

Разработка жаропрочного алюминиевого композита с малыми добавками нановолокон оксида алюминия (Nafen™)

Л. Е. Агуреев, И. Н. Лаптев, Б. С. Иванов, А. И. Канушкин,
В. И. Костиков, Р. Н. Ризаханов, Ж. В. Еремеева, А. А. Ашмарин,
А. В. Иванов, Е. А. Высотина, Г. В. Панасова

Рассмотрена разработка алюминиевого композита с матрицей из смеси порошков алюминия, никеля, меди и бора, упрочнённого 0,01 – 0,1 масс. % нановолокон оксида алюминия (Nafen™). Для получения образцов композитов использовали метод классической порошковой металлургии, включающей прессование и спекание в вакуумной печи. Приведены данные анализа микроструктуры и тонкой структуры алюмокомпозитов, среднего размера зёрен, плотности, фазового состава, микротвёрдости по Виккерсу, предела прочности на изгиб при комнатной температуре и при 300 °С. По результатам рентгеновской дифрактометрии в образцах присутствуют фазы Al, Al₃Ni, CuAl₂, Al₇Cu₂₃Ni и Ni₄B₃. Отмечено, что с увеличением концентрации нановолокон оксида алюминия микротвёрдость также монотонно возрастает. Установлено, что при комнатной температуре испытаний, образцы, содержащие 0,01 – 0,1 масс. % нановолокон оксида алюминия имели прочность выше в среднем на 30 %, чем матрица. При испытаниях при 300 °С лучший результат показал образец с 0,01 масс. % наночастиц, прочность которого была на 14 % выше прочности матрицы.

Ключевые слова: алюмокомпозит, порошковая металлургия, нановолокна оксида алюминия.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-3-5-13

Введение

Разработка новых алюминиевых материалов, обладающих низкой массой, высокой жаропрочностью при умеренных температурах и высокой коррозионной стойкостью является одной из важнейших задач современной металлургии и ракетно-космической промышленности [1 – 5]. Для обеспечения высокого уровня функциональных свойств помимо легирующих компонентов в алюминий вводят дисперсные добавки наноразмерного масштаба [6 – 8]. Ранее был проведен целый ряд исследовательских работ в России и за рубежом по упрочнению алюминия и его сплавов различного состава малыми добавками наночастиц тугоплавких соединений [9 – 15]. Подтверждено, что ввод таких частиц в металлическую матрицу позволяет: измельчить зерно, препятствовать движению

фронта дислокаций, упрочнять металл по механизму двойных границ зерен, тормозить ползучесть по границам зерен, препятствовать диффузии молекул окислителя, адсорбируя его на своей поверхности. Для повышения жаропрочности алюминия в него добавляют такие элементы, как медь, никель, бор и др.

Цель настоящей работы — разработка алюминиевых композиционных материалов системы Al – Ni – Cu – B – нановолокна Al₂O₃ (Nafen™), а также исследование их структуры, фазового состава и механических свойств, в том числе при повышенной температуре.

Материалы и методы исследований

В работе были получены материалы на основе алюминия Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 B – Nafen™

(Nf) методом вакуумного спекания. В качестве матрицы применяли порошок алюминия марки АСД-4 (4 мкм, 99,5 %), для легирования — порошок никеля ПНК-УТЗ (20 мкм, 99,9 %), порошок меди ПМУ (7 мкм, 99,5 %), порошок бора (50 мкм, 94 %), для упрочнения матрицы использовали нановолокна оксида алюминия типа Nafen™ [16]. Рассев матричных порошков проводили в вибросите, сушку порошков осуществляли на воздухе при 60 °С, смешение выполняли в планетарной мельнице со стальными шарами (5 мм) в течение 15 мин в присутствии поверхностно активных веществ (ПАВ). Наночастицы Nafen™ вводили в матрицу при воздействии ультразвука в жидкости, одновременно проводя размешивание с помощью верхнеприводной мешалки. Ультразвуковое диспергирование наночастиц проводили с соотношением количества наночастицы/растворитель = 1/1000 в 200 мл колбах с использованием гомогенизатора UPS Bandelin мощностью 400 Вт.

Получены алюминиевые композиционные материалы с матрицей Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 B, модифицированные 0,01 – 0,1 масс. % Nafen™, спрессованные при 40 МПа и спечённые в вакуумной печи при температуре 570 – 620 °С в течение 120 мин при давлении 0,133 Па. Образцы имели цилиндрическую форму высотой 5 мм и диаметром 60 мм.

