

УДК 621.762.8 : 621.9 : 669.713.6

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-37-43

Особенности гранулирования алюминиевой пудры ПАП-2 в технологии порошкового композиционного материала Al–Al₂O₃ со слоистой структурой

© 2017 г. Д.А. Иванов, С.Д. Шляпин, Г.Е. Вальяно, Л.В. Федорова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)

Объединенный институт высоких температур (ОИВТ) РАН, г. Москва

Статья поступила в редакцию 16.03.17 г., доработана 03.07.17 г., подписана в печать 05.07.17 г.

Анализ современной научно-технической информации свидетельствует о больших перспективах использования композиционных материалов (КМ) на основе системы Al–Al₂O₃. В работах кафедры материаловедения и технологии обработки материалов МАИ показано, что перспективным способом получения КМ на основе алюминия является реакционное спекание на воздухе заготовок из высокодисперсных порошков марки ПАП-2. Однако для практической реализации предлагаемого метода необходимо было решить ряд проблем, в частности связанных с их низкими технологическими свойствами: отсутствием текучести и крайне низкой насыпной плотностью. Для изменения характеристик исходного порошка в работе изучены и предложены различные методы его гранулирования, а также описаны их физико-химические аспекты. Для гранулирования алюминиевой пудры ПАП-2 применяли различные технологические подходы, в основе которых лежат следующие технологические операции: нагрев пудры на воздухе с последующей изотермической выдержкой при температуре 350 °С, введение в ее состав разбавленного водой натрий-силикатного стекла, механическая обработка пудры в высокоэнергетической планетарной мельнице, ее термообработка в вакууме при температуре 650 °С, иницирование реакции омыления стеарина на поверхности чешуйчатых частиц ПАП-2 с образованием органического компонента – пластификатора. Установлено, что предложенные способы гранулирования промышленного порошка марки ПАП-2 обеспечивают возможность улучшения и варьирования технологических характеристик исходного порошка, а также модифицирование его состава и структуры. Наиболее высокий показатель насыпной плотности (до 1,25 г/см³) достигается при использовании способа механической обработки исходного порошка в высокоэнергетической планетарной мельнице с образованием округлых гранул размером 50–150 мкм. Наиболее технологичным и экономичным является способ, основанный на иницировании химической реакции омыления стеарина на поверхности частиц порошка (насыпная плотность ~0,4 г/см³).

Ключевые слова: алюминиевая пудра ПАП-2, гранулирование, шихта, прессование, спекание, термообработка, порошковая технология, наноразмерные частицы, композиционный материал Al–Al₂O₃.

Иванов Д.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и технологии обработки материалов МАИ (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., 4). E-mail: dali_888@mail.ru.

Шляпин С.Д. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры МАИ. E-mail: sshliapin@yandex.ru.

Вальяно Г.Е. – ст. науч. сотр. ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: gev@ihed.ras.ru.

Федорова Л.В. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры МАИ. E-mail: mati_dekanat4@mail.ru.

Для цитирования: Иванов Д.А., Шляпин С.Д., Вальяно Г.Е., Федорова Л.В. Особенности гранулирования алюминиевой пудры ПАП-2 в технологии порошкового композиционного материала Al–Al₂O₃ со слоистой структурой // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 4. С. 37–43.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-37-43.

Ivanov D.A., Shlyapin S.D., Valyano G.E., Fedorova L.V.

Features of aluminum powder PAP-2 granulation in the technology of Al–Al₂O₃ powder composite with layered structure

Modern scientific technical information implies great prospects for the use of Al–Al₂O₃ based composite materials (CM). The papers by the Materials Science Department of Moscow Aviation University have shown the reactive air sintering of highly-dispersed PAP-2 powder blanks to be a promising way of obtaining the aluminum-base CM. However, it is necessary to solve a number of technological problems to apply the above technique such as the lack of fluidity and extremely low apparent density. The paper studies and suggests various methods of PAP-2 aluminum powder granulation with their physical and chemical aspects described. Various technological approaches to PAP-2 aluminum powder granulation have been used based on such process operations as powder heating in air followed by isothermal aging at 350 °С, adding water solution of sodium-silica glass, mechanical processing of powder in high-energy planetary mill, its heat treatment in vacuum at 650 °С initiating the stearin saponification reaction on the surface of the PAP-2 flakes followed by the formation of the organic component – plasticizer. It is found that the proposed methods of industrial

