

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-35-42

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ БАЗИСНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ В УГЛЕРОДНОМ КАРКАСЕ И МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ СИСТЕМЫ Al–C НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

А.Н. Няфкин¹, Д.В. Косолапов¹, А.Н. Жабин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Исследованы пористый углеродный каркас и металлический композиционный материал (МКМ) на основе алюминиевого литейного сплава системы Al–Si–Cu с содержанием углерода 79 ± 2 % (объемн.), полученный методом вакуумно-компрессионной пропитки. Изучена структура МКМ, определены плотность, объемное наполнение и температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) углеродного каркаса и МКМ в диапазоне температур от 20 до 200 °С. Установлено, что в зависимости от направления базисных плоскостей значение ТКЛР в углеродном каркасе уменьшается на 30–35 %, в МКМ – на 15–20 %.

Ключевые слова: углеродный материал, литейный алюминиевый сплав, металлический композиционный материал, вакуумно-компрессионная пропитка, базисные плоскости, температурный коэффициент линейного расширения

Для цитирования: Няфкин А.Н., Косолапов Д.В., Жабин А.Н. Исследование влияния направления базисных плоскостей в углеродном каркасе и металлическом композиционном материале системы Al–C на температурный коэффициент линейного расширения // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-35-42.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DIRECTION OF THE BASAL PLANES IN A CARBON FRAME AND A METAL COMPOSITE MATERIAL OF THE Al–C SYSTEM ON THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION

A.N. Nyafkin¹, D.V. Kosolapov¹, A.N. Zhabin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. A porous carbon material and a metal composite material (MCM) based on an aluminum casting alloy of the Al–Si–Cu system containing 79 ± 2 % (vol.) carbon, obtained using the vacuum-compression impregnation technology, have been studied. A study of the structure of MCM was carried out, the density, volumetric filling and temperature coefficients of linear expansion (TCLE) of the carbon frame and MCM were measured in the temperature range from 20 to 200 °C. It has been established that depending on the direction of the basal planes, the TCLE value decreases by 30–35 % at the carbon frame and by 15–20 % at MCM.

Keywords: carbon material, cast aluminum alloy, metal composite material, vacuum-compression impregnation, basal planes, temperature coefficient of linear expansion

For citation: Nyafkin A.N., Kosolapov D.V., Zhabin A.N. Investigation of the influence of the direction of the basal planes in a carbon frame and a metal composite material of the Al–C system on the temperature coefficient of linear expansion. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-35-42.

Введение

Тенденции развития современных промышленных электронных компонентов и устройств на их основе указывают на увеличение энергопотребления и рабочей температуры, что в свою очередь требует применения эффективного охлаждения и теплоотвода. Одним из способов отведения тепла от высоконагруженных электронных компонентов является использование оснований из перспективных материалов, которые обладают улучшенными теплопроводящими свойствами наряду с пониженными значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), обеспечивающими стабильность их размеров.

В последнее время разработчики проявляют интерес к композиционным теплоотводящим материалам на основе углерода, в частности к углерод-углеродным. Они состоят из углеродного материала, усиленного углеродными волокнами, и обладают улучшенными физико-механическими свойствами по сравнению с монолитными углеродными материалами, а некоторые из них демонстрируют хорошую теплопроводность, низкий ТКЛР и высокую жесткость. Одна из областей применения данных материалов – средний слой в печатных платах для электроники, где необходимо компенсировать расширения других слоев, понижая при этом упругие напряжения связей и увеличивая рассеяние.

Основным методом производства металл-графитовых композитов является литье под давлением, в качестве металла обычно используют алюминий или медь. Медно-графитовые композиты с молибденовым покрытием получают путем химического газофазного осаждения молибдена на поверхность графита. Выбор такого способа обоснован тремя факторами:

- создается поверхность с хорошей смачиваемостью металлом-инфильтрантом;
- молибден нерастворим в меди, поэтому низкоомная исходно бескислородная медь не деградирует;
- молибденовое покрытие необходимо для создания карбидизированного интерфейса, имеющего низкое тепловое сопротивление, что важно для взаимодействия графита и металлической матрицы с оптимальными теплофизическими свойствами.