Микроструктуру образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta FEG 600. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре PanAnalytical. Тонкую структуру анализировали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 фирмы “JEOL” (НИТУ “МИСиС”). Плотность изучали гидростатическим методом. Микротвёрдость по Виккерсу оценивали на твердомере Micromet 5114. Предел прочности определяли методом трёхточечного изгиба на универсальной установке для механических испытаний TestSystems-ВакЭто при комнатной температуре и при 300 °С.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показан образец порошка шихты Al – Ni – Cu – B после смешения в планетарной мельнице. Смесь представляет собой частицы менее 20 мкм в диаметре сферической или неправильной обтекаемой формы.

Как следует из результатов РФА (рис. 2) в образце присутствует основная фаза Al, а также фазы Al₃Ni, CuAl₂, Al₇Cu₂₃Ni и Ni₄B₃ [17 – 19].

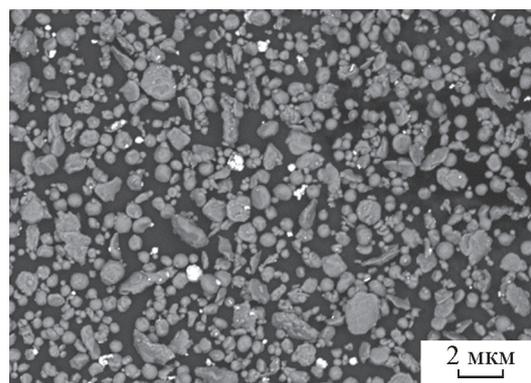


Рис. 1. СЭМ-изображение порошка шихты Al – Ni – Cu – B.

Fig. 1. SEM image Al – Ni – Cu – B mix of powders.

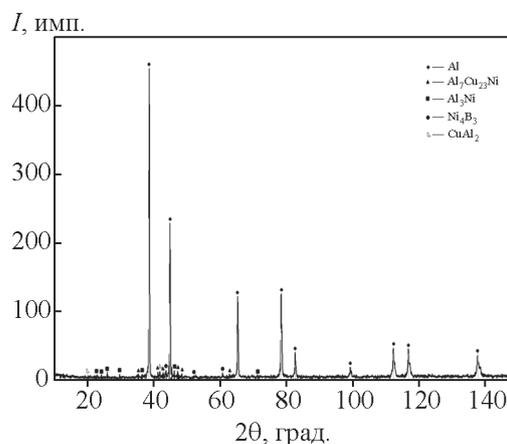


Рис. 2. РФА анализ алюмокомпозита системы Al – Ni – Cu – B: Al — $a = 4,049 \text{ \AA}$, ОКР = 490 Å.

Fig. 2. X-ray diffraction analysis of an aluminum composite of the Al – Ni – Cu – B system: Al — $a = 4.049 \text{ \AA}$; CSR = 490 Å.

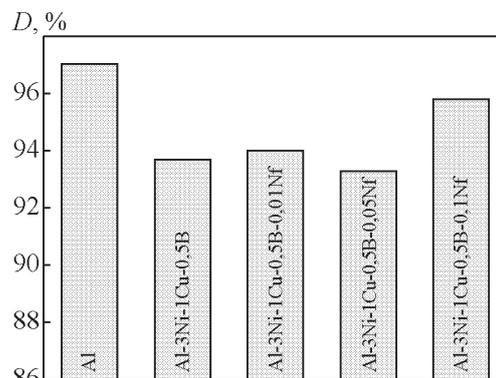


Рис. 3. Зависимость относительной плотности образцов от состава.

Fig. 3. Dependence of the relative density of the samples on the composition.

