Синтез композиционного материала системы Al – O – N

А. Г. Колмаков, Д. В. Просвирнин, А. С. Алиханян, Г. В. Копиев, А. В. Самохин, В. И. Антипов, В. А. Черный

Проведен анализ технологий синтеза оксинитрида алюминия. Методом плазмохимического синтеза получены порошки Al_2O_3 и AlN. Получены образцы керамики при различных параметрах спекания. Исследованы керамические композиционные материалы из порошков Al_2O_3 и AlN. Проведён структурный анализ полученных материалов и определены их прочностные и деформационные свойства. При сравнении полученных значений с литературными показателями, обычно приводимыми для керамики типа AlON, то оказывается, что полученный материал в 2 – 2,4 раза превосходит его по значениям KIC, сопоставим с ним по твердости и примерно в 2 раза уступает по прочности на изгиб.Дана оценка перспективности применяемых методов получения прозрачных керамик на основе оксинитрида алюминия.

Ключевые слова: оксинитрид алюминия, механические свойства, прочность, ударостойкая прозрачная керамика, горячее прессование.

Введение

Применение силикатных стекол, полимерных и других прозрачных материалов все чаще находит применение в различных областях техники [1 – 5]. Многие из этих материалов обладают рядом недостатков: высокая плотность (большой вес конечных изделий), низкая прочность и ударостойкость, непрозрачность в ИК- и/или в УФ-диапазоне. В связи с этим, тенденции развития современной науки и техники показывают необходимость получения высокопрочных, прозрачных и стойких к ударным воздействиям материалов. Ряд керамических материалов, в том числе оксинитрид алюминия $Al_{23}O_{27}N_5$, обладают повышенными значениями прочности и стойкости к ударным воздействиям при высокой степени прозрачности и относительно небольшом весе конечных изделий.

В настоящее время известно более десятка методов синтеза оксинитрида алюминия [6 – 17]. Многие из них отличаются противоречивыми данными или требуют сложного дорогостоящего оборудования, однако некоторые подходы можно рассматривать в качестве перспективных в условиях нашей страны. Например, метод получения компактов из $Al_{23}O_{27}N_5$, предложенный в [18], позволяет применять спекание без давления, уменьшить время спекания, и в результате получать прозрачную оксинитридную керамику. Спекание порошка оксинитрида алюминия с бимодальным распределением размера частиц, предварительно полученного с помощью карботермического восстановления и нитридизации требует использования очень чистого исходного порошка с точно заданными размерами, что является трудоемкой задачей и значительно увеличивает стоимость производства керамик в целом.

Получение порошкового оксинитрида алюминия нагреванием смеси алюминия и оксида алюминия в токе азота, до получения нитрида алюминия, с последующим длительным нагревом полученной смеси в инертной атмосфере [19] в литературе обозначен как механохимический метод. В некоторых исследованиях [20] используется похожий метод, заключающийся в нитридизации смеси алюминия и оксида алюминия при высокой температуре в качестве конечного процесса, а не промежуточной стадии.

В других источниках [20], описан жидкофазный метод синтеза порошков оксинитрида алюминия из органических соединений алюминия и нитрида

алюминия, с последующими сушкой и отжигом полученных порошков. Подход даёт широкий спектр возможностей при отработке методики, подбора подходящих элементов при синтезе, для получения порошков с требуемыми физико-химическими характеристиками.

Сравнительно распространен метод синтеза оксинитрида алюминия из смеси оксида и нитрида алюминия с дальнейшим спеканием [7, 21]. Спекание проводят под давлением, с выдержкой от 2 до 12 ч при высоких температурах, порядка 1700 – 2000 °С [22]. Многие работы содержат данные о положительном влиянии добавок оксидов La, Y, Mg, Ct, Eu на прозрачность полученных керамик, а также температуру синтеза [20, 23, 24].

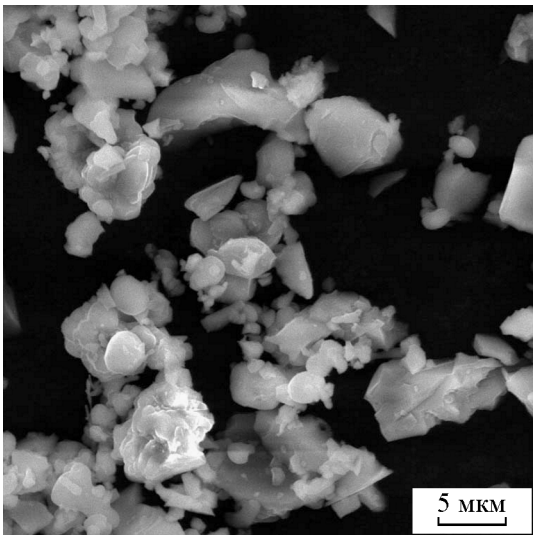
Цель настоящей работы — получение компактов и исследование свойств образцов керамики инструментального назначения на основе оксинитрида алюминия, спеченной из поликристаллических порошков оксида алюминия (Al_2O_3) и нитрида алюминия, полученных способом плазмохимического синтеза.

