

УДК 621.762.8 : 621.9 : 669.713.6
 DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-21-27

Использование алюминиевой пудры ПАП-2 для изготовления порошковых композиционных материалов: особенности технологии, структуры и физико-механические свойства композитов

Часть 1. Технологические подходы, обеспечивающие создание композиционных материалов, и применяемые методики для определения их физико-механических свойств

© 2015 г. Д.А. Иванов, А.И. Ситников, А.В. Иванов, С.Д. Шляпин

Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского (РГТУ–МАТИ), г. Москва

Статья поступила в редакцию 24.06.14 г., доработана 16.04.15 г., подписана в печать 20.04.15 г.

Получены композиты: Al/Al₂O₃ (керметная слоистая матрица) – наполнитель (дискретные металлические волокна, дюралевая стружка, частицы графита, зерна электрокорунда, каолиновые волокна, сферолиты технического глинозема). Для формирования слоистой керметной матрицы использовали промышленно производимую алюминиевую пудру ПАП-2, состоящую из чешуйчатых частиц со стеариновым покрытием (удельная поверхность пудры – 4,1322 м²/г, размеры ее частиц варьируются от 0,03 до 10 мкм). С целью создания композитов применяли следующие основные технологические операции: термообработка пудры ПАП-2 на воздухе для выжигания стеарина с поверхности частиц и его замены на пассивирующую оксидную пленку, смешивание полученного порошкового продукта с наполнителем, прессование и реакционное спекание порошковых заготовок в режиме фильтрационного горения на воздухе. Для изготовления композита Al/Al₂O₃–С предложен новый подход, в основе которого лежит химическая реакция «омыления» стеарина. Она протекает между стеарином на поверхности алюминиевых частиц и едким натром – продуктом гидролиза разбавленного жидкого стекла, вводимого в исходную пудру. Продукты реакции (стеарат натрия и глицерин) при последующей термообработке на воздухе разлагаются с образованием коксового остатка на поверхности частиц. Физико-механические свойства композитов определяли с использованием стандартных и общепринятых методик.

Ключевые слова: алюминиевая пудра ПАП-2, слоистый композиционный материал, кермет Al/Al₂O₃, шихта, гранулирование, прессование, реакционное спекание, фильтрационное горение.

Иванов Д.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и технологии обработки материалов РГТУ–МАТИ им. К.Э. Циолковского (121552, г. Москва, ул. Оршанская, 3). E-mail: dali_888@mail.ru.

Ситников А.И. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории новых технологий керамики № 27 Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 49). E-mail: alexei.sitnikov@gmail.com.

Иванов А.В. – инженер той же кафедры РГТУ–МАТИ им. К.Э. Циолковского. E-mail: aleksandr.ivanov@gmail.com.

Шляпин С.Д. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры РГТУ–МАТИ им. К.Э. Циолковского. E-mail: sshliapin@yandex.ru.

Для цитирования: Иванов Д.А., Ситников А.И., Иванов А.В., Шляпин С.Д. Использование алюминиевой пудры ПАП-2 для изготовления порошковых композиционных материалов: особенности технологии, структуры и физико-механические свойства композитов. Часть 1. Технологические подходы, обеспечивающие создание композиционных материалов, и применяемые методики для определения их физико-механических свойств // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2015. No. 4. С. 21–27. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-21-27.

Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Ivanov A.V., Shlyapin S.D.