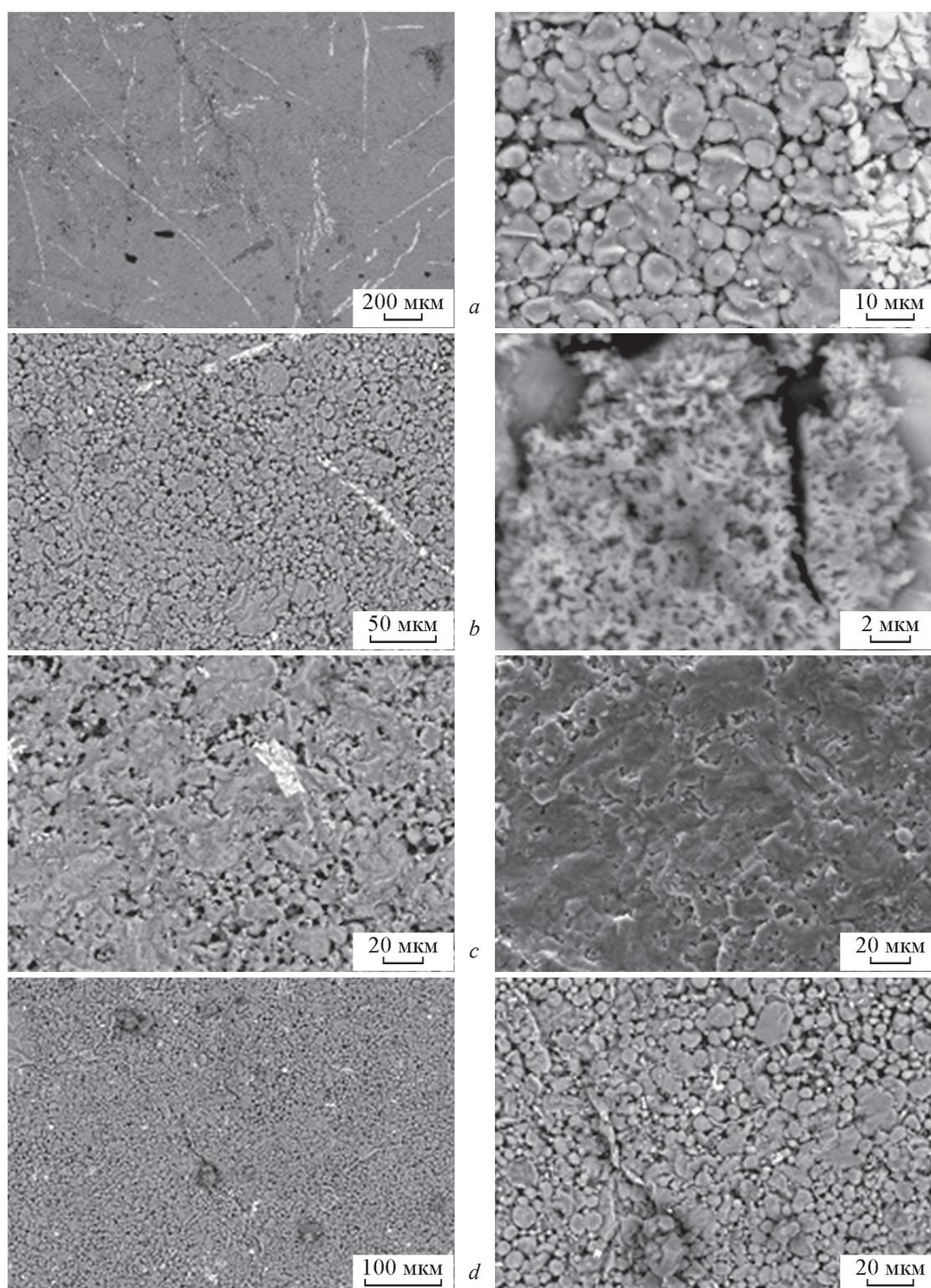


Рис. 4. СЭМ изображения микроструктуры образцов полученных алюмокомпозитов: *a* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 B, *b* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 B – 0,01 NafenTM, *c* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 B – 0,05 NafenTM, *d* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 B – 0,1 NafenTM.

Fig. 4. SEM images of the Microstructure of aluminum composites samples: *a* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0.5 B, *b* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0.5 B – 0.01 NafenTM, *c* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0.5 B – 0.05 NafenTM, *d* — Al – 3 Ni – 1 Cu – 0.5 B – 0.1 NafenTM.

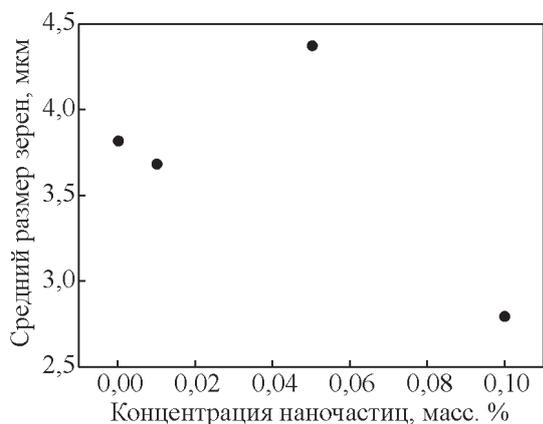


Рис. 5. Зависимость среднего размера зерна алюмоком-
позитов от содержания NafenTM.