Материалы и методики

В качестве исходных материалов использовали порошки Al_2O_3 и AlN, полученные методом плазмохимического синтеза (рис. 1*а*) [26, 27]. Такой метод отличается высокой производительностью и позволяет получать чистые исходные продукты (99,95 %) (рис. 1*б*). Порошки Al_2O_3 и AlN в соотношении 40:60, смешивали в планетарной микромельнице в течение 30 – 60 мин. По данным проведенного количественного фазового анализа порошка, соотношение компонентов (в масс. %) в смеси составило 48,5 % AlN – 51,5 % Al_2O_3.

Процесс спекания под давлением осуществляли в вакуумной камере при температурах 1650 – 1900 °С и давлении 1,96 – 2,65 кПа. Время процесса варьировали в пределах 10 – 12 мин. Температуры были выбраны для проверки литературных данных, согласно которым спекание смеси порошков проводится при температуре до 1700 °С. Графитовые пресс-формы для предотвращения влияния углерода были покрыты обмазкой из нитрида бора на спиртовой основе. Вакуумную камеру подвергали двум последовательным циклам “продувка азотом – откачка” до остаточного давления 10^{-2} – 10^{-3} мм рт. ст.

Порошок и полученные компакты исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с применением растрового электронного микроскопа Tescan Vega, оснащенного системой микрорентгеноспектрального анализа (МРСА).



а

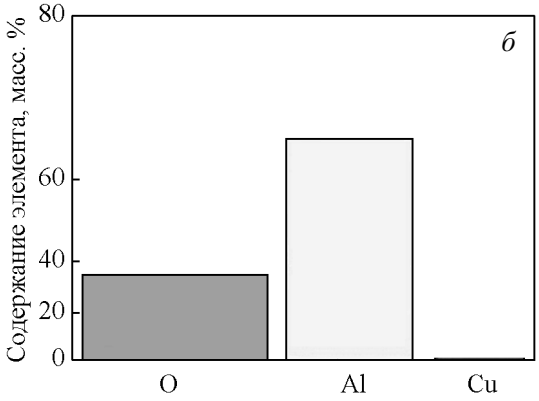


Рис. 1. *а* — Смесь порошков, полученных плазмохимическим синтезом: крупные порошинки — Al_2O_3, мелкие — AlN; *б* — состав частицы порошка Al_2O_3, полученного плазмохимическим синтезом.

Рентгенографические исследования проводили на рентгеновском дифрактометре XRD-6000 Shimadzu. Исследования механических характеристик в условиях испытания на 3-х точечный изгиб проводили на универсальной испытательной машине Instron 5848 с использованием образцов в форме пластин с размерами рабочей зоны 1,5 × 10,0 × 20,0 мм. Значения коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} определяли в соответствии с ISO 14610:2012, микротвердость $H_{\square}$ — на приборе Wolpert Wilson instruments 402mvd, по ГОСТ 9450-76 при нагрузке 200 г и времени испытания 10 с.

Результаты и их обсуждение

Полученные компакты представляли собой непрозрачные пластины серого цвета высотой 10 –

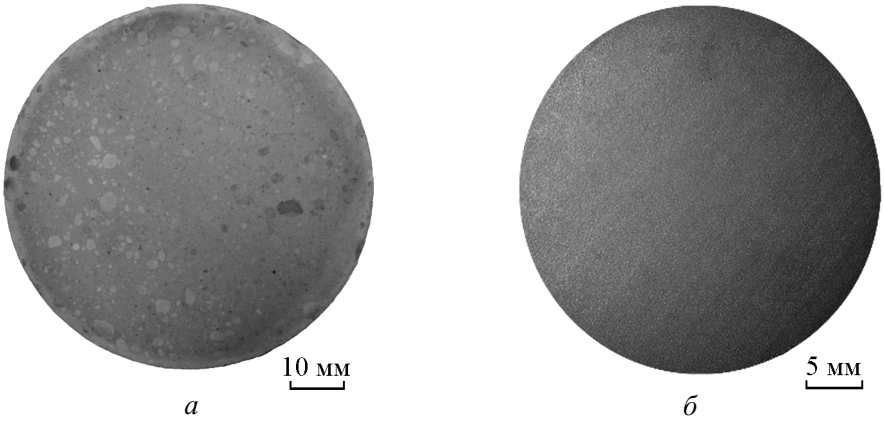


Рис. 2. Образецы, полученные при температурах спекания, °С: *а* — 1650, *б* — 1900.