PAP-2 powder granulation can modify its composition and structure as well as improve and vary technological characteristics of the original powder. The highest value of apparent density (up to 1,25 g/cm³) is achieved when using mechanical treatment of the original powder in a high-energy planetary mill with the formation of rounded granules 50–150 μm in size. The most producible and cost-effective technique is based on initiating the chemical reaction of «stearin saponification» on the surface of powder particles (with apparent density of approximately 0,4 g/cm³).

Keywords: aluminum powder PAP-2, granulation, charge, forming, sintering, heat treatment, powder technology, nanoscale particles, Al–Al₂O₃ composite material.

Ivanov D.A. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of materials science, Moscow Aviation Institute (National Research University) – MAI. E-mail: dali_888@mail.ru.

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

Valyano G.E. – senior researcher, Joint Institute for High Temperatures of the RAS. E-mail: gev@ihed.ras.ru.

Fedorova L.V. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of materials science, MAI. E-mail: mati_dekanat4@mail.ru.

Citation: Ivanov D.A., Shlyapin S.D., Valyano G.E., Fedorova L.V. Osobennosti granulirovaniya alyuminievoi pudry PAP-2 v tekhnologii poroshkovogo kompozitsionnogo materiala Al–Al₂O₃ so sloistoi strukturoi. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 4. P. 37–43. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-37-43.

Введение

Анализ современной научно-технической информации свидетельствует о больших перспективах использования композиционных материалов (КМ) на основе Al [1–6].

Изготовление КМ с алюминиевой матрицей, содержащей в качестве армирующих элементов мелкодисперсные частицы (например, тугоплавких оксидов, нитридов, карбидов, силицидов металлов, интерметаллидов и синтетического алмаза), а также нитевидные кристаллы некоторых соединений, часто базируется на жидкофазных методах совмещения составляющих этих КМ [2–10].

Но наиболее широкие возможности для получения КМ предоставляет порошковая металлургия [2, 11–19].

Хорошо известна многостадийная технология дисперсно-упрочненного КМ «алюминиевая матрица — наноразмерные частицы алюмооксидного упрочнителя» (материал САП) [11], в которой реализуется твердофазное совмещение матрицы и упрочнителя.

В настоящее время для твердофазного совмещения компонентов применяются различные методы, в частности механическая обработка их порошковой смеси в высокоэнергетической планетарной мельнице с последующей обработкой давлением полученного продукта (холодное или горячее прессование, экструзия) [12–15]. При этом формирование алюмооксидного упрочнителя возможно с использованием принципа «in situ» в процессе механического легирования порошка на основе алюминия в кислородсодержащей атмосфере [15]. В этом случае частицы алюмооксидного

упрочнителя синтезируются вследствие протекающей реакции «твердое (Al) — газ (O₂)», активируемой ударно-истирающим воздействием твердо-сплавных помольных тел.

В работах кафедры материаловедения и технологии обработки материалов МАИ было показано, что перспективным способом получения КМ на основе алюминия является реакционное спекание на воздухе заготовок из высокодисперсных порошков марки ПАП-2 [20–22]. Наиболее близка к этому способу упомянутая выше технология материала САП, обладающего работоспособностью до температуры порядка 500 °С.

Для практической реализации предлагаемого способа необходимо было решить ряд проблем, которые не позволяли раньше использовать порошок ПАП-2 в традиционных процессах порошковой металлургии, в частности из-за его низких технологических свойств: отсутствия текучести и крайне низкой насыпной плотности. В качестве основного способа изменения характеристик исходного порошка в работе предложены различные методы его гранулирования.