Fig. 5. Dependence of average grain size of aluminum compos-
ites on the NafenTM content.

Зависимость относительной плотности от состава материалов представлена на рис. 3, из которого видно, что образцы матричного состава без наночастиц, а также, содержащие 0,01 и 0,05 масс. % наночастиц, имели меньшую плотность, чем просто спечённый алюминий или образец с 0,1 масс. % нановолокон. Возможно, это происходит из-за присутствия препятствий для диффузии в виде новых фаз, по сравнению с чистым алюминием, а также меньшего количества дефектов, по сравнению с образцом с 0,1 масс. % наночастиц на начальном этапе спекания.

На рис. 4а–4д представлены СЭМ-изображения микроструктуры образцов Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 В – (0 – 0,1) NafenTM. На снимках видны белые нитевидные фазы CuAl₂. С увеличением содержания

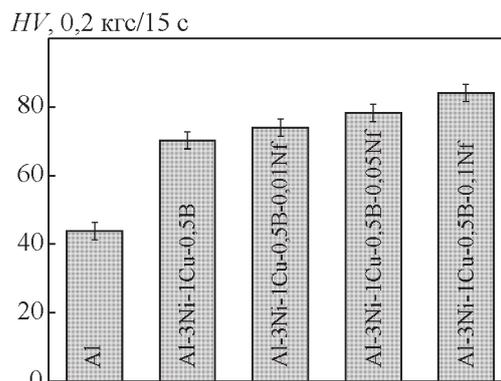


Рис. 7. Микротвёрдость по Виккерсу композитов, полу-
ченных по рассматриваемой технологии.

Fig. 7. Vickers microhardness of composites obtained by
considered technology.

NafenTM количество и длина этих образований существенно уменьшается, исходя из визуального анализа снимков. Во всех образцах зёрна имеют сферическую и близкую к сферической форму и равномерное распределение. Однако, для образца с 0,05 масс. % NafenTM имела место существенная коагуляция зёрен. Внутри зёрен видны серо-белые образования фазы θ' -CuAl₂. На рис. 4д видно, что на микроструктуре образца Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 В – 0,01 NafenTM частица сформировавшейся никель-содержащей фазы имеет несколько выщербленную структуру.

Средний размер зёрен в композитах Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 В – NafenTM определяли методом секущих. График зависимости среднего размера зёрен от количества NafenTM представлен на рис. 5.

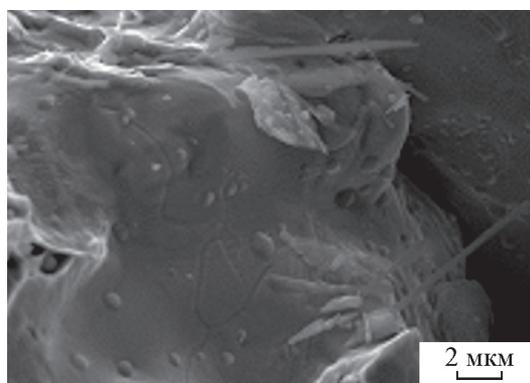
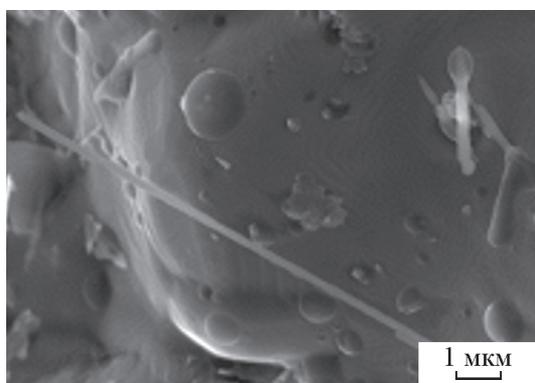


Рис. 6. Тонкая структура образца системы Al – Ni – Cu – В с нановолокнами NafenTM.

Fig. 6. Fine structure of sample of the Al – Ni – Cu – В system with NafenTM nanofibres.