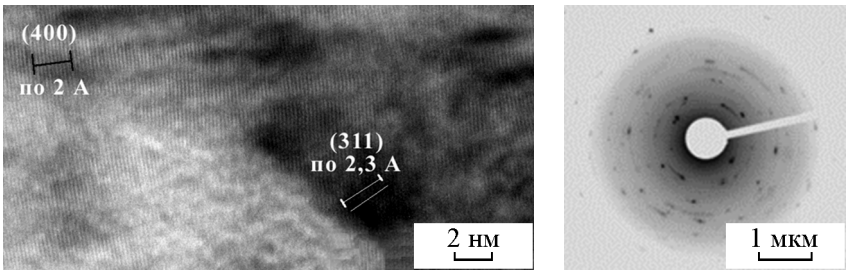


Рис. 3. Картина дифракции полученного компакта.

15 мм и диаметром 65 мм. На поверхности образца (рис. 2*а*) заметны светлые пятна размером 1 – 3 мм. После проведения процесса спекания, полученные таблетки подвергали шлифовке. В исследуемом временном интервале время выдержки существенного влияния не оказывало.

Рентгенографические исследования показали, что полученный материал представляет собой композит состава 49 % AlN – 52 % Al_2O_3, без присутствия фазы $Al_{23}O_{27}N_5$. Использование метода дифракции и анализ электронограмм, позволило установить, что в материале присутствуют две фазы типа Al – N – O,

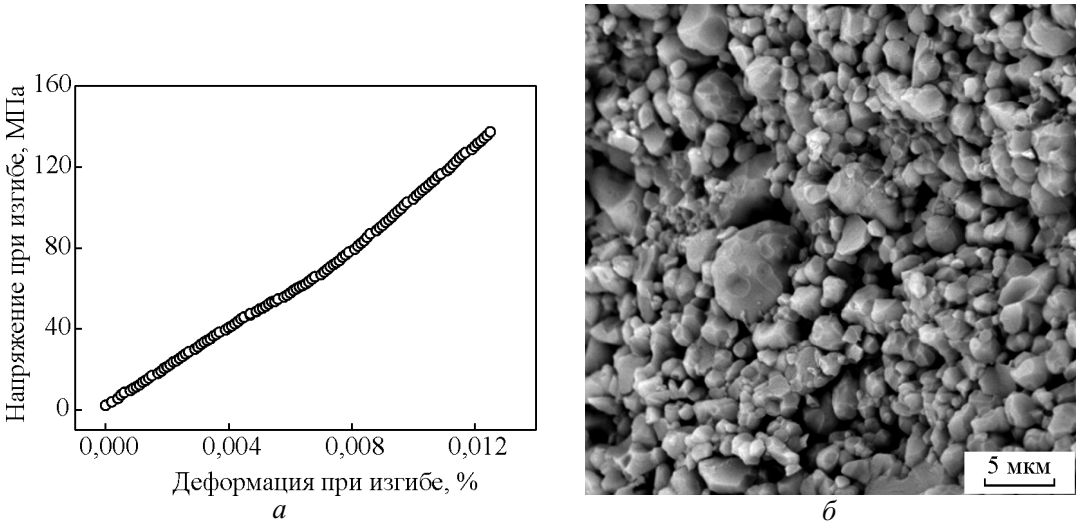


Рис. 4. Исследование разрушения при 3-х точечном изгибе: *а* — кривая разрушения; *б* — поверхность разрушения образца.

одна из которых соответствует аналогу $Al_{23}O_{27}N_5$ – $Al_{28}O_{35}N_5$ в кристаллической и аморфной форме (рис. 3). Исходя из этого можно сделать вывод, что процесс синтеза $Al_{23}O_{27}N_5$ при указываемом в литературе значении температуры 1700 °С только начинается, а для его завершения требуются более высокая температура, которая позволяет также значительно снизить пористость.

Образцы, полученные при температуре ~ 1700 °С показали неплохие механические свойства: предел прочности на изгиб — $\sigma_и$ = 122,13 ± 13,37 МПа, среднее значение критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} — 4,02 ± 0,37 МПа·м$^{1/2}$, значения микротвердости — $H_□$ = 700 – 1200 (рис. 4*а*). При сравнении полученных значений с показателями, обычно приводимыми для керамики типа AlON, то оказывается, что полученный материал в 2 – 2,4 раза превосходит его по значениям K_{IC}, сопоставим с ним по твердости и примерно в 2 раза уступает по прочности на изгиб. Негативное влияние на разброс механических свойств и их уровень оказывает наличие пористости, обнаруженное методом СЭМ. Исследование поверхности разрушения образцов рис. 4*б* показало относительно большой разброс в размерах кристаллитов (1 – 5 мкм), а также наличие в материале пор.