Методика эксперимента и исследования

Для гранулирования алюминиевой пудры ПАП-2 (ГОСТ 5494-95) использовали пять различных способов:

1. Навеску ПАП-2 помещали в алюминиевую емкость и нагревали на воздухе до температуры 350 °С с последующей изотермической выдержкой,

в течение которой происходило полное выгорание стеарина на поверхности чешуйчатых частиц пудры с его заменой на пассивирующую алюмооксидную пленку наноразмерной толщины. В результате достигалось комкование пудры. Данный порошковый продукт обозначим ПК (пудра комкованная).

2. В состав ПК вводили разбавленное водой натрий-силикатное жидкое стекло как клеящий компонент в количестве 3–6 мас.% (в пересчете на сухой остаток вещества) и производили перемешивание. Получали порошковый продукт ПК-NS (пудра комкованная с добавкой Na_2O и SiO_2).

3. ПК подвергали механической обработке (МО) твердосплавными шарами в высокоэнергетической планетарной мельнице на воздухе, в результате которой происходило образование округлых гранул вследствие холодной сварки чешуйчатых частиц (порошковый продукт ПК-МО).

4. ПК подвергали вакуумной термообработке (ВТО) при температуре 650 °С, в результате которой происходило образование гранул — агломератов из чешуйчатых частиц (порошковый продукт ПК-ВТО).

5. Гранулирование исходной пудры ПАП-2 осуществлялось путем инициирования реакции омыления стеарина на поверхности чешуйчатых частиц за счет введения раствора жидкого стекла. При этом образовывался органический компонент — пластификатор, позволяющий протирать полученную пластичную массу через ячейки сита (порошковый продукт ПГ-1 — пудра гранулированная).

Исследование фазового состава гранул выполняли методом рентгенофазового анализа (РФА) на установке «Дрон-3» (излучение CuK_α) по стандартной методике, а их структуру изучали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе «Hitachi-F405 А» (Япония).

Насыпную плотность гранулированного материала после утряски рассчитывали по отношению его массы к занимаемому им объему, определяя среднее арифметическое трех измерений.

Результаты и их обсуждение

Особенности получения порошкового продукта ПК

Комкование пудры ПАП-2 происходило вследствие образования микрогранул из чешуйчатых

частиц при ее нагреве на воздухе при весьма медленном отводе газообразных продуктов сгорания стеарина. Специфика режима термообработки ПАП-2 на воздухе, определяющего кинетику газовой выделения, рассматривалась нами ранее в работе [20].

При этом собственно формирование микрогранул можно представить следующим образом. По мере удаления стеарина постепенно увеличивается общая площадь контакта между образующимися оксидными областями на поверхностях соседних чешуйчатых частиц. Между этими оксидными областями имеет место адгезионное взаимодействие. К моменту завершения изотермической выдержки (при $t = 350$ °С) вся поверхность чешуйчатых частиц представлена алюмооксидной фазой, по которой наблюдается их взаимное припекание за счет диффузии с образованием слоистых пакетов — микрогранул.

На рис. 1 показаны микрогранулы размером 15–30 мкм, образующиеся в объеме комкованной пудры, а на рис. 2 — припеченные по поверхностям