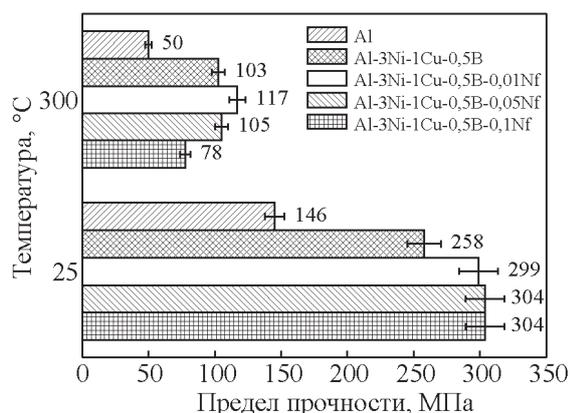


Рис. 8. Предел прочности на изгиб при 25 и 300 °C композитов.

Fig. 8. Bending strength at 25 and 300 °C of composites.

Диаметр зёрен чистого алюминия, спечённого по рассматриваемой технологии, составил 60 мкм.

На рис. 6 представлена тонкая структура алюмокомпозита с Nafen™. Видны сферические выделения фаз системы Cu – Al и нановолокна Nafen™.

На рис. 7 показана зависимость микротвёрдости по Виккерсу полученных алюминиевых материалов, в том числе модифицированных Nafen™. Отмечено, что с увеличением концентрации Nafen™ микротвёрдость также монотонно возрастает.

Обнаружено сильное влияние Nafen™ на прочность спечённых образцов алюмокомпозитов (рис. 8). Так, при комнатной температуре испытаний прочность модифицированных образцов повысилась в среднем на 30 %, а прочность при 300 °C — на 5 – 30 %, кроме образца с 0,1 масс. % Nafen™, для которого происходило снижение прочности, возможно из-за высокой концентрации Nafen™ и его неравномерного распределения в матрице, а также высокой адгезионной повреждённости контактов между волокном и матрицей.

Прочность алюмокомпозита после спекания без дополнительной термообработки и мехобработки состава Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 В – 0,01 Nafen™ при 300 °C близка к аналогичной характеристике деформируемого жаропрочного алюминиевого сплава Al2618-T61 [20], при этом плотность композита меньше плотности сплава на 5 – 6 %.

Работа выполнена в рамках СЧ НИР “Технология-СГ-Нанопорошок” по контракту с ФГУП “НПО “Техномаш” № 530-И/02-18 от 05.07.2018.

Выводы

Методом классической порошковой металлургии (прессование, вакуумное спекание) созданы образцы алюмокомпозитов состава Al – 3 Ni – 1 Cu – 0,5 В (масс. %) с добавками 0,01 – 0,1 масс. % нановолокон оксида алюминия Nafen™. По результатам рентгеновской дифрактометрии в образцах присутствуют фазы Al, Al₃Ni, CuAl₂, Al₇Cu₂₃Ni и Ni₄B₃.

Отмечено, что добавки Nafen™ в количестве 0,1 масс. % заметно снижают размер зерна матрицы и повышают микротвёрдость с 70 до 82 НВ.

В результате исследования прочности на изгиб установлено, что при комнатной температуре испытаний образцы, содержащие 0,01 – 0,1 масс. % Nafen™ имели прочность выше в среднем на 30 %, чем матрица. Однако, при испытаниях при 300 °C лучший результат показал образец с 0,01 масс. % наночастиц, прочность которого была на 14 % выше прочности матрицы.

Литература

1. Полмеар Я. Лёгкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. М.: Техносфера, 2008, 464 с.
2. Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г. Сплав 1570с — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК “Энергия”. Космическая техника и технологии, 2014, № 4 (7), с. 62 – 67.
3. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: СамГТУ, 2013, 81 с.
4. Берлин А.А., Ассовский И.Г. Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007, 456 с.
5. Денисова Э.И., Карташов В.В., Рычков В.Н. Прикладное материаловедение: Металлы и сплавы. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018, 216 с.
6. Агуреев Л.Е., Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Бармин А.А., Ризаханов Р.Н., Иванов Б.С., Ашмарин А.А., Лаптев И.Н., Рудштейн Р.И. Порошковые алюмокомпозиты системы Al – Cu с микродобавками оксидных наночастиц. Перспективные материалы, 2016 № 5, с. 18 – 24.
7. Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Миронов В.В., Агуреев Л.Е. Влияние малых добавок наночастиц оксида алюминия на прочностные характеристики алюминиевого материала. Доклады Академии наук. 2018, т. 481, № 5, с. 510 – 512.
8. Костиков В.И., Агуреев Л.Е., Еремеева Ж.В. Разработка упрочненных наночастицами алюмокомпозитов для ракетно-космической техники. Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2014, № 1, с. 35 – 38.