The use of PAP-2 aluminum dust to fabricate powder composite materials: the features of technology, structure and physicomachanical composites. Part 1. Manufacturing approaches that provide the creation of composite materials and applied procedures for determining their physicomachanical properties

Composites Al/Al₂O₃ (lamellar cermet matrix)–filling agent (discrete metallic filaments, duralumin chips, graphite particles, fused corundum grains, kaolin filaments, and technical alumina spherulites) are fabricated. Industrially produced PAP-2 aluminum powder, which consists of scaled particles with stearin coating (specific surface of the powder is 4,1322 m²/g, its particle sizes vary from 0,03 to 10 μm), was used to form the lamellar cermet matrix. In order to form the composites, the following production operations were used: heat treatment of PAP-2 powder in air to burn-out stearin from the particle surface and substitute it by alumina film, mixing the formed powder product with the filling agent, pressing, and reaction sintering the powder billets in a filtration burning mode in air. A new approach based on the chemical reaction of stearin saponification is proposed to fabricate the Al/Al₂O₃ composite. In this reaction, stearin on the surface of aluminum particles reacts with caustic soda resulted from the hydrolysis of diluted liquid glass introduced into initial powder. The reaction products (sodium stearate and glycerin) decompose during subsequent heat treatment in air with the

formation of coke residue on the particle surface. Physicochemical properties of composites were determined using standard and generally accepted procedures.

Keywords: PAP-2 aluminum powder, lamellar composite material, Al/Al₂O₃ cermet, charge, granulation, pressing, reaction sintering, filtration burning.

Ivanov D.A. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of materials science, Russian State Technological University n.a. K.E. Tsiolkovsky (RSTU–MATI). E-mail: dali_888@mail.ru.

Sitnikov A.I. – Cand. Sci. (Tech.), senior researcher of the Institute of Metallurgy and Material Science n.a. A.A. Baykov of RAS (119991, Moscow, Leninsky prospect, 49). E-mail: alexei.sitnikov@gmail.com.

Ivanov A.V. – engineer of the Department of materials science, RSTU–MATI. E-mail: aleksandr.ivanov@gmail.com.

Shlyapin S.D. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of materials science, RSTU–MATI. E-mail: sshliapin@yandex.ru.

Citation: Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Ivanov A.V., Shlyapin S.D. Ispol'zovanie alyuminievoi pudry PAP-2 dlya izgotovleniya poroshkovykh kompozitsionnykh materialov: osobennosti tekhnologii, struktury i fiziko-mekhanicheskie svoystva kompozitov. Chast' 1. Tekhnologicheskie podkhody, obespechivayushchie sozdanie kompozitsionnykh materialov, i primenyaemye metodiki dlya opredeleniya ikh fiziko-mekhanicheskikh svoystv. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2015. No. 4. P. 21–27.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-21-27.

Введение

Алюминиевая пудра промышленной марки ПАП-2, имеющая в обиходе название «серебрянка», широко применяется в технике. Она используется в качестве наполнителя в красках, эмалях [1] и синтетических клеях [2], как источник газообразования при получении пористых ячеистых бетонов [3], а также для изготовления взрывчатых веществ [4], твердого ракетного топлива и теплоаккумулирующих материалов [5, 6].

Известно ее применение в технологии порошковых композиционных материалов. Например, гидротермальным синтезом могут быть получены металлооксидные и оксидные пористые изделия [6, 7], путем механической обработки порошковых смесей в планетарной мельнице достигается образование соединений в системах Fe–Al, Ti–Al, Ti–Al–Si [8, 9].

Ранее нами показана возможность изготовления кермета состава Al–Al₂O₃ со слоистой структурой путем реакционного спекания (РС) в режиме фильтрационного горения (ФГ) порошковых заготовок, состоящих из плоских частиц ПАП-2 (патенты РФ 2226516, 2266270, 2319678, 2398037, 2461530). Механизм РС в режиме ФГ подробно описан в работе [10].

Следует отметить, что разработка композиционного материала Al–Al₂O₃ является весьма актуальной в связи со значительной перспективой его применения в различных областях техники [11].

В настоящей статье обсуждаются технологические подходы для создания новых композитов с использованием РС в режиме ФГ порошковых

заготовок, полученных прессованием шихты на основе ПАП-2, включающей различные типы наполнителя (дискретные металлические волокна, дюралевая стружка, мелкодисперсный графит, электрокорунд фракции 0,08–0,1 мм, каолиновые волокна, сферолиты технического глинозема). Кроме того, рассматриваются особенности структуры и физико-механические свойства получаемых материалов.

