составляют порошки окалина легированной стали, некоторых металлов и неметаллов, а также их оксиды.

Получение пористых металлокерамических материалов

С целью повышения механических свойств пористых материалов (модулей упругости, механических напряжений на изгиб, сжатие, виброустойчивость) в качестве исходных основных продуктов взята окалина легированной стали 18Х2Н4МА (содержащая 0,18 % углерода, 4 % никеля и 1 % молибдена), кристаллический порошок Al_2O_3 (корунд) и порошок алюминия (табл. 1).

Исходя из обеспечения физико-механических и функциональных показателей разработан состав шихты с содержанием Cr, Cr_2O_3 , Ni и FeSi.

Таблица 1. Базовый состав шихты

Table 1. Batch basic composition

Материал, масс. m% Material, wt. %	Состав, масс. % Compound, wt. %
Окалина легированной стали 18Х2Н4МА Oxide alloy steel 18Х2Н4МА	30–60
Оксид алюминия Al_2O_3 (корунд) Aluminium oxide Al_2O_3 (corundum)	30–45
Алюминий АСД-1 Aluminium ASD-1	8–15

Окалина использовалась в виде порошка с фракциями 60–125 мкм, а электрокорунд и алюминий с фракциями 50–60 мкм. При этом форма зерна была округлая (угловатая форма зерна имеет недостаточную реакционную способность, что ухудшает качество конечного продукта). Количественное соотношение компонентов исходных материалов взято из расчета термосинтеза при 950–1050 °С без плавления составляющих шихты.

Так как СВС – разновидность горения, то для инициирования реакции используется электрическая спираль или дуга. Реакция идет с выделением тепла $\sim 4 \cdot 10^6$ Дж/кг, с температурой горения 1500–1900 К, скорость горения (распространения фронта горения) $(1,5–2,0) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Процесс СВС происходит в тонком слое смеси исходных реагентов и распространяется по всей системе. При этом получается металлокерамический материал с образованием поровой структуры [17, 18], которая формируется за счет перераспределения расплава в реакционной зоне и десорбции газов [5–6].

При СВ-синтезе перераспределение атомов кристаллической структуры происходит в масштабах порядка межатомных расстояний, т. е. возникают т. н. фазовые переходы упорядочения. Кристаллическая решетка неупорядоченной фазы распадается на несколько подрешеток, в каждой из которых концентрация отличается от средней по сплаву. В реальных сплавах Fe-Al переход в эту фазу при понижении температуры происходит в два этапа. Сначала при более высокой температуре происходит фазовый переход доупорядочения ($FeAl \rightarrow Fe_3Al$). Согласно диаграмме состояния системы Fe-Al алюминий с железом образует твердые растворы, интерметаллические соединения и эвтектику. В системе существуют твердые фазы Fe_3Al (β_1), $FeAl$ (β разупорядоченная), (β_2 упорядоченная), Fe_2Al_3 (ϵ), $FeAl_2$ (ξ), $FeAl_3$ (θ), Fe_3Al_5 (η). Преимуществом сплавов на основе Fe_3Al является высокая стойкость против окисления и сульфидной коррозии, а недостатком – низкотемпературная хрупкость, обусловленная насыщением сплава водородом, образующимся при взаимодействии алюминия с парами воды из воздуха и воды, входящей в состав кристаллов корунда.

В структуре конечного продукта проявляется феррит в виде полей размерами от 10 до 300 мкм. А сам механизм образования ферритных полей включает стадии расплавления исходного феррита

окалины, образования первичных зародышей в результате реакции восстановления, а затем их объединения в протяженные области при фазоразделении.

Характерной особенностью СВС-процесса с базовым составом шихты $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ является образование керамического каркаса из кристаллического оксида алюминия [5, 6]. Одновременно происходит восстановление железа с последующей коалесценцией жидкой фазы железа вокруг твердого каркаса из $\text{Fe-Fe}_3\text{O}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$. Эти макроформирования в результате интенсивного отвода тепла и газораспределения меняют свою форму и увеличивают размер пор. Микроструктура такого продукта описана в [7, 19].

Полученный пористый материал, предлагаемый как фильтрующий элемент, имел предел прочности при сжатии 2–7 МПа, общую пористость ~50 %, а сообщающиеся между собой поры округлой и продолговатой формы имели размеры ~ (20–200) мкм, но могли достигать и 400 мкм.

Для увеличения механической прочности и вибростойкости ПММ в указанную выше исходную шихту тройной системы были введены оксиды хрома и Cr.

Реакционная смесь, содержащая до 60 % (масс) окалины стали и до 20 % (масс) оксида хрома (IV) в результате СВС-процесса дает пористый материал, поровая структура которого формируется при реакции за счет перераспределения расплава в реакционной зоне и десорбции газов с поверхности порошковых материалов шихты. При этом введение оксидов хрома повышает температуру горения (за счет реакции замещения), а значит, дает более равномерный расплав. Параллельное протекание реакций между алюминием и оксидом хрома (IV), а также между алюминием и окалиной приводит к образованию в структуре продукта состава $\text{FeO} (\text{Al}_2\text{O}_3)$.

Основу продукта составляет металлический хром, интерметаллическое соединение Cr_5Al_8 , а также оксид алюминия.

Неравномерное распределение фаз по объему образцов, вызванное фазоразделением при структурообразовании (неблагоприятные для механических свойств) устраняется введением хрома до 14 % (масс) в шихту. Хром относится к эвтектичнообразующим и α -стабилизирующим элементам по отношению к более легкоплавким металлам. Этими факторами определяются особенности структуры продуктов, полученные при СВС в системе.