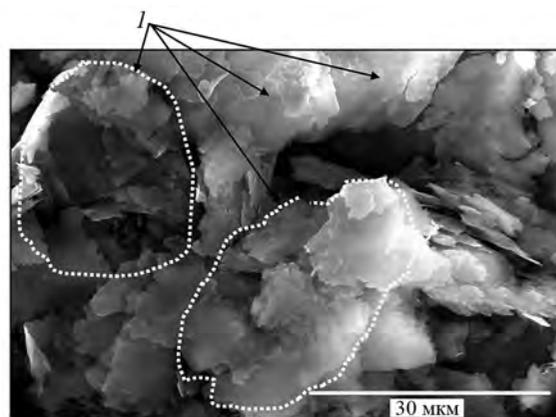


Рис. 1. Вид микрогранул (1) из чешуйчатых частиц в объеме комкованной пудры

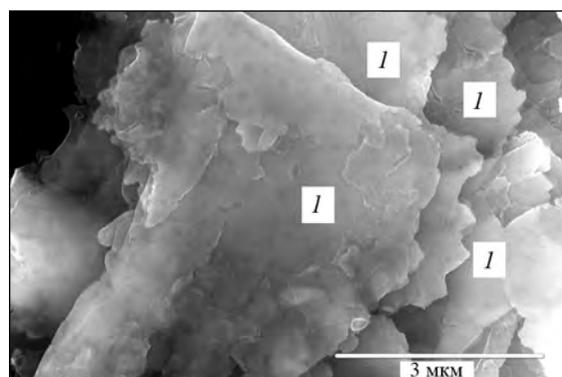


Рис. 2. Вид чешуйчатых алюминиевых частиц (1) в составе микрогранул

ной алюмооксидной фазе чешуйчатые алюминиевые частицы в составе микрогранул. Насыпная плотность ПК составляла 0,2—0,25 г/см³.

Согласно данным РФА полученный порошковый продукт представлен алюминием (90 об.%) и γ -Al₂O₃ (10 об.%).

Особенности получения порошкового продукта ПК-NS

В этом случае гранулирование пудры обеспечивается благодаря клеящей способности жидкого стекла. После высыхания смеси ПК с разбавленным раствором жидкого стекла имело место образование скоплений (40—60 мкм) из склеенных между собой чешуйчатых частиц, которые можно рассматривать как гранулы.

Подробно аспекты реакционного спекания порошковых заготовок, содержащих сухой остаток жидкого стекла (СОЖС), рассмотрены нами в работе [21].

Насыпная плотность ПК-NS составляла 0,40—0,43 г/см³ (при содержании СОЖС в пределах 3—6 мас.%).

Полученный порошковый продукт представлен алюминием (90 об.%), γ -Al₂O₃ (10 об.%) и рентгеноаморфной фазой, относящейся к гидросиликату натрия.

Особенности получения порошкового продукта ПК-МО

Важным достоинством способа механической обработки с целью гранулирования ПК являются его значительная производительность, возможность достижения высокой однородности продукта по размерам получаемых гранул, а также высокая степень воспроизводимости результата гранулирования.

Физико-химические процессы, происходящие в процессе МО чешуйчатых алюминиевых частиц в высокоэнергетической планетарной мельнице, описаны нами в работе [20]. Дополнительно отметим, что главным из них является импульсное и локальное ударно-истирающее воздействие сферических твердосплавных тел на обрабатываемые частицы, в результате которого в зоне контакта этих частиц возникает температура, достаточная для их сварки за счет диффузии. Поэтому структура получаемых округлых гранул 1 размером 50—150 мкм (рис. 3, а) представлена сваренными между собой чередующимися чешуйчатыми частицами 2 (структура типа «капуста»). Также видно, что

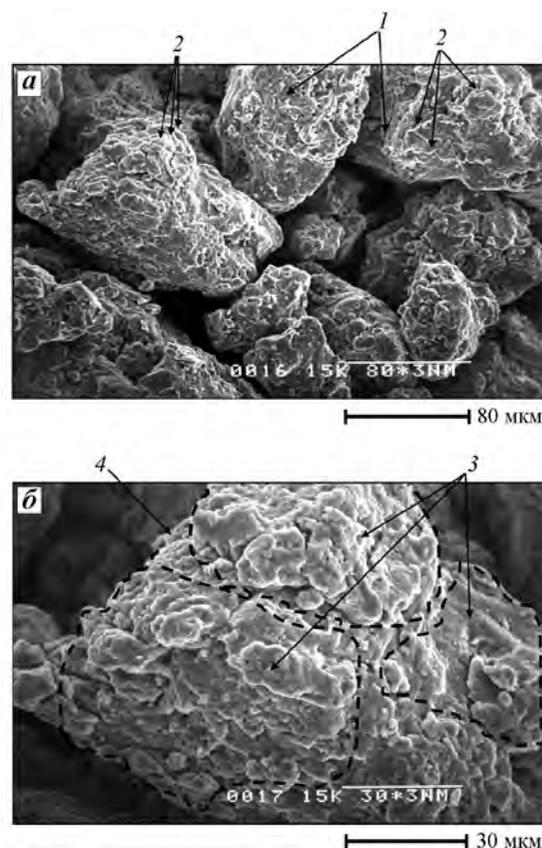


Рис. 3. Вид гранул, полученных методом МО продукта ПК

а — округлые гранулы (1) и сваренные чешуйчатые частицы (2) в объеме округлых гранул;