Компакты, полученные при спекании порошков оксида и нитрида алюминия, при температурах 1650 – 1700 °С, показали высокий уровень механических характеристик. Для исключения выявленных недостатков проведен ряд дополнительных спеканий при повышенных температурах.

Увеличение температуры спекания до 1900 °С приводит к повышению переноса углерода в образец. Образцы, полученные в результате спекания при этих температурах, имели темный цвет (рис. 2*б*), что связано с наличием в них углерода. Применение обмазки, предотвращает прямую диффузию в твердой фазе углерода из графитовых пресс-форм в образцы, но не позволяет устранить диффузию через газовую фазу.

Выводы

Подтверждена возможность получения компактов из смеси порошков Al_2O_3 и AlN, полученных плазмохимическим синтезом, с активацией процесса спекания давлением. Важным преимуществом рассмотренного подхода является высокая производительность метода плазмохимического синтеза, что может иметь большое значение в последующем при организации серийного производства керамики на основе $Al_{23}O_{27}N_5$.

Необходимо проведение дальнейших исследований в направлении устранения из технологии присутствия углерода в вакуумной камере, и замены активации процесса спекания давлением на другие (повышения температуры спекания до 2000 – 2100 °С, внедрение ступенчатых режимов спекания, использование специальных добавок, подача технологических газов в камеру и др.), что позволит добиться получения изделий сложной формы с необходимыми характеристиками.

Исследования поддержаны грантом РФФИ 16-08-00815 А.

Литература

1. Опарина И.Б., Колмаков А.Г., Луковкин Г.М., Аржаков М.С., Жирнов А.Е., Севастьянов М.А., Баранов Е.Е., Антипов В.И., Виноградов Л.В., Быков П.А. Новый композиционный материал с фрактальной структурой на основе полимерной матрицы с наноструктурными микрочастицами ZrO_2. Материаловедение, 2011, № 8, с. 51 – 56.
2. Галахов А.В., Виноградов Л.В., Антипов В.И., Колмаков А.Г., Баранов Е.Е., Лазарев Э.М., Гордеев А.С., Аладьев Н.А., Мухина Ю.Э. Наноструктурированные аэрозольные порошки алюмоиттриевого граната для лазерной поликристаллической керамики. Перспективные материалы, 2009, № 3, с. 33 – 37.
3. Kolmakov A.G., Oparina I.B., Sevoctyanov M.A., Arzhakov M.S., Lukovkin G.M. Composite based on polymethylmethacrylate with fractal clusters of ZrO_2 particles. Eurasian Physical Technical Journal, 2015, v. 12, no. 2(24), p. 33 – 36.
4. Arzhakov M.S., Zhirnov A.E., Arzhakov S.A., Lukovkin G.M., Kolmakov A.G., Zabolotnyi V.T. Glass ceramic and polymer impact-resistant materials and protective constructions based on them. Russian Metallurgy (Metally), 2015, no. 10, p. 800 – 804.
5. Аржаков М.С., Луковкин Г.М., Колмаков А.Г., Аржаков С.А., Жирнов А.Е., Парфенов А.А. Прозрачные ударостойкие композиционные материалы с ортогональным распределением элементов и защитные конструкции на их основе. Интеграл, 2015, № 1, 2 (81 – 82), с. 50 – 53.
6. Колмаков А.Г., Антипов В.И., Цветков Ю.В., Самохин А.В., Щербаков А.В., Просвирнин Д.В., Алексеев Н.В., Аникин В.Н., Вепринцев К.В., Баранов Е.Е., Куфтырев Р.Ю., Виноградов Л.В., Лещинская К.В. Оценка возможных подходов к синтезу оксинитрида алюминия. Интергал, 2014, № 2, 3 (75 – 76), с. 18 – 21.
7. Грибченкова Н.А. , Береснев Э.Н., Сморчков К.Г., Михайлов М.А., Щербаков А.В., Иванова Т.А., Алиханян А.С. Синтез и термические свойства “Алона”. Журнал неорганической химии, 2015, т. 60, № 9, с. 1247 – 1253.