Экспериментальная часть

С увеличением массовой доли хрома Cr с 5,33 до 8,0 % в шихте значение коэффициента жесткости материала в образце возрастает в 1,12 раза и зависимость имеет линейный характер [9]. Увеличение содержания хрома в системе не приводит к существенному изменению фазового состояния конечного продукта реакции. При введении в си-

стему Cr структура становится более однородной за счет большего объема зафиксированного β -твердого раствора, образующего вместе с α -фазой микроструктуру игольчатого типа.

Введение хрома [5, 9] приводит к более равномерному распределению металлического компонента в каркасе продукта, выравниванию микротвердости и параметра кристаллической решетки твердого раствора, т. е. позволяет добиться более однородного распределения структурных составляющих в основе СВС-материала.

Введение никеля в указанную выше реакционную смесь замедляет скорость реакции и соответственно замедляет разделение по фазам, а значит, за счет растекания при горении позволяет гомогенизировать твердожидкую реакционную область, что приводит к уменьшению пор, увеличению вибростойкости и механической прочности на сжатие до 11 МПа. Кроме того, он увеличивает термостойкость и, что существенно, коррозионную стойкость ПММ [9].

Для увеличения механической прочности и виброустойчивости СВС-материала в состав введен ферросилиций (0,5–1,5) % по массе, содержащий (70–75) % кремния.

Введение ферросилиция приводит к раскислению расплава и очищает расплав от оксидов (шлаков), т. е. рафинирует продукт, а самому материалу придает мелкозернистую структуру, что приводит к увеличению прочности и виброустойчивости при эксплуатации [9, 20–25]. Микроструктура базового состава с содержанием Cr (10 %), Cr_2O_3 (15 %) и FeSi (1,0 %) представлена на рис. 1, а, а структура, содержащая Ni (10 %), – на рис. 1, б. Белое включение в структуре идентифицировано как интерметаллическое соединение Cr_5Al_8 , серое – NiAl, темное – Fe, черное – поры. Фазовый состав для СВС-продукта с микроструктурой, показанной на рис. 1, б, представлен на рис. 2. В итоге ферросилиций повышает механическую прочность продукта на изгиб и на сжатие до (10–12) МПа, а частоты колебаний, соответствующие их разрушению, сдвигаются в область (460–520) Гц [9, 20–25], что соответствует частотам с минимальными амплитудами вибро смещений и не вызывает расшатывание структуры пористого материала СВС-фильтра.

При повышении содержания железа в исходной шихте на поверхности его частиц в ходе протекания СВС-процесса образуется слой интерметаллического соединения, повышение локальной концентрации Fe в растворе-расплаве продолжается до уровня предельной растворимости, при этом идет процесс реакционного растворения тугоплавкого компонента расплавом легкоплавких.

Рентгенофазный анализ для СВС-продукта с микроструктурой (рис. 1, б) для базового состава шихты с добавками проводился на основании международной базы данных PDWN. Значения двойного угла дифракции 2θ (градусы), межплоскостные расстояния d ($d_{\text{ст}}$ – эталонное значение, $d_{\text{эк}}$ –

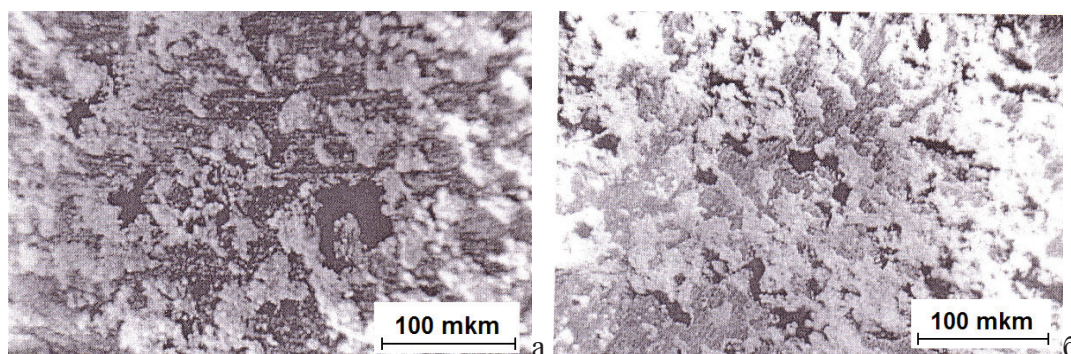


Рис. 1. Микроструктура продукта базового состава шихты с добавками: а) Cr, Cr₂O₃, FeSi; б) Cr, Cr₂O₃, Ni, FeSi

Fig. 1. Microstructure of the base composition of the charge with additives: а) Cr, Cr₂O₃, FeSi; б) Cr, Cr₂O₃, Ni, FeSi

экспериментальное значение, Ангстрем) при использованном дифракционном максимуме, равном 1, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения двойного угла дифракции 2θ (градусы) и межплоскостных расстояний d (Å) для разных фаз CBC-продукта

Table 2. Values of double angle of diffraction 2θ (degrees) and interplanar spaces d (Å) for different phases of the SHS-product