б — сваренные гранулы (3) в объеме наиболее крупных гранул (4)

в результате сварки нескольких гранул 3 (выделены штриховой линией) формируются наиболее крупные гранулы 4 (рис. 3, б).

Насыпная плотность ПК-МО составляла 0,7—1,25 г/см³ при варьировании времени МО от 30 до 180 мин.

Полученный порошковый продукт представлен алюминием (100 об.%) и рентгеноаморфной фазой, относящейся к алюмооксидному компоненту, формирующемуся вследствие истирания.

Особенности получения порошкового продукта ПК-ВТО

В результате вакуумной термообработки алюминиевого продукта ПК происходило образование гранул-агломератов 1 размером 10—50 мкм (рис. 4, а), что обусловлено эффектом «зонального уплотнения», наблюдаемого при спекании высокодисперсных порошковых систем. В этом случае из-за стремления системы к понижению поверхностной энергии возникают локальные зоны, в

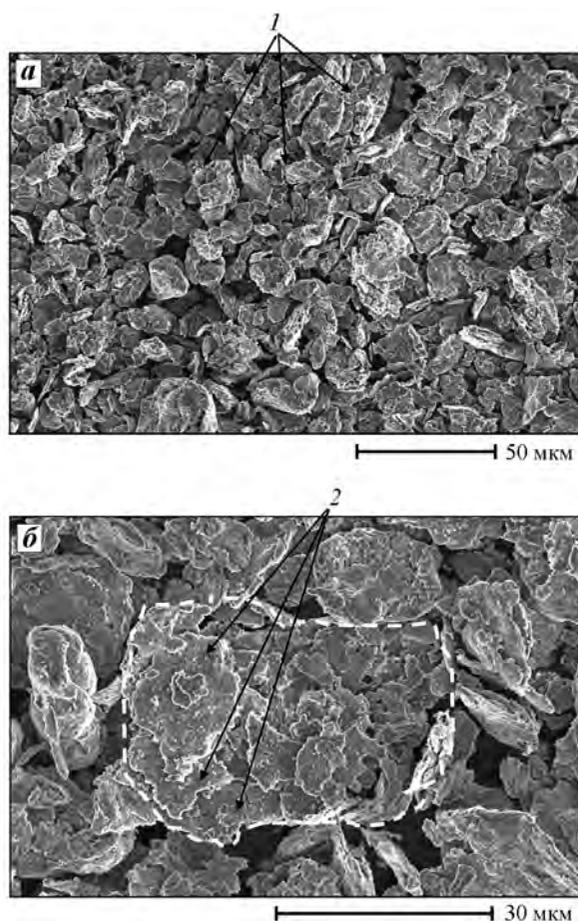


Рис. 4. Вид гранул, полученных методом ВТО продукта ПК

a – вид гранул-агломератов (1) в составе порошка;
б – чешуйчатые частицы (2) в составе гранулы-агломерата, выделенной штриховой линией

объеме которых происходят преимущественная усадка и уплотнение с формированием слоистых агломератов 1, отрывающихся друг от друга по межагломератным границам.

Каждая гранула — слоистый агломерат — состоит из припеченных по плоскостям чешуйчатых частиц 2 (рис. 4, б).