Методика эксперимента и исследования

Для изготовления композиционных материалов промышленно производимую пудру ПАП-2 подвергали термообработке на воздухе при температуре $t = 350$ °С в течение времени, необходимого для выжигания стеаринового покрытия с поверхности ее частиц и его замены пассивирующей алюмооксидной пленкой (3–5 ч для засыпки пудры массой 300–500 г).

Вид частиц отожженной на воздухе пудры ПАП-2 показан на рис. 1. Это так называемые чешуйчатые частицы 1, толщина которых составляет менее 1 мкм, а длина и ширина колеблются в пределах 5–50 мкм. Кроме того, фиксируется присутствие частиц 2 микро- и субмикрометровой пылевидной фракции.

Непрямолинейная изломанная кромка 3 является следствием отрыва по межзеренным границам соседних плоских зерен в измельчаемых в шаровой мельнице частицах под действием возникающих сдвиговых напряжений при удар-

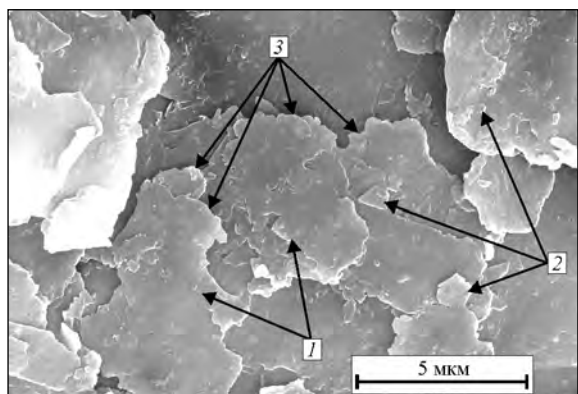


Рис. 1. Вид частиц алюминиевой пудры ПАП-2
1, 2 – чешуйчатые частицы; 3 – кромка частиц

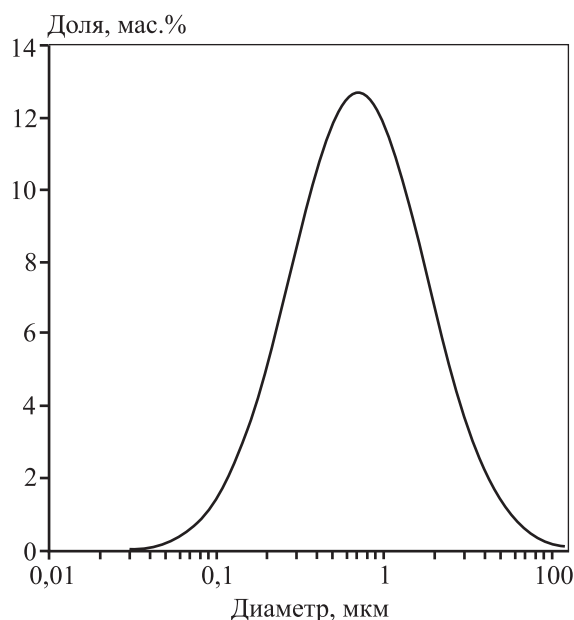


Рис. 2. Распределение по размерам частиц алюминиевой пудры ПАП-2, полученное методом акустической спектроскопии

но-истирающем воздействии мелющих тел. Распределение частиц ПАП-2 по размерам (рис. 2), полученное методом акустической спектроскопии на приборе «Spectrometer DT 1200» (США), характеризуется их варьированием в пределах 0,03–10 мкм с максимальной массовой долей, соответствующей 0,6 мкм.

Удельная поверхность ($S_{уд}$) ПАП-2, установленная по методике низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ) на приборе «Micromeritics Tristar 3000» (США), составляет 4,1322 м²/г. Расчет среднего эквивалентного диаметра частиц ($d_{ср}$), в соответствии с формулой [12] $d_{ср} = 6/(\gamma_{и} S_{уд})$ (где $\gamma_{и}$ — истинная плотность материала, принятая равной

2,7 г/см³), дает значение $d_{ср} = 0,54$ мкм, что хорошо согласуется с данными акустического метода.