Fe (6-696)			Fe ₃ O ₄ (1-111)			Al ₂ O ₃ (5-712)		
$2\theta^\circ$	$d_{\text{ст}}, \text{Å}$	$d_{\text{эк}}, \text{Å}$	$2\theta^\circ$	$d_{\text{ст}}, \text{Å}$	$d_{\text{эк}}, \text{Å}$	$2\theta^\circ$	$d_{\text{ст}}, \text{Å}$	$d_{\text{эк}}, \text{Å}$
44,633	2,0268	2,03	35,451	2,53	2,50	35,136	2,552	2,56
65,021	1,4332	1,43	37,12	2,42	2,40	57,518	1,601	1,60
			53,546	1,71	1,70	25,584	3,479	3,46
Cr ₂ Al ₃ (29-15)			NiAl (44-1188)			Si (2-561)		
$2\theta^\circ$	$d_{\text{ст}}, \text{Å}$	$d_{\text{эк}}, \text{Å}$	$2\theta^\circ$	$d_{\text{ст}}, \text{Å}$	$d_{\text{эк}}, \text{Å}$	$2\theta^\circ$	$d_{\text{ст}}, \text{Å}$	$d_{\text{эк}}, \text{Å}$
33,862	2,645	2,66						
37,104	2,421	2,40	44,377	2,0413	2,04	47,305	1,92	1,90
51,739	1,7654	1,77	64,549	1,4437	1,44	56,402	1,63	1,64
47,318	1,9195	1,92						

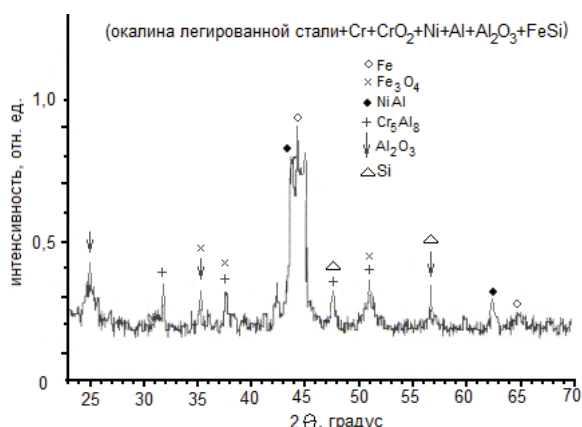


Рис. 2. Рентгенограмма состава шихты (табл. 1) с добавками Cr, Cr₂O₃, Ni и FeSi

Fig. 2. Radiographs of the charge composition (table 1) with additions of Cr, Cr₂O₃, Ni, FeSi

При проведении экспериментальных исследований было обнаружено, что частоты собственных колебаний лежат в области 2,9–3 Гц, в то время как частоты вынужденных колебаний, соответ-

ствующие максимальным ускорениям, лежат в интервале от 400 до 500 Гц. Частота собственных колебаний определяется стандартным методом через коэффициент жесткости, модуль упругости, измеряемый стандартными приборами, и геометрические параметры образцов.

Из этого следует, что при совпадении частот вынужденных колебаний с частотами собственных колебаний в материале фильтров появляются микротрещины и возникает большое число концентраторов напряжений, которые развиваются и через 300–350 часов работ могут привести к разрушению в виде отдельных кусков. При частотах, соответствующих частотам с максимальными ускорениями, происходит разрушение материалов повсеместно по границам зерен компонентов шихты.

С ростом содержания окалины железа наблюдается рост значения модуля упругости. С ростом содержания в шихте Fe₂O₃ с 44 до 52 % по массе модуль упругости возрастает с $104 \cdot 10^3$ до $118,25 \cdot 10^3$ МПа или при росте содержания Fe₂O₃ на 9 % модуль упругости возрастает на 13,7 % по своей величине. Рост модуля упругости нельзя считать значительным, но он сказывается и на изменении частот собственных колебаний образцов. Это выражается в том, что с ростом содержания в шихте Fe₂O₃ в указанных пределах происходит рост частот собственных колебаний на 0,194 Гц или на 6,7 %, а виброремещение, нежелательное при эксплуатации материала в качестве фильтра, в зависимости от содержания оксида железа носит нелинейный характер. На рис. 3 представлена зависимость виброремещения от массового содержания оксида железа.

Рост содержания Cr по массе с 5,33 до 8 % привел к увеличению модуля упругости материала в изделии с $170 \cdot 10^3$ до $190 \cdot 10^3$ МПа и на 11,6 %. При этом рост частоты собственных колебаний материала в изделии составил всего 1 %. На рис. 4 дана зависимость виброремещения от массового содержания хрома.

Оксид хрома Cr₂O₃ участвует в металловосстановительных реакциях с окалиной стали в СВС-процессе. При увеличении содержания Cr₂O₃ в шихте свыше 17,5 % по массе происходит снижение механической прочности материала за счет об-

разования раковин и «свищей» в пористой структуре.

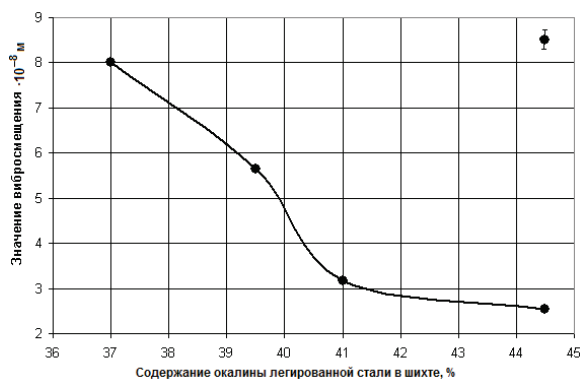


Рис. 3. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте окаины легированной стали

Fig. 3. Dependence of vibration displacement on the content of scale alloy steel in the charge

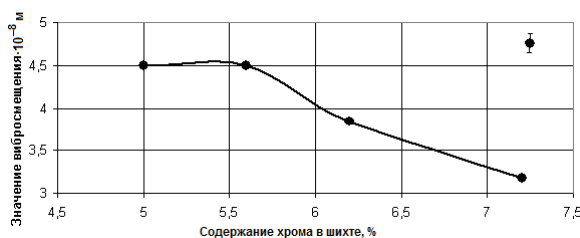


Рис. 4. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте хрома

Fig. 4. Dependence of vibration displacement on chromium content in the charge

Проведена оценка влияния изменения концентрации Cr_2O_3 в составе шихты на характеристики СВС-материалов. Обнаружено, что при изменении содержания Cr_2O_3 в шихте с 16 до 19,8 % по массе модуль упругости по своему значению уменьшается на 12,7 %. На рис. 5 дана зависимость вибросмещения от массового содержания Cr_2O_3 .