8. Willems H.X., Hendrix M.M.R.M., de With G., Metselaar R. Thermodynamics of alon II: phase relations. Journal of the European Ceramic Society, 1992, v. 10, iss. 4, p. 339 – 346.
9. Yawei L., Nan L., Runzhang Y. Effect of raw materials on carbothermal reduction synthesis of g-aluminum oxynitride spinel powder. Journal of materials science, 1999, v. 34, p. 2547 – 2552
10. Bandyopadhyay S., Rixecker G., Aldinger F., Pal S., Mukherjee K., Maiti H.S. Effect of Reaction Parameters on γ-AlON Formation from Al_2O_3 and AlN. Journal of the American Ceramic Society, 2002, v. 85, p. 1010 – 1012.
11. Yongting Zheng, Hongbo Li, Wei Zhou et al., Combustion synthesis and characteristics of aluminum oxynitride ceramic foams, Ceramics International, v. 38, iss. 6, August 2012, p. 5139-5144.
12. Антипов В.И., Баранов Е.Е., Галахов А.В., Виноградов Л.В., Колмаков А.Г., Просвирнин Д.В., Клименко С.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л. Жидкофазный синтез порошка оксинитрида алюминия с использованием органических соединений. Сборник научных трудов “Порошковая металлургия”, 2014, вып. 37, с. 89 – 92.
13. Тарасов А.Г., Горшков В.А., Юхвид В.И. Получение литых оксинитридов алюминия (AlON) в режиме фронтального горения. Тезисы четвертой всероссийской школы-семинара по структурной макрокинетике для молодых ученых. Черноголовка, 22 – 24 ноября 2006, с. 72 – 73.
14. Чаплина Е.В., Дитц А.А., Громов А.А., Митина Н.А. Спекание оксинитридной керамики из шихты, полученной самораспростаняющимся высокотемпературным синтезом. Известия вузов. Физика, 2011, т. 54, № 11/3, с. 283 – 287.
15. Zheng J. Bertil Forslund Carbothermal synthesis of Aluminium Oxynitride (ALON) powder: Influence of starting materials and synthesis parameters Journal of the European Ceramic Society, 1995, v. 15, iss. 11, p. 1087 – 1100.
16. Галахов А.В., Зеленский В.А., Виноградов JI.В., Антипов В.И., Алымов М.И. Синтез оксинитрида алюминия из исходных органических соединений. Новые огнеупоры, 2012, № 8, с. 56 – 59.
17. Zientara D., Bucko M.M., Lis J. Alon-based materials prepared by SHS technique Journal of the European Ceramic Society, 2007, v. 27, iss. 2 – 3, p. 775 – 779.
18. Yingchun Shana, Jianxin Xu, Guang Wang, Xiannian Sun, Guanghua Liu, Jiujun Xua, Jiangtao Li. A fast pressureless sintering method for transparent AlON ceramics by using a bimodal particle size distribution powder. Ceramics International, 2015, v. 41, p. 3992 – 3998.
19. Weifang Miao. Method for manufacturing aluminum oxynitride (ALON) powder and other nitrogen-containing powders. US Patent 6955798 B2, Int. Cl.[7] C01B 21/0.82, US Cl. 423/385, 2005.
20. McCauley J., Patel P., Chen M. et al. AlON: A Brief history of its emergence and evolution. Journal of the Europe Ceramic Society, 2009, v. 29, p. 223 – 236.
21. Akhmadullinaa N.S., Lysenkov A.S., Ashmarin A.A., Baranchikov A.E., Ishchenko A.V., YagodinV.V., Shul’gin B.V., Kargina Yu.F. Synthesis and luminescence properties of Eu2+- and Ce3+-doped AlONs. Ceramics International, 2016, v. 42, iss. 1, p. 286 – 293.
22. Miller L., Kaplan W. Solubility Limits of La and Y in aluminum oxynitride at 1870 °C. Journal of the American Ceramic Society, 2008, v. 91, p. 1693 – 1696.
23. Mingyi Su, Youfu Zhou, Kun Wang, Zhangfu Yang, Yongge Cao, Maochun Hong. Highly transparent AlON sintered from powder synthesized by direct nitridation. Journal of the European Ceramic Society, 2015, v. 35, p. 1173 – 1178.
24. Feng Chen, Fang Zhang, Jun Wang, Hailong Zhang, Run Tian, Zhao Zhang, Shiwei Wang. Hot isostatic pressing of transparent AlON ceramics with Y_2O_3/La_2O_3 additives. Journal of Alloys and Compounds, 2015, v. 650, p. 753 – 757.
25. Kong L.B., Huang Y.Z., Que W.X., Zhang T.S., Li S., Zhang J., Dong Z.L., Tang D.Y. Transparent Ceramics, Transparent Ceramics, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
26. Алексеев Н.В., Самохин А.В., Куркин Е.Н., Агафонов К.Н., Цветков Ю.В. Синтез наночастиц оксида алюминия при окислении металла в потоках термической плазмы. Физика и химия обработки материалов, 1997, № 3, с. 33 – 39.
27. Алексеев Н.В., Самохин А.В., Цветков Ю.В. Плазменная установка для получения нанопорошков. Патент РФ № 2311225. МПК B 01 J 19/00. 27.11.2007.