Углерод-алюминиевые композиционные материалы обладают низкой плотностью, высокими теплопроводностью, прочностью и износостойкостью, что обуславливает их применение для изготовления функциональных элементов узлов трения высокоэнергетических установок. Такие материалы можно получать как методом жидкофазного совмещения алюминиевой матрицы и углеродного пористого наполнителя, так и путем совместного горячего прессования углеродных частиц и алюминиевого порошка. При жидкофазном совмещении расплава возможно химическое взаимодействие алюминия и углерода, сопровождаемое образованием карбида алюминия и, как следствие, снижением уровня механических характеристик материала и прочности адгезионных связей на границе. При твердофазном совмещении добиться равномерного распределения алюминиевой фазы по объему углеродного наполнителя трудно. Растворимость углерода в алюминии очень мала: не превышает 0,5 % при температуре 1570–1770 К и практически отсутствует при температуре 1270–1370 К, а взаимодействие алюминия и углерода при температурах >873 К сопровождается образованием карбида алюминия [1–5]. Высокая температура в начале смачивания углеродного наполнителя алюминиевыми сплавами способствует образованию пленок оксида алюминия на поверхности жидкого металла. После удаления оксидов температура смачивания понижается до 1123–1173 К [6]. Одним из способов улучшения смачивания поверхности углеродного наполнителя считается нанесение покрытий, которые одновременно защищают

углерод от взаимодействия с алюминием. Углеродный наполнитель, покрытый никелем, при температуре 910–970 К хорошо смачивается эвтектическим алюминий-никелевым сплавом. Однако при указанной температуре проникновение расплава в межуглеродное пространство затруднено и пропитка не происходит. Эффективность процесса повышается при использовании вакуумно-компрессионной пропитки, в результате которой пористая углеродная преформа (заготовка) пропитывается расплавом алюминиевого сплава под давлением инертного газа [7–9].

За рубежом литьем под давлением расплавленного металла в пористую графитовую заготовку производят наиболее популярное семейство материалов Graphmet, являющихся ближайшими аналогами композитов системы Al–C. Материал Graphmet 350 характеризуется теплопроводностью 220–360 Вт/(м·К) (присутствует анизотропия), ТКЛР в диапазоне от $6,0 \cdot 10^{-6}$ до $8,5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ и плотностью 2,1 г/см³ [10–12]. Основным преимуществом композитов марки Graphmet 350 является низкая стоимость и простота механической обработки, основным недостатком – невысокая прочность (прочность на изгиб 30 МПа), что существенно ограничивает область их применения. Доля графита в материале Graphmet составляет ~25 %, что позволяет снизить удельную плотность и улучшить теплофизические свойства композита. Однако при механической обработке возникают определенные сложности, связанные с ламинарной структурой графита. В некоторых случаях для материала Graphmet, как и для всех алюминий-графитовых композитов, необходима защита от коррозии.

Более высокими рабочими параметрами обладают металл-графитовые композиты компании Metal Matrix Cast Composites. Повышение уровня теплопроводности и улучшение механических свойств достигаются использованием в качестве графитовой составляющей размолотых (дробленых) отожженных углеродных волокон. Теплопроводность отдельных волокон достигает 900 Вт/(м·К), что позволяет получать композиты на основе алюминия и меди с высокими теплофизическими свойствами. Композиты на основе алюминия имеют более высокие характеристики, что объясняется большей чувствительностью медной матрицы к примесям [13]. Теплоотводы компании Metal Matrix Cast Composites используют в оборудовании самолетов и спутников, мощном оборудовании для связи, продукции для военно-промышленного комплекса.

Цель данной работы – исследование влияния направления базисных плоскостей в углеродном каркасе и металлическом композиционном материале (МКМ) на основе алюминиевого литейного сплава системы Al–Si–Cu, полученном методом вакуумно-компрессионной пропитки, на ТКЛР.