Частота собственных колебаний образцов из рассматриваемых материалов при указанном изменении содержания Cr_2O_3 в шихте снижается приблизительно на 6 % (с 3,05 до 2,87 Гц).

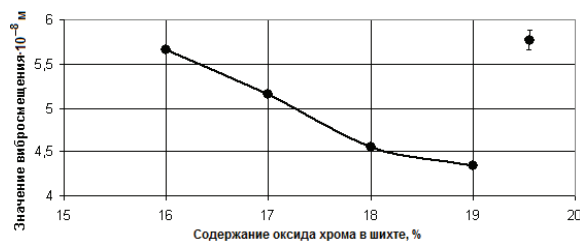


Рис. 5. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте оксида хрома

Fig. 5. Dependence of vibration displacement on chromium oxide content in the charge

Ранее [5, 6] при исследовании систем Ni-Al-Fe экспериментально было обнаружено, что присутствие в системе никеля способствует увеличению прочности материалов, повышает их коррозион-

ную стойкость, термостойкость, снижает величину среднего приведенного диаметра пор и повышает их упорядоченность.

Структурные исследования показали, что легирование Ni системы Ni-Al-Fe приводит к образованию твердого раствора на основе интерметаллического соединения Ni-Al.

При инициации горения происходит плавление алюминия и его растекание по каналам среды дисперсных компонентов шихты и одновременно начинается растворение Ni и насыщение им раствора.

В результате экспериментальных и расчетных исследований на стандартных образцах было обнаружено, что частоты собственных колебаний в диапазоне изменения соотношения Ni/Al в % по массе от 0,24 до 0,97 изменяются незначительно с 3,02 до 3,01 Гц. В то же время значение «опасных» частот разрушения от виброускорений имеет диапазон изменений от 420 до 490 Гц.

При увеличении концентрации Ni в шихте в % по массе в образцах происходит рост модуля упругости. В нашем случае при изменении концентрации Ni в шихте с 5 до 13,6 % по массе наблюдалось увеличение значения модуля упругости на 10,2 %. Это приводило к увеличению жесткости образцов пропорционально. При замещении никелем алюминия частота их собственных колебаний практически не изменилась. На рис. 6 дана зависимость вибросмещения от содержания никеля.

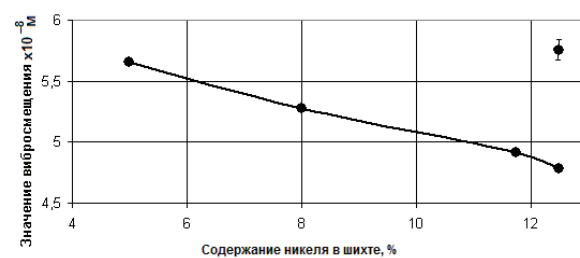


Рис. 6. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте никеля

Fig. 6. Dependence of vibration displacement on nickel content in the charge

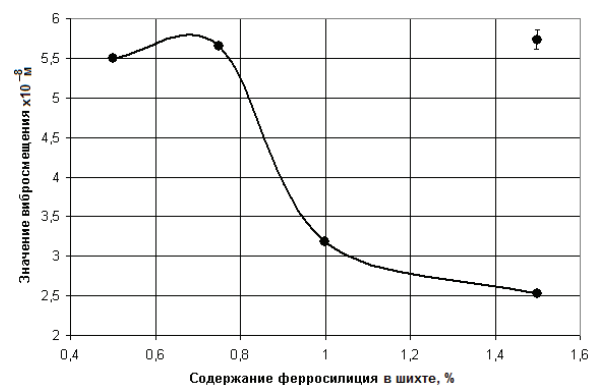


Рис. 7. Зависимость вибросмещения от содержания в шихте ферросилиция

Fig. 7. Dependence of vibration displacement on ferrosilicon content in the charge

На рис. 7 дана зависимость вибро смещения от содержания ферросилиция. Установлено, что при увеличении концентрации ферросилиция с 0,5 до 15 % по массе приводит к экстремальной зависимости вибро разрушения от частоты и достигает 480 Гц.

Таблица 3. Влияние содержания компонентов в составе шихты на характеристики СВС-материалов

Table 3. Influence of concentration of components in the charge composition on characteristics of SHS materials