9. Агуреев Л.Е., Иванов Б.С., Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Агеев Е.В., Лаптев И.Н., Савушкина С.В., Рудштейн Р.И., Бармин А.А., Канушкин А.И., Ашмарин А.А. Разработка алюмокомпозитов, легированных микропорошками меди или магния, с малыми добавками оксидных наночастиц. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технология. 2016, № 3, т. 20, с. 9 – 20.
10. Агуреев Л.Е., Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Ашмарин А.А., Рудштейн Р.И. Разработка алюмокомпозитов с малыми добавками наночастиц керамик. *Металлург*, 2016, № 4, с. 92 – 99.
11. Lurie S., Volkov-Bogorodskiy D., Solyaev Y., Rizahanov R., Agureev L. Multiscale modelling of aluminium-based metal-matrix composites with oxide nanoinclusions. *Computational Materials Science*. 2016, v. 116, p. 62 – 73.
12. Миронов В.В., Агуреев Л.Е., Еремеева Ж.В., Костиков В.И. Повышение прочностных свойств алюминиевых порошковых материалов добавками наночастиц оксида магния. Доклады Академии наук. 2019, т. 486, № 5, с. 558 – 561.
13. Sukhodaev P.O., Redkin V.E., Bogdanova T.A., Kuznetsov V.A. Influence of nanoparticles on the structure and mechanical properties of aluminium alloys. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017, v. 10(3), p. 317 – 326.
14. Roudini G., Rasti Ghahfarokhi A., Behzadmehr A. Copper laminated composites reinforced with Al₂O₃ nanoparticles by suspension method and hot pressing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, v. 201, no. 012026.
15. Суходаев П.О., Богданова Т.А., Кузнецов В.А., Редькин В.Е. Литые композиционные материалы на основе алюминия, упрочненные наночастицами. *Евразийский союз ученых*, 2014, № 4 (4), с. 117 – 120.
16. Wu H., Koo J.H. Functionalized Nafen™ alumina nanofiber reinforced Polyamide 6 nanocomposites: mechanical, thermal and flame retardant properties. *Society for the Advancement of Material and Process Engineering. SAMPE Conference Proceedings*. Baltimore, MD, May 18 – 21, 2015, 9 p.
17. Saud S.N., Hamzah. E., Abubakar T., Raheleh S., Hosseinian T. A review on influence of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of Cu – Al – Ni shape memory alloys. *Journal Technology Sciences & Engineering*, 2013, v. 64, no. 1, p. 51 – 56.
18. Adnan R.S.A., Abudlbaki M.M. Effect of Sn addition on transformation temperature and thermal properties for Cu – Al – Si shape memory alloy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, v. 454, p. 012050.
19. Gurau C., Gurau G., Fernandez F.M.B. X-ray diffraction study of the reverse martensitic transformation in Cu – Al – Ni shape memory alloy. *The annals of “Dunarea de Jos” university of Galati. Fascicle ix. Metallurgy and materials science*, 2008, no. 2, p. 37 – 40.
20. Information provided by The Aluminum Association, Inc. from Aluminum Standards and Data 2000 and/or International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys (Revised 2001). http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=f6d0bebbfc7248838243b7fa141431ba, Электронный ресурс, дата обращения 08.08.2019.

References

1. Polmear Ja. *Ljogkie splavy: ot tradicionnyh do nanokristallov* [Light alloys: from traditional to nanocrystals]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008, 464 p.
2. Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernjavskij A.G. *Splav 1570s — material dlja germetichnyh konstrukcij perspektivnyh mnogorazovyh izdelij RKK “Energija”* [Alloy 1570s is a material for pressurized structures of promising reusable products of RSC Energia]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2014, no. 4 (7), pp. 62 – 67.
3. Luc A.R., Suslina A.A. *Aljuminij i ego splavy* [Aluminum and its alloys]. Samara, SamGTU Publ., 2013, 81 p.
4. Berlin A.A., Assovskij I.G. *Perspektivnye materialy i tekhnologii dlja raketno-kosmicheskoy tehniki* [Promising materials and technologies for rocket and space technology]. Moscow, Torus Press Publ., 2007, 456 p.
5. Denisova Je.I., Kartashov V.V., Rychkov V.N. *Prikladnoye materialovedeniye: Metally i splavy: uchebnoye posobiye* [Applied materials: Metals and alloys: training manual]. Ekaterinburg, Ural Univ. Publ., 2018, 216 p.
6. Agureev, L.E., Kostikov, V.I., Yeremeyeva, Z.V. et al. Powder aluminum composites of Al–Cu system with micro-additions of oxide nanoparticles. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2016, vol. 7, no. 6, pp. 507 – 510.
7. Mironov V.V., Agureev L.E., Eremeeva Z.V., Kostikov V.I. Effect of small additions of alumina nanoparticles on the strength characteristics of an aluminum material. *Doklady Physical Chemistry*, 2018, no. 481 (2), pp. 110 – 113.
8. Kostikov V.I., Agureev L.E., Eremeeva Z.V. Development of nanoparticle-reinforced alumocomposites for rocket-space engineering. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, vol. 56, iss. 3, pp. 325 – 328.
9. Agureev L.E., Ivanov B.S., Kostikov V.I., Eremeeva Zh.V., Ageev E.V., Laptev I.N., Savushkina S.V., Rudshitejn R.I., Barmin A.A., Kanushkin A I., Ashmarin A.A. *Razrabotka aljumokompozitov, legirovannyh mikroporoshkami medi ili magnija, s malymi dobavkami oksidnyh nanochastich* [Development of aluminum composites doped with copper or magnesium micropowders with small additives of oxide nanoparticles]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya*