Материалы и методы

Значение ТКЛР твердых тел в диапазоне температур от –180 до +1500 °С определяли с помощью относительного дилатометра по ASTM E228, ASTM E831 [14, 15] и СТП 1-595-17-374–98.

При расчете значений ТКЛР:

– истинного (физического)

$$\alpha(T_i) = (1/l_0 \cdot \partial l / \partial T) + \alpha(T_i)_{\text{изм. системы}}, \quad (1)$$

где l_0 – длина образца при начальной температуре T_0 (20 °С);

– среднего (технического) в интервале температур $\Delta T = T_i - T_0$

$$\alpha(T_i) = (1/l_0 \cdot \Delta l / \Delta T) + \alpha(\Delta T)_{\text{изм. системы}}, \quad (2)$$

где $\Delta l = l(T_i) - l(T_0)$ – изменение длины образца в интервале температур от T_0 до T_i ,

необходимо вводить поправку на значение ТКЛР материала измерительной системы: $\alpha(T_i)_{\text{изм. системы}}$ или $\alpha(\Delta T)_{\text{изм. системы}}$. Поправку предварительно определяют при калибровочном измерении стандартного образца из кварца или оксида алюминия (корунд или сапфир) для соответствующей измерительной системы. Поправку необходимо периодически обновлять ввиду изменения состава и состояния измерительной системы в процессе эксплуатации. При размещении образца между опорой и толкателем на измерительную систему устанавливают защитные тонкие вставки из кварца или оксида алюминия, что способствует уменьшению эффекта воздействия окисления образцов и диффузионных процессов при высоких температурах [16].

Индуктивный датчик состоит из катушек индуктивности, в зазоре между которыми перемещается сердечник толкателя при тепловом расширении образца. Катушки индуктивности датчика являются элементами мостовой схемы. Разбаланс моста при смещении сердечника толкателя приводит к возникновению напряжения, усиливаемого усилителем в диагонали моста. Величина напряжения при малых перемещениях пропорциональна перемещению. Сигнал, пропорциональный удлинению, в цифровой форме через аналого-цифровой преобразователь регистрируют одновременно с сигналом, пропорциональным температуре образца на компьютере.

Плотность определяют методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898–89) [17] и СТП 1-595-17-374–98 при установленной в помещении температуре, измеренной с погрешностью до ± 1 °С. Погрешность применяемых весов составляла $< 0,001$ г. Значения плотности воды при температуре от 18 до 27 °С представлены в таблице.

Плотность воды в зависимости от температуры в помещении

Температура		Плотность воды, г/см ³
К	°С	
291,0	18,0	0,9974
292,0	19,0	0,9972
293,0	20,0	0,9970
294,0	21,0	0,9968
295,0	22,0	0,9967
296,0	23,0	0,9965
297,0	24,0	0,9962
298,0	25,0	0,9960
299,0	26,0	0,9958
300,0	27,0	0,9955

Для определения плотности образец помещали в корзину и погружали в емкость с водой на глубину не менее 10–15 мм от поверхности. Следует отметить, что образование пузырьков на образце недопустимо, поэтому необходимо предварительно погрузить его в жидкость. Образец взвешивали в воде с погрешностью $\pm 0,001$ г.

Объемное содержание углерода в МКМ определяют весовым методом с предварительным растворением матрицы композиционного материала в кислоте [17, 18]. Для взвешивания используют аналитические весы. Массовое содержание углерода в МКМ рассчитывают по формуле

$$M_c = \frac{m_{\text{н.р.осадкаC}}}{m_{\text{МКМ}}} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

где $m_{\text{н.р.осадкаC}}$ – масса порошка углерода, полученного после растворения и сушки; $m_{\text{МКМ}}$ – масса образца металлического композиционного материала системы Al–C.

Объемное содержание рассчитывают через массовое с учетом плотности МКМ:

$$V_C = \frac{M_C / d_C}{M_C / d_C + M_{Al} / d_{Al}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Погрешность измерения не превышает 5 % при доверительной вероятности 0,95. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Исследована структура МКМ, измерены плотность, объемное наполнение и ТКЛР углеродного каркаса и МКМ в диапазоне температур от 20 до 200 °С.