Компоненты, характеристики, свойства и величины Components, characteristics, properties and values	Варианты СВС-материала Options of SHS-material			
Содержание компонентов в шихте, в % по массе Content of components in the charge, in wt. %				
Окалина легированной стали 18Х2Н4МА (порошок) Oxide alloy steel 18X2H4MA (powder)	39,5	39,5	39,5	39,5
Оксид хрома/Chromium oxide	18,0	18,0	18,0	18,0
Хром ПХ-1/Chrome PKh-1	5,6	5,6	5,6	5,6
Никель ПНК-ОТ-1/Nickel PNK-OT-1	12,4	12,4	12,4	12,4
Алюминий АСД-1/Aluminium ASD-1	15,1	15,1	15,1	15,1
Оксид алюминия (электрокорунд) (α -Al ₂ O ₃) Aluminum oxide (electrocorundum) (α -Al ₂ O ₃)	8,9	8,65	8,4	7,9
Ферросилиций (порошок FeSi) Ferrosilicium (FeSi powder)	0,5	0,75	1,0	1,5
Характеристики пористого материала Characteristics of porous material				
Средний диаметр пор, мкм Average pore diameter, micrometer	180	155	135	110
Извилистость пор/Pore tortuosity	1,15	1,18	1,24	1,36
Удельная поверхность, м ² /г Specific surface, m ² /g	118	108	87	83
Пористость, %/Porosity, %	0,47	0,42	0,38	0,28
Физико-механические свойства/Physico-mechanical properties				
Механическая прочность на сжатие, МПа Mechanical strength in compression, MPa	13,6	12,6	11,1	10,5
Механическая прочность на изгиб, МПа Mechanical bending strength, MPa	4,4	4,2	3,9	3,2
Ударная вязкость, Дж/м ² Impact strength, J/m ²	0,285	0,275	0,270	0,155
Частота собственных колебаний, f ₀ , Гц Natural frequency, f ₀ , Hz	2,946	3,015	3,049	3,101
Значение вибро смещения при f ₀ , м·10 ⁻⁸ Value of vibration displacement at f ₀ , m·10 ⁻⁸	5,50	5,65	3,18	2,53
Значение максимальной виброскорости при f ₀ , Z·10 ⁻⁴ м/с Maximum vibration velocity at f ₀ , Z·10 ⁻⁴ m/s	5,00	3,54	1,99	1,58
Значение максимального Z, м/с ² Maximum Z value, m/s ²	3,00	2,12	1,19	0,49
Максимальное виброускорение, g Maximum vibration acceleration, g	17,65	17,35	12,03	11,56
Значение частоты разрушения, Гц Frequency of destruction, Hz	440	430	440	480

В табл. 3 приведено содержание компонентов шихты и свойства полученных СВС-материалов.

Выводы

Многообразие способов получения материалов методом СВС на базе нескольких основных реагентов, входящих в шихту, позволяет вводить в её состав в различных количествах вещества металлов и неметаллов. При этом базовыми компонентами шихты являются Fe₂O₃ (окалина легированной стали) + Al₂O₃ (электрокорунд) + Al. Выбранная модель получения ПММ на основе этих реагентов с добавлением в малых количествах (0,5–1,5) % CrO₂ (или Cr₂O₃), Cr, Ni и незначительной добавки (0,5–1,5) % FeSi (ферросилиция) позволяет получить виброустойчивый материал для фильтров отработавших газов на транспорте.

Восстановление железа в реакции Fe₂O₃+Al₂O₃+Al и коалесценция расплава железа вокруг жесткого остова из Fe-Fe₃O₄-Al₂O₃ с образованием кристаллизующихся формаций с элементами Cr, Ni приводит при интенсивном теплоотводе и давлении расширяющегося газа к изменению размеров пор и их формы.

Определены физико-механические характеристики СВС-материалов с различным содержанием компонентов, и экспериментально установлены диапазоны частот колебаний, опасные с точки зрения их разрушения:

- увеличение концентрации в шихте Fe₂O₃ с 35 до 45,0 % по массе приводит к увеличению частот собственных колебаний образцов на 5,26 %, а диапазон частот разрушения увеличивается на 15 % и достигает 460 Гц;
- увеличение концентрации Ni в шихте с 5 до 12,5 % по массе приводит к незначительному снижению частот собственных колебаний образцов, а диапазон опасных частот разрушения увеличивается на 16,6 % и достигает 490 Гц;
- увеличение концентрации оксида хрома с 16 до 19 % по массе приводит к снижению резонансных виброускорений с 2,16 до 1,82 g, а диапазон опасных частот разрушения увеличивается с 415 Гц и достигает 470 Гц;
- увеличение массовой доли Cr в шихте с 5,33 до 8 % приводит к снижению максимальных виброускорений с 1,72 до 1,52 g, а диапазон опасных частот разрушения увеличивается с 400 Гц и достигает 460 Гц;
- увеличение концентрации ферросилиция с 0,5 до 15 % по массе приводит к экстремальной зависимости вибро разрушения от частоты и достигает 480 Гц.