References

1. Oparina I.B., Kolmakov A.G., Lukovkin G.M., Arzhakov M.S., Zhirnov A.E., Sevostyanov M.A., Baranov E.E., Antipov V.I., Vinogradov L.V., Bykov P.A. Novyj kompozicionnyj material s fraktal’noj strukturoj na osnove polimernoj matricy s nanostrukturnymi mikrochasticami ZrO_2 [New composite with fractal structure based on polymer matrix with nanostructured ZrO_2 particles]. *Materialovedenie — Materials Science*, 2011, no. 8, pp. 51 – 56.
2. Galakhov A.V., Vinogradov L.V., Antipov V.I., Kolmakov A.G., Baranov E.E., Lazarev E.M., Gordeev A.S., Alad’ev N.A., Mukhina Yu.E. Nanostrukturirovannye ajerozol’nye poroshki aljumoittrievogo granata dlja lazernoj polikristallicheskoj keramiki [Nanostructure air-zole powders of aluminum-yttrium garnets for laser polycrystalline ceramics]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials* (in Rus), 2009, no. 3, pp. 33 – 37.
3. Kolmakov A.G., Oparina I.B., Sevoctyanov M.A., Arzhakov M.S., Lukovkin G.M. Composite based on polymethylmethacrylate with fractal clusters of ZrO_2 particles. Eurasian Physical Technical Journal, 2015, vol. 12, no. 2 (24), pp. 33 – 36.
4. Arzhakov M.S., Zhirnov A.E., Arzhakov S.A., Lukovkin G.M., Kolmakov A.G., Zabolotnyi V.T. Glass ceramic and polymer impact-resistant materials and protective constructions based on them. *Metally — Russian Metallurgy*, 2015, no. 10, pp. 800 – 804.
5. Arzhakov M.S., Lukovkin G.M., Kolmakov A.G., Arzhakov S.A., Zhirnov A.E., Parfenov A.A. Prozrachnye udarostojkie kompozicionnye materialy s ortogonal’nym raspredeleniem jelementov i zashhitnye konstrukcii na ih