При прессовании шихты, включающей ПАП-2, происходит укладка чешуйчатых частиц в прессовках по контактирующим сопрягаемым плоскостям, что обеспечивает формирование слоистой структуры матрицы получаемых композитов. С учетом того, что поверхность чешуйчатых частиц пассивирована алюмооксидными пленками, образующую слоистую матрицу можно считать керметной состава Al/Al₂O₃.

В качестве наполнителя в слоистую керметную матрицу вводили дискретные металлические волокна, полученные методом высокоскоростного затвердевания расплава (ВЗР-волокна) [13], выбранные из ряда: алюминий (В95), титан (ВТ1-0), нержавеющая сталь (12Х18Н9), а также дискретную дюралевую (Д16) стружку — отход металлообработки (количество армирующих элементов в объеме смеси составляло 10–20 %). Кроме того, наполнителями служили мелкодисперсный порошок графита марки ГК-1 (ГОСТ 4404-78), зернистый порошок электрокорунда фракции 0,08–0,1 мм (электрокорунд № 8, ГОСТ 3647-80), каолиновые волокна (ГОСТ 23619-79) и технический глинозем марки Г-00 (ГОСТ 30558-98) (содержание конкретного наполнителя в объеме смеси — 5, 10, 10–30 и 30–70 % соответственно).

Используемые ВЗР-волокна имели длину $l = 10 \pm 15$ мм, а характерный линейный размер их сечения составлял $d = 0,05 \pm 0,1$ мм ($l/d = 150 \pm 200$). У фрагментов дискретной дюралевой стружки длина и ширина колебались от 0,5 до 2,5 мм, а их толщина находилась в пределах 0,03–0,05 мм.

Частицы применяемого технического глинозема имели сферолитное строение (это пористые частицы шарообразной формы с преобладающими размерами 55–70 мкм, состоящие из субмикрометровых кристаллов, представленных γ -модификацией Al₂O₃). С целью обеспечения модификационного перехода γ -Al₂O₃ → α -Al₂O₃, сопровождающегося уменьшением объема на 14,3 %, исходный порошок глинозема Г-00 предварительно нагревали на воздухе до температуры 1350 °С с изотермической выдержкой 1 ч.

Для изготовления указанных композитов (керметная матрица Al/Al₂O₃ — наполнитель) использовали следующую последовательность техноло-

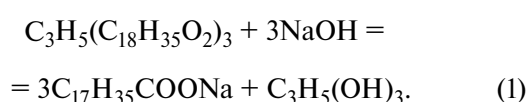
гических операций: смешивание отожженной на воздухе алюминиевой пудры ПАП-2 с наполнителем, прессование смеси и реакционное спекание в режиме ФГ на воздухе полученных заготовок. Для смеси, содержащей ВЗР-волокна и дюралевую стружку, давление прессования составляло $P = 700$ МПа; для смеси, включающей графит, $P = 100\div 500$ МПа; в случае применения зерен электрокорунда $P = 500$ МПа; с каолиновыми волокнами $P = 0,25$ МПа; для смеси с техническим глиноземом $P = 200$ МПа.

Образцы, содержащие в качестве наполнителя каолиновые волокна и технический глинозем, после завершения ФГ подвергали термообработке на воздухе при $t = 1500$ °С в течение 1 ч, обеспечивая полное окисление алюминия.

Следует отметить, что графитсодержащий композит предполагали использовать как антифрикционный материал. Его изготовление имеет свою специфику. Она связана с тем, что минимальное количество порошка графита, которое представлялось возможным равномерно распределить в смеси с пудрой ПАП-2, составляло 5 %. Превышение этого содержания приводило к образованию расслоенных трещин в прессовке вследствие значительного проявления эффекта упругого послейдействия.