Увеличение содержания по массе в указанных пределах участвующих компонентов в синтезе (Fe₂O₃, Cr, Ni, и FeSi) приводит к увеличению модуля упругости, что увеличивает жесткость получаемых материалов, а вот увеличение оксида хрома приводит к снижению жесткости материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: 20 лет поисков и находок. – Черногловка: ИС-МАН, 1989. – 91 с.
2. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В.В. Евстигнеев, Б.М. Вольпе, И.В. Милокова, Г.В. Сайгутин. – М.: Высшая школа, 1996. – 274 с.
3. Влияние высокоэнергетических воздействий на микроструктуру синтезированной металлокерамики / В.Е. Овчаренко, О.П. Солоненко, А.Е. Чесноков, В.М. Фомин // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 39. – № 21. – С. 77–94.
4. Высокотемпературный синтез металлокерамического сплава в порошковой смеси механически активированных металлических компонентов / В.Е. Овчаренко, О.В. Лапшин, О.П. Солоненко, А.Е. Чесноков, В.М. Фомин // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Материалы IV Всероссийской конференции. – Новосибирск, 2011. – С. 229–233.
5. Тубалов Н.П., Лебедева О.А., Верещагин В.И. Пористые композиционные керамические материалы, полученные самораспространяющимся высокотемпературным синтезом в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ // Новые огнеупоры. – 2003. – № 9. – С. 40–42.
6. Верещагин В.И., Тубалов Н.П., Евстигнеев В.В. СВС-технология изготовления пористых проницаемых материалов // Новые огнеупоры. – 2005. – № 6. – С. 61–65.
7. Тубалов Н.П., Лебедева О.А. Структура и эксплуатационные свойства пористых металлокерамических материалов на основе окалины легированных сталей // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 142–146.
8. Abu-Jrai A., Tsolakis A., Megaritis A. The influence of H_2 and CO on diesel engine combustion characteristics, exhaust gas emissions, and after treatment selective catalytic NOx reduction // Hydrogen Energy. – 2007. – № 15. – P. 3565–3571.
9. Коломеец М.А., Тубалов Н.П., Новоселов А.Л. Вибрация каталитических фильтров нейтрализаторов отработавших газов дизелей // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3. – С. 7–10.
10. Hamada T., Kadano K., Funabiki M. Development of non-Ni low H_2S Pt/Rh/CeO₂ TWC Catalyst // SAE Techn. Pap. Ser. – 1990. – № 900611. – P. 1–8.
11. Вербилов А.Ф., Ковалев В.В., Беляев Л.Н. Расчет динамических перемещений методом временных конечных уравнений // Проблемы совершенствования энергетических установок: сб. ст. под ред. д.т.н., профессора А.А. Мельберг. – Барнаул, 2008. – С. 10–18.
12. Charakterisierung der Partikelemission von modernen Verbrennungsmotoren / S. Aufdenblatten, K. Schanzlin, A. Bertola, M. Mohr // MTZ: Motortecn. Z. – 2002. – № 11. – P. 962–966.
13. Bell A.T. The impact of nanoscience on heterogeneous catalysis // Science. – 2003. – V. 299. – P. 1688–1691.
14. Büchling J. Der neue D-CAT-Motor von Toyota // MTZ: Motortecn. Z. – 2003. – № 12. – P. 1002–1003.
15. Runhua T., Ying C., Bao L. Complex nonlinear mathematical model for a kind of shock absorbers // Chin. J. Mech. Eng. – 1999. – № 1. – P. 32–39.
16. Elsener M., Geering H., Jaussi F. Aufbau und Vermessung eines De NOx – systems auf der Basis von Harnstoff-SCR // MTZ: Motortecn. Z. – 2003. – № 11. – P. 966–971.
17. Chun N.L., Shyan L.C. Combustion synthesis of aluminum nitride powder using additives // J. Mater. Res. – 2001. – V. 16. – P. 2200–2208.
18. Shyan L.C., Chun H.L. Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: a review // Key Eng. Mat. – 2012. – V. 521. – P. 101–111.
19. Besmann T.M., Gallois B.M. Structure of porous metal-ceramic materials // MRS Symp. Proc. – Pittsburgh, PA: Materials Research Society, 1990. – P. 168–172.
20. Влияние технологии изготовления пористого композиционного материала каталитического нейтрализатора отработавших газов дизелей на его микроструктуру / Н.Н. Горлова, М.А. Коломеец, Г.В. Медведев, А.А. Ситников // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – С. 200–203.
21. Получение пористых проницаемых металлокерамических СВС-материалов с использованием руд полиметаллов взамен редкоземельных элементов / А.Е. Бакланов, М.С. Канапинов, С.А. Малашина, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 205–212.
22. Новосёлова Т.В., Медведев Г.В., Горлова Н.Н. Влияние компонентов руды титанита на структуру каталитического материала в нейтрализаторах, используемых для очистки отработавших газов // Инновационные технологии в науке и образовании: V Международная научно-практическая конференция. – Чебоксары, 2016. – № 1. – С. 90–94.
23. СВС-материалы для очистки отработавших газов дизелей / А.Е. Бакланов, О.Е. Бакланова, М.С. Канапинов, С.Б. Канапинов, А.В. Маецкий, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2016. – 132 с.
24. Разработка и создание пористых фильтрующих металлокерамических СВС-материалов с использованием руд полиметаллов / А.Е. Бакланов, М.С. Канапинов, С.А. Малашина, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: Региональная научно-практическая конференция. – Таганрог, 2016. – С. 51–55.
25. Создание вибростойких металлокерамических пористых проницаемых СВС-материалов на основе окалины легированной стали / А.Е. Бакланов, М.С. Канапинов, С.А. Малашина, М.А. Коломеец, Т.В. Новосёлова, А.А. Ситников, Н.П. Тубалов // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: Региональная научно-практическая конференция. – Таганрог, 2016. – С. 55–59.

Поступила 25.04.2017 г.

Информация об авторах

Коломеец М.А., проректор по информатизации Алтайского государственного медицинского университета.

Мельберг А.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Маецкий А.В., кандидат технических наук, программист 1 категории кафедры строительства автомобильных дорог и аэродромов Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Новосёлова Т.В., старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Политехнического института (филиала) Донского государственного технического университета.

Тубалов Н.П., доктор технических наук, профессор кафедры наземных транспортно-технологических систем Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Яковлева О.В., старший преподаватель кафедры приборостроения и автоматизации технологических процессов Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева.

UDC 621.762

VIBRATION-RESISTANT POROUS PERMEABLE METAL-CERAMIC SHS-MATERIALS BASED ON OXIDES OF ALLOY STEELS AND FERROSILICIUM ADDITION

Maksim A. Kolomeets¹,
kolomeets.m@yandex.ru

Alla A. Melbert²,
aamelbert@mail.ru

Alexander V. Maetsky²,
maetsky@rambler.ru

Tatyana V. Novoselova³,
tatnovos@mail.ru

Nikolay P. Tubalov²,
manemale@mail.ru

Olga V. Yakovleva⁴,
yakovlevaoly@mail.ru

¹ Altai State Medical University,
40, Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russia.

² Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russia.

³ Polytechnic Institute (branch) of Don State Technical University,
109a, Petrovskaya street, Taganrog, 347904, Russia.

⁴ East Kazakhstan State Technical University,
69, Protozanov street, Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan.

Constantly growing interest in practical use of porous permeable ceramic-metal materials in mechanical engineering is caused by the need to manufacture devices for cleaning gaseous emissions into the atmosphere from harmful substances.

Porous permeable materials obtained by using self-propagating high-temperature synthesis (SHS), discovered by academician A.G. Merzhanov and described by scientific schools of the Siberian Federal University (Krasnoyarsk), Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk), Altai State Technical University (Barnaul) and others, have a number of advantages, such as: low energy consumption when obtaining, possibility of using wastes of engineering and metallurgy, production of filters with high physical-mechanical properties and functional properties. The filters obtained by SHS have sufficient mechanical strength in compression and flexural strength, toughness, corrosion resistance, but when they are used in energy and motor vehicles, they are susceptible to damage from vibration and shock.

The aim of the study is to develop vibration-resistant porous permeable metal-ceramic materials based on alloy steel oxides, non-ferrous metal oxides, aluminum and ferrosilicon obtained by using the SHS technology by methods of selection of charge composition, control modes of technological process of production.

The results. The basic components of the charge are Fe_2O_3 (oxide alloy steel) + Al_2O_3 (corundum) + Al. The selected model for obtaining materials on the basis of these reagents with addition of small amounts (5...20) % of CrO_2 (or Ce_2O_3), Cr, Ni and minor additives (0,5...1,5) % of FeSi (ferrosilicon) allows obtaining vibration-proof material to filter exhaust gas in transport. The increase in the content by mass within the above limits of the components, involved in the synthesis (Fe_2O_3 , Cr, Ni and FeSi), leads to the growth in elasticity modulus, which increases the rigidity of the resulting materials.

Key words:

SHS-material, metal oxides, fineness, modulus of elasticity, vibration resistance.

REFERENCES

1. Merzhanov A.G. *Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturny sintez: 20 let poiskov i nakhodok* [Self-propagating high-temperature synthesis: 20 years of search and discovery]. Chernogolovka, ISMAN Publ., 1989. 91 p.
2. Evstigneev V.V., Volpe B.M., Milyukova I.V., Saygutin G.V. *Integralnye tekhnologii samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza* [Integral technologies of self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996. 274 p.
3. Ovcharenko V.E., Solonenko O.P., Chesnokov A.E., Fomin V.M. Vliyaniye vysokoenenergeticheskikh vozdeystviy na mikrostrukturu sintezirovannoy metallokeramiki [Influence of high-energy impacts on microstructure of synthesized metal ceramics]. *Pisma v ZhTF*, 2012, vol. 39, no. 21, pp. 77–94.
4. Ovcharenko V.E., Lapshin O.V., Solonenko O.P., Chesnokov A.E., Fomin V.M. Vysokotemperaturny sintez metallokeramicheskogo splava v poroshkovoy smesi mekhanicheskii aktivirovannykh metallicheskih komponentov [High-temperature