osnove [Transparent impact-resistant composite materials with orthogonal distributed elements and protective structures based on them]. *Integral — Integral*, 2015, no. 1, 2 (81 – 82), pp. 50 – 53.
6. Kolmakov A.G., Antipov V.I., Tsvetkov Y.V., Samokhin A.V., Sherbakov A.V., Prosvirnin D.V., Alekseev N.V., Anikin V.N., Veprintsev K.V., Baranov E.E., Kuftyrev R.Y., Vinogradov L.V., Leshchynskaya K.V. Ocenka vozmozhnyh podhodov k sintezu oksinitrida aljuminija [Evaluation of the possible approaches to the synthesis of aluminum oxynitride]. *Integral — Integral*, 2014, no. 2, 3 (75 – 76), pp. 18 – 21.
7. Gribchenkova N.A., Beresnev E. N., Smorchkov K.G., Mikhaylov M.A., Sherbakov A.V., Ivanova T.A., Alikhanyan A.C. Sintez i termicheskie svojstva “Alona” [Synthesis and thermal properties of “Alon”]. *Zhurnal Neorganicheskoi Khimii — Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2015, vol. 60, no. 9, pp. 1247 – 1253.
8. Willems H.X., Hendrix M.M.R.M., de With G., Metselaar R. Thermodynamics of Alon II: Phase relations. Journal of the European Ceramic Society, 1992, vol. 10, iss. 4, pp. 339 – 346.
9. Yawei L., Nan L., Runzhang Y. Effect of raw materials on carbothermal reduction synthesis of g-aluminum oxynitride spinel powder. Journal of Materials Science, 1999, vol. 34, pp. 2547 – 2552.
10. Bandyopadhyay S., Rixecker G., Aldinger F., Pal S., Mukherjee K., Maiti H. S., Effect of reaction parameters on г-AlON formation from Al_2O_3 and AlN. Journal of the American Ceramic Society, 2002, vol. 85, pp. 1010 – 1012.
11. Yongting Zheng, Hongbo Li, Wei Zhou, Xiaonan Zhang, Guorui Ye. Combustion synthesis and characteristics of aluminum oxynitride ceramic foams. Ceramics International, 2012, vol. 38, iss. 6, pp. 5139 – 5144.
12. Antipov V.I., Baranov E.E., Galakhov A.V., Vinogradov L.V., Kolmakov A.G., Prosvirnin D.V., Klimenko S.A., Ilyshenko A.F., Heifetz M.L. Zhidkofaznyj sintez poroshka oksinitrida aljuminija s ispol’zovaniem organicheskih soedinenij [Liquid phase synthesis of aluminum oxynitride powder with organic compounds]. Collection of proceedings “Powder metallurgy” 2014, no. 37, pp. 89 – 92.
13. Tarasov A.G., Gorshkov V.A., Yuhvid V.I., Poluchenie lityh oksinitridov aljuminija (AlON) v rezhime frontal’nogo gorenija [Production of cast aluminum oxynitrides (AlON) in frontal combustion mode]. Proceedings IV All-Russian Seminar on Structural Macrocinetics, Chernogolovka, Russia, 2006, pp. 72 – 73.
14. Chaplina E.V., Ditz A.A., Gromov A.A., Mitina N.A. Spekanie oksinitridnoj keramiki iz shihty, poluchennoj samorasprostanjajushhimsja vysokotemperaturnym sintezom [Sintering of oxidynitride ceramics from the batch obtained by self-propagating high-temperature synthesis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Fizika — Russian Physics Journal*, 2011, vol. 54, no. 11/3, pp. 283 – 287.
15. Zheng J. Bertil Forslund. Carbothermal synthesis of aluminium oxynitride (ALON) powder: Influence of starting materials and synthesis parameters. Journal of the European Ceramic Society, 1995, vol. 15, iss. 11, pp. 1087 – 1100.
16. Galakhov A.V., Zelensky V.A., Vinogradov L.V., Antipov V.I., Alymov M.I. Sintez oksinitrida aljuminija iz ishodnyh organicheskih soedinenij [Synthesis of aluminum oxynitride from starter organic compounds]. *Novye ogneupory — New refractory materials*, 2012, no. 8, pp. 56 – 59.
17. Zientara D., Bucko M.M., Lis J. Alon-based materials prepared by SHS technique. Journal of the European Ceramic Society, 2007, vol. 27, iss. 2 – 3, pp. 775 – 779.
18. Yingchun Shana, Jianxin Xu, Guang Wang, Xiannian Sun, Guanghua Liu, Jiujun Xua, Jiangtao Li. A fast pressureless sintering method for transparent AlON ceramics by using a bimodal particle size distribution powder. Ceramics International, 2015, vol. 41, pp. 3992 – 3998.
19. Weifang Miao, Method for manufacturing aluminum oxynitride (ALON) powder and other nitrogen-containing powders. Patent US 6955798 B2, Int. Cl.[7] C01B 21/0.82, US Cl. 423/385, 2005.
20. McCauley J., Patel P., Chen M. et al. AlON: A brief history of its emergence and evolution. J. Eur. Ceram. Soc., 2009, vol. 29, pp. 223 – 236.
21. Akhmadullinaa N.S., Lysenkov A.S., Ashmarin A.A., Baranchikov A.E., Ishchenko A.V., Yagodin V.V., Shul’gin B.V., Kargina Yu.F. Synthesis and luminescence properties of Eu2+- and Ce3+-doped AlONs. Ceramics International, 2016, vol. 42, iss. 1, pp. 286 – 293.
22. Miller L., Kaplan W. Solubility Limits of La and Y in Aluminum Oxynitride at 1870°C. Journal of the American Ceramic Society, 2008, vol. 91, pp. 1693 – 1696.
23. Mingyi Su, Youfu Zhou, Kun Wang, Zhangfu Yang, Yongge Cao, Maochun Hong, Highly transparent AlON sintered from powder synthesized by direct nitridation. Journal of the European Ceramic Society, 2015, vol. 35, pp. 1173 – 1178.
24. Feng Chen, Fang Zhang, Jun Wang, Hailong Zhang, Run Tian, Zhao Zhang, Shiwei Wang, Hot isostatic pressing of transparent AlON ceramics with Y_2O_3/La_2O_3 additives. Journal of Alloys and Compounds, 2015, vol. 650, pp. 753 – 757.
25. Kong L.B., Huang Y.Z., Que W.X., Zhang T.S., Li S., Zhang J., Dong Z.L., Tang D.Y. Transparent Ceramics, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
26. Alekseev N.V., Samokhin A.V., Kurkin E.N., Agafonov K.N., Tsvetkov Y.V. Sintez nanochastic oksida aljuminija pri okislenii metalla v potokah termicheskoj plazmy [Synthesis of the aluminum oxide nanoparticles under metal oxidation in the thermal plasma flow]. *Fizika i himija obrabotki materialov — The physics and chemistry of materials treatment* (in Russ), 1997, no. 3, pp. 33 – 39.
27. Alekseev N.V., Samokhin A.V., Tsvetkov Y.V. *Plazmennaya ustanovka dlya polucheniya nanoporoshkov* [Plasma plant for producing nanopowders]. Patent RF no. 2311225, MPK V 01 J 19/00, 27.11.2007.