Нами установлено, что перспектива снижения количества углеродного компонента, при условии его равномерного распределения в объеме композита, может быть связана с применением нового технологического подхода. Он заключался в том, что исходную пудру ПАП-2, частицы которой содержат стеариновое покрытие, смешивали с разбавленным водой жидким стеклом (в количестве 3 мас.% на сухой остаток вещества). Смешивание проводили с использованием высокоскоростного пропеллерного смесителя в течение 1–2 мин.

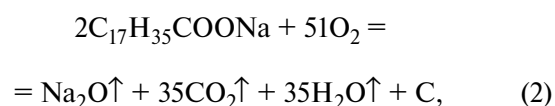
При этом происходит гидролиз жидкого стекла с образованием едкого натра, который взаимодействует со стеарином с получением стеарата натрия и глицерина на поверхности частиц ПАП-2:



В результате реакции (1), называемой реакцией омыления стеарина, формируется вязкая

глиноподобная масса, которую протирали через сито с размером ячейки 1,5 мм. Полученную совокупность гранул (рис. 3), представляющую собой влажную шихту, высушивали при комнатной температуре до полного испарения влаги.

Затем сухую гранулированную шихту термообработывали на воздухе (150–350 °С, 1 ч) для разложения органических компонентов, входящих в ее состав, в соответствии с химическими реакциями



Выбранный режим термообработки позволял сохранить равномерно распределенный коксовый остаток на поверхности чешуйчатых частиц, составляющих гранулы.

После завершения реакций (2) и (3) полученную шихту прессовали под давлением 500 МПа для получения порошковых заготовок, которые подвергали РС на воздухе в режиме ФГ. Коксовый остаток сохранялся в объеме спеченного материала.

На установке «TIRATEST-2000» (Германия) оценивали следующие механические характеристики спеченных образцов по общепринятым методикам [14] (скорость деформирования — 1 мм/мин): предел прочности при изгибе ($\sigma_{изг}$) сосредоточенной нагрузкой призматических образцов с размерами 8×8×50 мм; трещиностойкость (по параметру K_{Ic}) надрезанных на половину вы-



Рис. 3. Вид гранулированной шихты, полученной из пудры ПАП-2

соты призматических образцов тех же размеров и при той же схеме нагружения, что и в случае определения $\sigma_{\text{изг}}^T$ (радиус кривизны вершины надреза — 50 мкм).

Ударную вязкость (КСУ) измеряли с использованием маятникового копра на надрезанных призматических образцах в соответствии с ГОСТ 9454-78.

Открытую пористость образцов определяли методом гидростатического взвешивания, а плотность и общую пористость — расчетным методом [12].

Кривые смятия волокнистой теплоизоляции, полученной из каолиновых волокон, регистрировали при сжатии цилиндрических образцов диаметром 20 мм и высотой 50 мм (скорость деформирования — 0,1 мм/мин).

Показатель эффективной теплопроводности этого материала устанавливали с помощью методики «горячей проволоки» в условиях стационарного теплового потока с применением измерительного креста (ISO 8894-1).

Термостойкость высокопористой алюмооксидной керамики, полученной из сферолитов глинозема, оценивали путем построения и анализа диаграммы сопротивляемости материала термическим повреждениям (СТП-диаграммы) [15] в координатах $\sigma_{\text{изг}}^T - \Delta t$ (здесь $\sigma_{\text{изг}}^T$ — предел прочности при изгибе призматического образца с размерами 8×8×50 мм после термоциклирования; $\Delta t = t - t_{\text{oc}}$, где t — температура нагрева образца на воздухе, t_{oc} — температура охлаждающей среды). В качестве охлаждающей среды использовали сжатый атмосферный воздух (20 °С), подаваемый в виде струи через щелевидную насадку на поверхность испытуемого образца.