- synthesis of metal-ceramic alloy in the powder mixture mechanically activated metal components]. *Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii «Vzaimodeystvie vysokokontsentririvannykh potokov energii s materialami v perspektivnykh tekhnologiyakh i meditsine»* [Proc. 4th All-Russian Conf. Interaction between high-concentrated energy fluxes and materials in promising technologies and medicine]. Novosibirsk, 2011. pp. 229–233.
5. Tubalov N.P., Lebedeva O.A., Vereshchagin V.I. Poristyye kompozitsionnye keramicheskie materialy, poluchennyye samorasprostranyayushchimsya vysokotemperaturnym sintezom v sisteme $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ [Porous composite ceramic materials obtained by self-propagating high-temperature synthesis in the $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ system]. *Novye ognepory*, 2003, no. 9, pp. 40–42.
 6. Vereshchagin V.I., Tubalov N.P., Evstigneev V.V. SVS-tekhnologiya izgotovleniya poristyykh pronitsaemykh materialov [SHS-technology for producing porous permeable materials]. *Novye ognepory*, 2005, no. 6, pp. 61–65.
 7. Tubalov N.P., Lebedeva O.A. Structure and operational properties of porous metal-ceramic materials based on oxides of alloy steels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 2, pp. 142–146. In Rus.
 8. Abu-Jrai A., Tsolakis A., Megaritis A. The influence of H_2 and CO on diesel engine combustion characteristics, exhaust gas emissions, and after treatment selective catalytic NOx reduction. *Hydrogen Energy*, 2007, no. 15, pp. 3565–3571.
 9. Kolomeets M.A., Tubalov N.P., Novoselov A.L. Vibratsiya kataliticheskikh filtrov neytralizatorov otrabotavshikh gazov dizeley [Vibration of catalytic converters of exhaust gas neutralizers]. *Polzunovskiy vestnik*, 2012, no. 3, pp. 7–10.
 10. Xamada T., Kadano K., Funabiki M. Development of non-Ni low H_2S Pt/Rh/CeO₂ TWC Catalyst. *SAE Techn. Pap. Ser.*, 1990, no. 900611, pp. 1–8.
 11. Verbilov A.F., Kovalev V.V., Belyaev L.N. Raschet dinamicheskikh peremeshcheniy metodom vremennykh konechnykh uravneniy [Calculation of dynamic displacements by the method of time-finite equations]. *Problemy sovershenstvovaniya energeticheskikh ustanovok. Sbornik statey* [Problems of improving power plants. A collection of articles]. Ed. by A.A. Melbert. Barnaul, 2008. pp. 10–18.
 12. Aufdenblatten S., Schänzlin K., Bertola A., Mohr M. Charakterisierung der Partikelemission von modernen Verbrennungs-Motoren [Characterization of the particle emission of modern combustion engines]. *MTZ: Motortecn. Z.*, 2002, no. 11, pp. 962–966.
 13. Bell A.T. The impact of nanoscience on heterogeneous catalysis. *Science*, 2003, vol. 299, pp. 1688–1691.
 14. Büchling J. Der neue D-CAT-Motor von Toyota [The new D-CAT engine from Toyota]. *MTZ: Motortecn. Z.*, 2003, no. 12, pp. 1002–1003.
 15. Runhua T., Ying C., Bao L. Complex nonlinear mathematical model for a kind of shock absorbers. *Chin. J. Mech. Eng.*, 1999, no. 1, pp. 32–39.
 16. Elsener M., Geering H., Jaussi F. Aufbau und Vermessung eines De NOx – systems auf der Basis von Harnstoff-SCR [Construction and measurement of a De NOx system based on urea SCR]. *MTZ: Motortecn. Z.*, 2003, no. 11, pp. 966–971.
 17. Chun N.L., Shyan L.C. Combustion synthesis of aluminum nitride powder using additives. *J. Mater. Res.*, 2001, vol. 16, pp. 2200–2208.
 18. Shyan L.C., Chun H.L. Combustion Synthesis of Aluminum Nitride: a review. *Key Eng. Mat.*, 2012, vol. 521, pp. 101–111.
 19. Besmann T.M., Gallois B.M. Structure of porous metal-ceramic materials. *MRS Symp. Proc. – Pittsburg, PA: Materials Research Society*, 1990, pp. 168–172.
 20. Gorlova N.N., Kolomeets M.A., Medvedev G.V., Sitnikov A.A. Vliyaniye tekhnologii izgotovleniya poristogo kompozitsionnogo materiala kataliticheskogo neytralizatora otrabotavshikh gazov dizeley na ego mikrostrukturu [Influence of technology of manufacturing porous composite material of a catalytic converter of exhaust gases of diesel engines on its microstructure]. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 4, pp. 200–203.
 21. Baklanov A.E., Kanapinov M.S., Malashina S.A., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. Polucheniye poristyykh pronitsaemykh metallokeramicheskikh SVS-materialov s ispolzovaniem rud polimetallov vzamen redkozemelnykh elementov [Production of porous permeable metal-ceramic SHS materials using polymetal ores instead of rare earth elements]. *Polzunovskiy vestnik*, 2016, no. 5, pp. 205–212.
 22. Novoselova T.V., Medvedev G.V., Gorlova N.N. Vliyaniye komponentov rudy titanita na strukturu kataliticheskogo materiala v neytralizatorakh, ispolzuemykh dlya ochistki otrabotavshikh gazov [Effect of titanite ore components on the structure of a catalytic material in neutralizers used for purification of exhaust gases]. *V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Innovatsionnyye tekhnologii v nauke i obrazovanii* [5th International Scientific and Practical Conf. Innovative technologies in science and education]. Cheboksary, 2016. no. 1, pp. 90–94.
 23. Baklanov A.E., Baklanova O.E., Kanapinov M.S., Kanapinov S.B., Maetskiy A.V., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. SVS-materialy dlya ochistki otrabotavshikh gazov dizeley [SHS-materials for cleaning exhaust gases of diesel engines]. Ust-Kamenogorsk, VKGTU Publ., 2016. 132 p.
 24. Baklanov A.E., Kanapinov M.S., Malashina S.A., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. Razrabotka i sozdanie poristyykh filtruyushchikh metallokeramicheskikh SVS-materialov s ispolzovaniem rud polimetallov [Development and design of porous filtering metal-ceramic SHS-materials using polymetallic ores]. *Regionalnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizatsii promyshlennosti* [Regional Scientific and Practical Conf. Aspects of development of science, education and industrial modernization]. Taganrog, 2016. pp. 51–55.
 25. Baklanov A.E., Kanapinov M.S., Malashina S.A., Kolomeets M.A., Novoselova T.V., Sitnikov A.A., Tubalov N.P. Sozdanie vibrostoykikh metallokeramicheskikh poristyykh pronitsaemykh SVS-materialov na osnove okaliny legirovannoy stali [Development of vibration-resistant metal-ceramic porous permeable SHS-materials on the basis of scale of alloyed steel]. *Regionalnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizatsii promyshlennosti* [Regional Scientific and Practical Conf. Aspects of the development of science, education and industrial modernization]. Taganrog, 2016. pp. 55–59.

Received: 25 April 2017.

Information about the authors

Maksim A. Kolomeets, vice-rector, Altai State Medical University.

Alla A. Melbert, Dr. Sc., professor, head of the department, Polzunov Altai State Technical University.

Alexander V. Maetskiy, Cand. Sc., programmer, Polzunov Altai State Technical University.

Tatyana V. Novoselova, senior lecturer, Polytechnic Institute (branch) of Don State Technical University.

Nikolay P. Tubalov, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

Olga V. Yakovleva, senior lecturer, East Kazakhstan State Technical University.