Кроме того, методами РФА и РЭМ установлено, что на поверхности чешуйчатых частиц, составляющих слоистые агломераты, фиксируются алюмооксидные включения наноразмерного диапазона (рис. 5). Они образуются вследствие отличия коэффициентов термического расширения (КТР) алюминиевой основы пластинчатой частицы ($37,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и пассивирующей ее поверхностной алюмооксидной пленки ($7,33 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Указанное отличие КТР (не менее чем в 5 раз в интервале $t = 20\text{--}600 \text{ } ^\circ\text{C}$) приводит к растрескива-

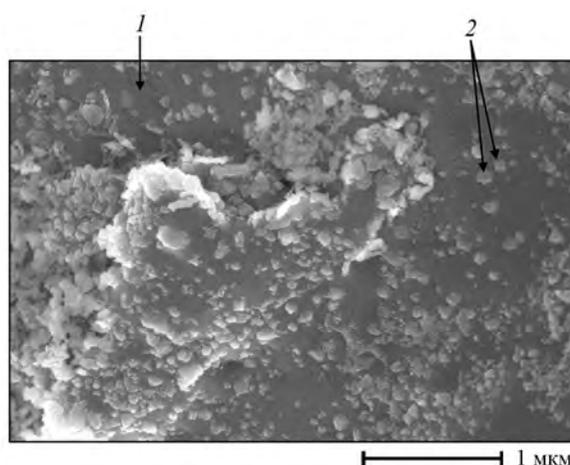


Рис. 5. Вид поверхности чешуйчатой частицы (1) в составе гранулы-агломерата и наноразмерные алюмооксидные частицы (2)

нию алюмооксидной пленки с образованием алюмооксидных зерен — нановключений, которые в процессе термообработки стремятся к сфероидизации, что определяет их округлую форму.

Насыпная плотность ПК-ВТО составляла $0,37\text{--}0,40 \text{ г/см}^3$, фазовый состав этого порошка совпадал с фазовым составом ПК.

Особенности получения порошкового продукта ПГ-1

Получение данного порошкового продукта обеспечивается благодаря возможности инициирования химической реакции омыления стеарина на поверхности чешуйчатых частиц ПАП-2, описанной нами ранее в работе [22].

Отметим, что для реализации этого химического процесса необходимо производить весьма интенсивное перемешивание заданной навески алюминиевой пудры со щелочью — продуктом гидролиза жидкого натрий-силикатного стекла. При этом образующиеся в результате данной реакции стеарат натрия и глицерин равномерно распределены по поверхности чешуйчатых частиц и выполняют функцию пластификатора, который позволяет формировать гранулы путем продавливания смеси через сито. Соответственно размер ячеек сита определяет размер получаемых гранул (рис. 6).

После сушки гранулы обладают хорошей текучестью, легко заполняют гнездо пресс-формы (насыпная плотность ПГ-1 составляет $0,35\text{--}0,4 \text{ г/см}^3$). Кроме того, данный порошковый продукт обладает высокой пластичностью, что делает возможным его эффективное экструдирование.

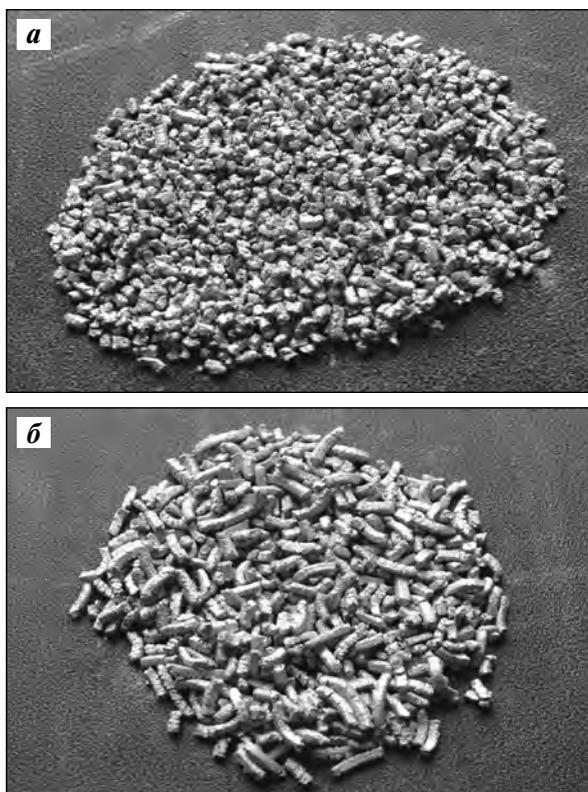


Рис. 6. Вид гранул размером 0,5–1,0 мм (а) и 3–5 мм (б), полученных путем продавливания пластифицированной смеси через сито