- Tekhnika i tekhnologii — Proceedings of Southwest State University*, 2016, no. 3 (20), pp. 9 – 20.
10. Agureev L.E., Kostikov V.I., Eremeeva Zh.V., Ashmarin A.A., Rudshtejn R.I. Razrabotka aljumokompozitov s malymi dobavkami nanochastic keramik. [Development of aluminum composites with small additives of ceramic nanoparticles]. *Metallurg — Metallurgist*, 2016, no. 4, pp. 92 – 99.
 11. Lurie S., Volkov-Bogorodskiy D., Solyaev Y., Rizahanov R., Agureev L. Multiscale modelling of aluminium-based metal-matrix composites with oxide nanoinclusions. *Computational Materials Science*, 2016, vol. 116, pp. 62 – 73
 12. Mironov V.V., Agureev L.E., Eremeeva Z.V., Kostikov V.I. Effect of small additions of alumina nanoparticles on the strength characteristics of an aluminum material. *Doklady Physical Chemistry*, 2018, vol. 481, no. 2, pp. 110 – 113.
 13. Sukhodaev P.O., Redkin V.E., Bogdanova T.A., Kuznetsov V.A. Influence of nanoparticles on the structure and mechanical properties of aluminium alloys. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, no. 10 (3), pp. 317 – 326.
 14. Roudini G., Rasti Ghahfarokhi A., Behzadmehr. Copper laminated composites reinforced with Al₂O₃ nanoparticles by suspension method and hot pressing. *IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Engin.*, 2017, vol. 201, no. 012026.
 15. Suhodaev P.O., Bogdanova T.A., Kuznecov V.A., Red'kin V.E. Liteye kompozicionnye materialy na osnove aljuminija, uprochnennye nanochasticami. [Cast Composite nanoparticle hardened aluminum materials] *Evrazijskij sojuz uchenyh*, 2014, № 4(4), s. 117 – 120.
 16. Wu H., Koo J.H. Functionalized Nafen™ alumina nanofiber reinforced Polyamide 6 nanocomposites: mechanical, thermal and flame retardant properties. *Society for the Advancement of Material and Process Engineering, SAMPE Conference Proceedings, Baltimore, MD, May 18 – 21, 2015*, 9 p.
 17. Saud S.N., Hamzah. E., Abubakar T., Raheleh S., Hosseinian T. A review on influence of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of Cu – Al – Ni shape memory alloys. *Journal Technology Sciences & Engineering*, 2013, vol. 64, no. 1, pp. 51 – 56.
 18. Adnan R.S.A., Abudlbaki M.M. Effect of Sn addition on transformation temperature and thermal properties for Cu – Al – Si shape memory alloy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 454, no. 012050.
 19. Gurau C., Gurau G., Fernandez F.M.B. X-ray diffraction study of the reverse martensitic transformation in Cu – Al – Ni shape memory alloy. *The annals of “Dunarea de Jos” university of Galati. Fascicle ix. J. of Metallurgy and materials science*, 2008, no. 2, p. 37 – 40.
 20. Information provided by The Aluminum Association, Inc. from Aluminum Standards and Data 2000 and/or International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, Revised 2001. http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=f6d0bebbfc7248838243b7fa141431ba.