Кроме того, рассчитывали относительную потерю прочности:

$$X = (1 - \sigma_{\text{изг}}^T / \sigma_{\text{изг}}^{\text{cp}}) \cdot 100 \%$$

указанных образцов после однократного термоцикла и 10 термоциклов в режиме 1200±20 °С (воздушная среда). Здесь $\sigma_{\text{изг}}^{\text{cp}}$ — среднее арифметическое значение предела прочности при изгибе, рассчитанное после испытания серии из 10 образцов, не повергавшихся термоциклированию.

Трибологические свойства антифрикционного композита — износостойкость и коэффициент

трения скольжения — изучали по схеме «стержень—диск» (испытуемые образцы имели диаметр 20 мм и высоту 8 мм) на приборе «Tribometer» (CSM Instr., Швейцария). Контртело — шарик из стали ШХ-15 диаметром 3 мм, его линейная скорость составляла 10 см/с. Нормальная нагрузка прижима контртела к поверхности образца — 1 Н. Площадь сечения и глубину бороздки износа измеряли с помощью оптического профилометра WYKO NT 1100 («Veeco», США).

Фазовый состав антифрикционного композита исследовали методом РФА на установке ДРОН-3 (излучение CuK_α) по стандартной методике.

Микротвердость материала определяли путем вдавливания в поверхность образца алмазной пирамидки с углом при вершине 136° под нагрузкой 1 Н в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Масловпитываемость оценивали по величине относительного приращения массы образцов (%) после их пропитки маслом в условиях разрежения.

Методом растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе «Hitachi-F405A» (Япония) изучали структуру частиц пудры ПАП-2 с поверхности ее свободной засыпки, а структуру спеченных композиционных материалов — с поверхности излома образцов после механических испытаний.

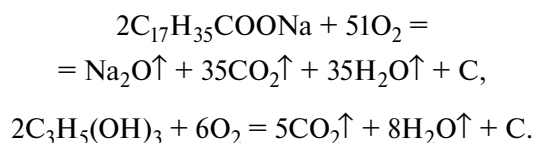
Заключение

Рассмотрены технологические подходы, применяемые для создания композиционных материалов, состоящих из слоистой керметной матрицы $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и входящих в нее различных типов наполнителей: дискретные металлические ВЗР-волокна (алюминиевые, титановые, стальные), дюралевая стружка, мелкодисперсные частицы графита, электрокорунд фракции 0,08—0,1 мм, каолиновые волокна и сферолиты технического глинозема.

Формирование структуры композитов достигается при прессовании шихты, включающей смесь алюминиевой пудры ПАП-2 с наполнителем (ПАП-2 предварительно термообработывали на воздухе для выжига стеарина с поверхности ее чешуйчатых частиц и замены стеарина на пассивирующую алюмооксидную пленку, удельная поверхность такой пудры по методу БЭТ составляла 4,1322 м²/г). Вследствие приложения давления

прессования происходит укладка чешуйчатых частиц в прессовках по контактирующим сопрягаемым плоскостям, в результате чего формируется слоистая структура матрицы, в объеме которой равномерно распределены частицы наполнителя. Полученные прессованием сырые заготовки подвергли РС на воздухе в режиме ФГ.

Для изготовления композита Al/Al₂O₃—С использовали новый технологический подход, основанный на гранулировании пудры ПАП-2 и исключаящий предварительный выжиг стеарина с поверхности ее частиц. Такое гранулирование обеспечивалось благодаря взаимодействию стеарина с едким натром — продуктом гидролиза разбавленного водой жидкого стекла, вводимого в пудру ПАП-2 [C₃H₅(C₁₈H₃₅O₂)₃ + 3NaOH = 3C₁₇H₃₅COONa + C₃H₅(OH)₃]. Для образования гранул полученную вязкую массу протирали через сито. Совокупность гранул, представляющую шихту, высушивали и термообработывали на воздухе, в результате чего происходило разложение органических компонентов (стеарата натрия и глицерина), входящих в ее состав:



Экспериментально установленный режим термообработки шихты обеспечивал сохранение равномерно распределенного коксового остатка на поверхности чешуйчатых алюминиевых частиц, составляющих гранулы.