В случае необходимости можно производить выжиг пластификатора из состава гранул по специальному режиму — как на воздухе, так и в вакууме. При выжиге пластификатора на воздухе получали продукт ПГ-2, фазовый состав которого совпадал с фазовым составом ПК (дополнительно в нем фиксировались следы углеродного остатка). При выжиге в вакууме (продукт ПГ-3С) количество углеродного остатка составляло ~3 об.%, что делает использование данного порошка перспективным для изготовления антифрикционного алюмографитового материала.

Насыпная плотность ПГ-2 и ПГ-3С совпадала с этим показателем для ПГ-1.

Заключение

Рассмотрены различные способы гранулирования промышленного порошка марки ПАП-2, обеспечивающие возможность улучшения и варьирования его технологических характеристик, а также модифицирования его состава и структуры.

Наиболее высокий показатель насыпной плотности (до 1,25 г/см³) достигается при использова-

нии механической обработки исходного порошка в высокоэнергетической планетарной мельнице с образованием округлых гранул размером 50–150 мкм.

Самым технологичным и экономичным является способ, основанный на инициировании химической реакции омыления стеарина на поверхности частиц порошка (насыпная плотность ~0,4 г/см³).

Исследования выполнены в рамках базовой части государственного задания вузам № 11.7568.2017/Б4 с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

Литература/References

1. Kale V.C. Aluminium base metal matrix composites for aerospace application: a literature review. *J. Mechan. Civil Eng.* 2015. Vol. 12. Iss. 6. P. 31–36.
2. Koli D.K., Agnihotri G., Purohit R. Properties and characterization of Al–Al₂O₃ composites processed by casting and powder metallurgy routes (Review). *Int. J. Latest Trends Eng. Technol.* 2013. Vol. 2. Iss. 4. P. 486–496.
3. Калашников И.Е. Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов: Автореф. дис. докт. техн. наук. М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, 2011; Kalashnikov I.E. Razvitie metodov armirovaniya i modifitsirovaniya struktury alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov [The development and reinforcement methods of modifying the structure of aluminum-matrix composites]: Abstract of the dissertation of Dr. Sci. (Tech.). Moscow: IMET im. A.A. Baikova RAN, 2011.
4. Vencl A., Rac A., Bobić I. Tribological behaviour of Al — based MMCs and their application in automotive industry. *Tribol. Industry.* 2004. Vol. 1. No. 3–4. P. 31–38.
5. Himanshu K., Mer K.K.S., Sandeep K. A review on mechanical and tribological behaviors of stir cast aluminum matrix composites. *Procedia Mater. Sci.* 2014. Vol. 6. P. 1951–1960.
6. Koli D.K., Agnihotri G., Purohit R. A review on properties, behaviour and processing methods for Al — nano Al₂O₃ composites. *Procedia Mater. Sci.* 2014. Vol. 6. P. 567–589.
7. Ghanaraja S., Nath S.K., Ray S. Processing and mechanical properties of cast Al (Mg, Mn) — Al₂O₃ (MnO₂) composites containing nanoparticles and larger particles. *Metall. Mater. Trans. A.* 2014. Vol. 45. P. 3467–3480.
8. Ramnath B.V., Elanchezhian C., Annamalai R.M., Ara-