*Статья поступила в редакцию — 26.08.2019 г.
после доработки — 20.11.2019 г.
принята к публикации — 22.11.2019 г.*

Агуреев Леонид Евгеньевич — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), кандидат технических наук, научный сотрудник, специалист в области композиционных материалов. E-mail: trunapo@gmail.com.

Лаптев Иван Николаевич — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), инженер, специалист в области композиционных материалов. E-mail: rvah@mail.ru.

Иванов Борис Сергеевич — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), инженер, специалист в области композиционных материалов. E-mail: ibs@live.ru.

Канушкин Андрей Игоревич — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), инженер, специалист в области композиционных материалов. E-mail: kanushkin.andrey@icloud.com.

Костиков Валерий Иванович — НИТУ “МИСиС” (119049, Москва, Ленинский проспект 6), доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, специалист в области композиционных материалов.

Ризаханов Раждун Насрединович — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), кандидат физико-математических наук, начальник отдела, специалист в области композиционных материалов. E-mail: nanocenter@kerc.msk.ru.

Еремеева Жанна Владимировна — НИТУ “МИСиС” (119049, Москва, Ленинский проспект 6), доктор технических наук, профессор, специалист в области композиционных материалов. E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Ашмарин Артём Александрович — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), кандидат технических наук, ведущий инженер, специалист в области рентгеновского анализа материалов. E-mail: ashmarin_artem@list.ru.

Иванов Андрей Владимирович — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), ведущий инженер, специалист в области порошковой металлургии.

Высотина Елена Александровна — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), инженер, специалист в области микроскопии.

Панасова Галина Васильевна — ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (125438, Москва, ул. Онежская, 8), инженер, специалист в области порошковой металлургии.

Development of heat-resistant aluminum composite with small additions of alumina nanofibres

L. E. Agureev, I. N. Laptev, B. S. Ivanov, A. I. Kanushkin, V. I. Kostikov, R. N. Rizakhanov, Zh. V. Eremeeva, A. A. Ashmarin, A. V. Ivanov, E. A. Vysotina, G. V. Panasova

This article presents the results of the development of an aluminum composite with a matrix of a mixture of powders of aluminum, nickel, copper and boron, hardened from 0.01 to 0.1 mass % by the alumina nanofibers (NafenTM). To obtain samples of the composites, the method of classical powder metallurgy was used, including pressing and sintering in a vacuum furnace. The data on the analysis of the microstructure and fine structure of aluminum composites, average grain size, density, phase composition, Vickers microhardness, ultimate tensile strength at bending at room temperature and at 300 °C are presented. According to the results of X-ray diffractometry, Al, Al₃Ni, CuAl₂, Al₇Cu₂₃Ni and Ni₄B₃ phases are present in the samples. It is noted that with an increase in the concentration of alumina nanofibers, the microhardness also monotonically increases. It was found that at room temperature tests samples containing 0.01 – 0.1 % of the mass. Alumina nanofibers had an average strength of 30% higher than the matrix. However, when tested at 300 °C, the best result was shown by a sample with 0.01% of the mass. nanoparticles, whose strength was 14 % higher than the strength of the matrix.

Keywords: aluminum composite, powder metallurgy, alumina nanofibres.

Agureev Leonid — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), PhD, researcher, specialist in the field of composite materials. E-mail: trynano@gmail.com.

Laptev Ivan — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), engineer, specialist in the field of composite materials. E-mail: rvah@mail.ru.

Ivanov Boris — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), engineer, specialist in the field of composite materials. E-mail: ibs@live.ru.

Kanushkin Andrey — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), engineer, specialist in the field of composite materials. Email: kanushkin.andrey@icloud.com.

Kostikov Valery — NUST “MISiS” (Moscow, 119049, Leninsky Prospekt 6), Dr. Sci., professor, corresponding member of RAS, specialist in the field of composite materials.

Rizakhanov Razhudin — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), PhD (Phys-Math), department head, specialist in the field of composite materials. E-mail: nanocenter@kerc.msk.ru.

Eremeeva Zhanna — NUST “MISiS” (Moscow, 119049, Leninsky Prospekt 6), Dr. Sci., professor, specialist in the field of composite materials. E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Ashmarin Artem — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), PhD (Eng), leading engineer. E-mail: ashmarin_artem@list.ru.

Ivanov Andrey — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), leading engineer.

Vysotina Elena — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), engineer.

Panasova Galina — State Research Center Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center” (Moscow, 125438, Onegskaya St. 8), engineer.