Статья поступила в редакцию 22.09.2016 г.

Колмаков Алексей Георгиевич *— Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), доктор технических наук, заместитель директора Института по научной работе, специалист в области фундаментальных основ создания новых металлических, керамических и композиционных материалов, разработки новых конструкционных материалов и покрытий. E-mail: kolmakov@imet.ac.ru.*

Просвирнин Дмитрий Викторович *— Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области фундаментальных основ создания новых металлических, керамических и композиционных материалов, разрушения деформируемых тел, кинетики и динамики. E-mail: imetran@yandex.ru; mail@imetran.ru.*

Алиханян Андрей Сосович *— ФБГУН "Институт общей и неорганической химии им. Н,С, Курнакова РАН" (119991, г. Москва, Ленинский просп., 31), доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области химической термодинамики, физической химии поверхности и межфазных границ, адсорбции физических методов исследования стоения и термодинамики неорганических соединений. E-mail: alikhan@igic.ras.ru.*

Копиев Григорий Витальевич *— Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), инженер-исследователь, специалист в области фундаментальных основ создания новых металлических, керамических и композиционных материалов, разрушения деформируемых тел, кинетики и динамики. E-mail: saarler@gmail.com.*

Самохин Андрей Владимирович *— Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (г. Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области порошковой металлургии, плазменных процессов в металлургии и обработки металлов.*

Антипов Валерий Иванович *— Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области фундаментальных основ создания новых металлических, керамических и композиционных материалов конструкционного назначения.*

Черный Вадим Анатольевич *— ОАО "НИИ стали" (г. Москва, 127411, ул. Дубнинская, 81А), кандидат технических наук, специалист в области прочности, живучести и разрушения материалов и конструкций.*

Synthesis of Al – O – N composite material

A. G. Kolmakov, D. V. Prosvirnin, A. S. Alikhanyan, G. V. Kopiev, A. V. Samokhin, V. I. Antipov, V. A. Chorny

The analysis of technologies for the synthesis of aluminum oxynitride was performed. Al_2O_3 and AlN powdres were produced by plasma-chemical synthesis. Ceramic specimens were prepared with different pressuring options. Results of the research of the ceramics made of Al_2O_3 and AlN powders are represented in this paper. Obtained materials were exposed to structural analysis, their strength and deformation properties were assessed. Comparison of the obtained values with the known data for ALON ceramics shown, that produced material has 2 – 2,4 times higher KIC value, comparable hardness and 2 times weaker bending toughness value. Prospects of manufacturing methodics of the transparent aluminium oxynitride ceramics used in this research were evaluated.

Keywords: Aluminum oxynitride, mechanical properties, strength, shock resistant transparent ceramics, hot pressuring.

Kolmakov Alexey *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky ave, 49), Dr Sci (Eng), Deputy director, expert in fundamental basics for development of new metal, ceramic and composite materials, strength, vitality and fracture of materials and structures on science. E-mail: kolmakov@imet.ac.ru.*

Prosvirnin Dmitry *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky ave, 49), PhD (Eng), senior researcher, specialist in fundamental basis for development of new metal, ceramic and composite materials, destruction kinematics and dynamics. E-mail: imetran@yandex.ru.*

Alikhanyan Andrey *— Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences (Moscow, 117901, Leninsky ave, 31), DrSci (Chem), professor, head of laboratory, expert in chemical thermodynamics, physical chemistry of surfaces, adsorption. E-mail: alikhan@igic.ras.ru.*

Kopiev Grigory *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky ave, 49), research engineer, specialist in destruction of deformable bodies, kinematics and dynamics. E-mail: saarler@gmail.com.*

Samokhin Andrey *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky ave, 49), PhD (Eng), leading researcher, expert in powder metallurgy, plasma processes in metallurgy and metal processing.*

Antipov Valery *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky ave, 49), PhD (Eng), leading researcher, expert in fundamental basis for development of new metal, ceramic and composite materials.*

Chorny Vadim *— JSC Research Institute of Steel (Moscow, 127411, Dubninskaya str., 81A), PhD (Eng), expert in strength, vitality and fracture of materials and structures.*