Физико-механические свойства полученных композитов (плотность, пористость, масловпитываемость, прочность, трещиностойкость, ударную вязкость, микротвердость, трибологические характеристики, термостойкость и теплопроводность) определяли по стандартным и общепринятым методикам.

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра «РГТУ—МАТИ» им. К.Э. Циолковского.

Литература

1. *Молотова В.А.* Промышленное применение кремнийорганических лакокрасочных покрытий. М.: Химия, 1978.
2. *Кардашов Д.А.* Синтетические клеи. М.: Химия, 1976.
3. *Осокин А.С.* Основы общей химической технологии: Учеб. пос. для вузов. М.: Высш. школа, 1963.
4. *Литовка О.Б.* Исследования физико-химических и взрывчатых свойств аммиачной селитры и смесей на ее основе: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010.
5. *Александров В.А., Владимиров В.В., Дмитриев Р.Д., Осипов С.О.* Ракеты-носители. М.: Воениздат, 1981.
6. *Тихов С.Ф., Романенков В.Е., Садыков В.А., Пармон В.Н., Ратько А.И.* Пористые композиты на основе оксид-алюминиевых керметов (синтез и свойства). Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2004.
7. *Афанасьева Н.А., Романенков В.Е.* Низкотемпературная пористая керамика на основе оксида алюминия // 8-я Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 27—28 мая 2008 г.). Минск: Ин-т порошковой металлургии НАН Беларуси, Изд. дом «Белорусская наука», 2008. С. 131—132.
8. *Петюшик Е.Е., Тихов С.Ф., Романенков В.Е., Евтухова Т.Е., Пинчук Т.И.* Композиционный пористый материал для каталитических мембранных реакторов // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 36. Минск: Изд. дом «Беларуская навука». 2013. С. 146—153.
9. *Шляпин С.Д., Сенкевич К.С., Князев М.И., Петров Л.М.* Получение порошковых катодов системы Ti—Al для нанесения ионно-вакуумных покрытий // 9-я Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 29—30 сент. 2010 г.). Минск: Ин-т порошковой металлургии НАН Беларуси, Изд-во «Диатех», 2010. С. 123—124.
10. *Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д.* Особенности технологии и физико-механические свойства кермета Al₂O₃—Al со слоистой структурой // Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2008. No. 3. С. 23—29.
11. *Dinesh K., Geeta A., Rajesh P.* Properties and characterization of Al—Al₂O₃ composites processed by casting and powder metallurgy routes (review) // Int. J. Latest Trends Eng. Technol. 2013. Vol. 2. No. 4. P. 486—496.
12. Практикум по технологии керамики и огнеупоров / Под ред. Д.Н. Полубояринова и Р.Я. Попильского. М.: Стройиздат, 1972.
13. *Васильев В.А., Митин Б.С., Пашков И.Н., Серов М.М., Скуридин А.А., Лукин А.А., Яковлев В.Б.* Высокоскорост-

ное затвердевание расплава. М.: СП Интермет инжиниринг, 1998.

14. Красулин Ю.Л., Баринов С.М., Иванов В.С. Структура и разрушение материалов из порошков тугоплавких соединений. М.: Наука, 1985.
15. Ситников А.И. Получение термостойкого кермета Al_2O_3 —Al реакционным спеканием: Дис. ... канд. техн. наук. М.: РГТУ—МАТИ им. К.Э. Циолковского, 2005.