- vind S., Atreya T. Sri Ananda, Vignesh V., Subramanian C. Aluminium metal matrix composites — a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2014. Vol. 38. P. 55—60.
9. Kök M., Özdin K. Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al₂O₃ particles. *J. Mater. Process. Technol.* 2007. Vol. 183. P. 301—309.
 10. Bodunrin M.O., Alaneme K.K., Chown L.H. Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. *J. Mater. Res. Technol.* 2015. Vol. 4. No. 4. P. 434—445.
 11. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы: Учеб. пос. М.: МГИУ, 2010; Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Shlyapin S.D. Dispersno-uprochnennyye, voloknistyye i sloistyye neorganicheskiye kompozitsionnyye materialy [Dispersibly hardened, fibrous and layered inorganic composite materials]. Moscow: MGIU, 2010.
 12. Abedinzadeh R., Safavi Karimzadeh S.M. A comparative study on wear properties of nanostructured Al and Al/Al₂O₃ nanocomposite prepared by microwave-assisted hot press sintering and conventional hot pressing. *J. Mechan. Sci. Technol.* 2015. Vol. 29. No. 9. P. 3685—3690.
 13. Khorshid M. Tabandeh, Jahromi S.A., Moshksar M.M. Mechanical properties of tri-modal Al matrix composites reinforced by nano- and submicron-sized Al₂O₃ particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion. *Mater. Design.* 2010. Vol. 31. P. 3880—3884.
 14. Canakci A., Varol T., Ozsahin S. Prediction of effect of volume fraction, compact pressure and milling time on properties of Al—Al₂O₃ MMCs using neural networks. *Met. Mater. Int.* 2013. Vol. 19. No. 3. P. 519—526.
 15. Asgharzadeh H., Simchi A., Kim H.S. Hot deformation of ultrafine-grained Al6063/Al₂O₃ nanocomposites. *J. Mater. Sci.* 2011. Vol. 46. P. 4994—5001.
 16. Padmavathi C., Upadhyaya A. Densification, microstructure and properties of supersolidus liquid phase sintered 6711Al—SiC metal matrix composites. *Sci. Sinter.* 2010. Vol. 42. Iss. 3. P. 363—382.
 17. Bhaskar Raju S.A., Swamy A.R.K., Ramesh A. Mechanical and tribological behaviour of aluminium metal matrix composites using powder metallurgy technique: Review. *Int. J. Mechan. Eng. Robot. Res.* 2014. Vol. 3. No. 4. P. 551—563.
 18. Ramesh B.T. Characterization of Al based nano composites using powder metallurgy technique. *Int. J. Res. Aeronaut. Mechan. Eng.* 2014. Vol. 2. Iss. 2. P. 131—147.
 19. Meignanamoorthy M., Sakthivelu S., Ravichandran M. A survey of aluminium metal matrix composites using powder metallurgy technique. *Int. J. Adv. Res. Trends Eng. Technol.* 2015. Vol. 2. Iss. 3. P. 53—56.
 20. Ivanov D.A., Ivanov A.V., Shlyapin S.D. Investigation into physicomechanical properties and structure of the Al—Al₂O₃ composite material fabricated using mechanical treatment of the PAP-2 aluminum powder and reaction sintering of powder billets. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2016. Vol. 57. No. 2. P. 148—156.
 21. Иванов Д.А., Иванов А.В., Шляпин С.Д. Физико-химические аспекты технологии слоистого кермета Al₂O₃—Al, полученного с использованием метода реакционного спекания. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2010. No. 4. С. 34—44; Ivanov D.A., Ivanov A.V., Shlyapin S.D. Fiziko-khimicheskiye aspekty tekhnologii sloistogo kermeta Al₂O₃—Al, poluchennogo s ispol'zovaniem metoda reaktivnogo spekaniya [Physical and chemical aspects of technology layered cermet Al₂O₃—Al, obtained by the method of reaction sintering]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya.* 2010. No. 4. P. 34—44.
 22. Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Ivanov A.V., Shlyapin S.D. Application of PAP-2 aluminum powder to produce powdered composite materials: the features of technology, structure, and physicomechanical properties of composites. Part 1. Process approaches providing the formation of composite materials and applied procedures for determining their physicomechanical properties. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2016. Vol. 57. No. 7. P. 723—727.