References

1. Molotova V.A. Promyshlennoe primeneniye kremniyorganicheskikh lakokrasochnykh pokrytii [Industrial application of organic-silicone varnish-and-paint coatings]. Moscow: Khimiya, 1978.
2. Kardashov D.A. Sinteticheskie klei [Synthetic glues]. Moscow: Khimiya, 1976.
3. Osokin A.S. Osnovy obshchei khimicheskoi tekhnologii [Fundamentals of general chemical technology]: Ucheb. pos. dlya vuzov. Moscow: Vysshaya shkola, 1963.
4. Litovka O.B. Issledovaniya fiziko-khimicheskikh i vzryvchatykh svoystv ammiachnoi selitry i smesei na eye osnove [Study of physico-chemical and explosive properties of ammonium nitrate and their mixtures]: Abstract of the dissertation of PhD. Moscow: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2010.
5. Aleksandrov V.A., Vladimirov V.V., Dmitriev R.D., Osipov S.O. Rakety-nositeli [Carrier-Rockets]. Moscow: Voenizdat, 1981.
6. Tikhov S.F., Romanenkov V.E., Sadykov V.A., Parmon V.N., Rat'ko A.I. Poristye kompozity na osnove oksid-alyuminiyevykh kermetov (sintez i svoistva) [Porous composites based on oxide-aluminum cermets (synthesis and properties)]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, filial «GEO», 2004.
7. Afanas'eva N.A., Romanenkov V.E. Nizkotemperaturnaya poristaya keramika na osnove oksida alyuminiya [Low-temperature porous ceramics based on aluminum oxide]. In: 8 Mezhdun. nauchno-tekhn. konf. «Novye materialy i tekhnologii: Poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka». Minsk: GNU Institut poroshkovoi metallurgii NAN Belarusi, izdatel'skii dom «Belorusskaya nauka», 2008. P. 131—132.
8. Petyushik E.E., Tikhov S.F., Romanenkov V.E., Evtukhova T.E., Pinchuk T.I. Kompozitsionnyi poristy material dlya kataliticheskikh membrannykh reaktorov [Composite porous material for catalytic membrane reactors]. In: Poroshkovaya metallurgiya: Respubl. mezhved. sbornik nauchnykh trudov. No. 36. Minsk: Izdatel'skii dom «Belaruskaya navuka», 2013. P. 146—153.
9. Shlyapin S.D., Senkevich K.S., Knyazev M.I., Petrov L.M. Poluchenie poroshkovykh katodov sistemy Ti—Al dlya naneseniya ionno-vakuurnykh pokrytii [Preparation of powder Ti—Al cathodes for of ion-vacuum coatings]. In: 9 Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Novye materialy i tekhnologii: Poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka». Minsk: Institut poroshkovoi metallurgii NAN Belarusi, izd-vo «Diatekh», 2010. P. 123—124.
10. Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Shlyapin S.D. Osobennosti tekhnologii i fiziko-mekhanicheskie svoistva kermeta Al— Al_2O_3 so sloistoi strukturoi [Technological features and physico-mechanical properties of Al— Al_2O_3 cermet with a lamelled structure]. In: Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya. 2008. No. 3. P. 23—29.
11. Dinesh K., Geeta A., Rajesh P. Properties and characterization of Al— Al_2O_3 composites processed by casting and powder metallurgy routes (review). *Int. J. Latest Trends Eng. Technol.* 2013. Vol. 2. No. 4. P. 486—496.
12. Praktikum po tekhnologii keramiki i ogneporov [Workshop on the technology of ceramics and refractories]. Eds D.N. Poluboyarinov, R.Ya. Popil'skii. Moscow: Stroiizdat, 1972.
13. Vasil'ev V.A., Mitin B.S., Pashkov I.N., Serov M.M., Skuridin A.A., Lukin A.A., Yakovlev V.B. Vysokoskorostnoye zatverdevanie raspava [High-speed solidification of melt]. Moscow: SP Intermet Inzhiniring, 1998.
14. Krasulin Yu.L., Barinov S.M., Ivanov V.S. Struktura i razrusheniye materialov iz poroshkov tugoplavkikh soedinenii [Structure and fracture of materials from powders of refractory compounds]. Moscow: Nauka, 1985.
15. Sitnikov A.I. Poluchenie termostoikogo kermeta Al_2O_3 —Al reaktsionnym spekaniem [Obtaining heat-resistant Al_2O_3 —Al cermet by reaction sintering]: Dissertation of PhD. Moscow: RGTU—MATI im. K.E. Tsiolkovskogo, 2005.