Исследование структуры показало, что жидкий алюминиевый сплав проникает во все поры углеродного наполнителя. Однако в углероде заметны незначительные поры, которые вызваны адгезией межфазных границ при полном протекании процесса вакуумно-компрессионной пропитки (рис. 1).

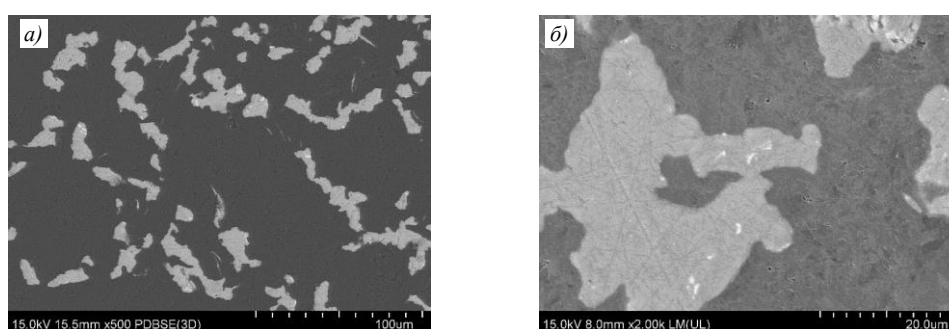


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала системы Al–C после вакуумно-компрессионной пропитки при увеличении $\times 500$ (а) и $\times 2000$ (б)

Плотность пористого углеродного каркаса и МКМ на основе алюминиевого сплава системы Al–C:

Материал	Алюминиевый сплав	Углерод	Пористый углеродный каркас	МКМ системы Al–C
Плотность, г/см ³	2,70	2,25	1,65–1,70	2,21–2,25

Объемное содержание углерода, рассчитанное по формуле (4), составило 79 ± 2 %.

Средние значения ТКЛР для пористого углеродного каркаса и МКМ измерены при нагревании со скоростью 5 К/мин в инертной среде в диапазоне температур от 20 до 200 °С (рис. 2).

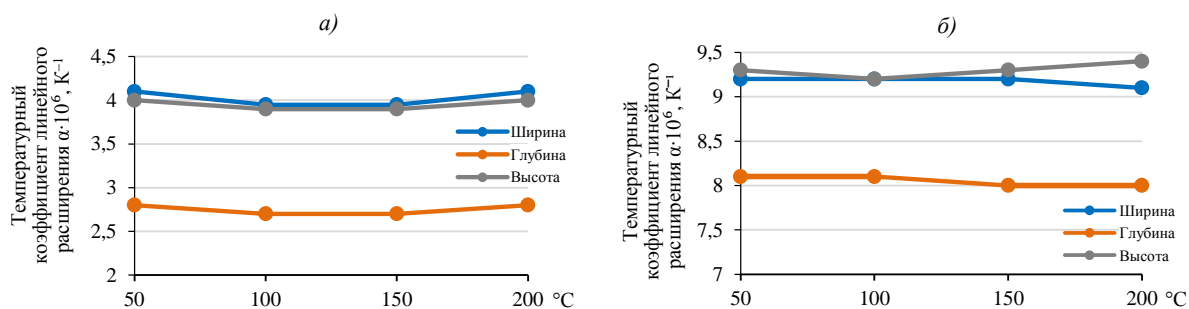


Рис. 2. Зависимость температурного коэффициента линейного расширения от направления базисных плоскостей (ширина, глубина, высота) для пористого углерода (а) и металлического композиционного материала системы Al–C (б)

В зависимости от направления базисных плоскостей в углеродном каркасе значения ТКЛР уменьшаются на 30–35 %, в МКМ – на 15–20 %. Определено, что пропитка алюминиевым сплавом углеродного каркаса приводит к увеличению значения ТКЛР в 2,5–3 раза при сохранении соответствующей разницы для базисных плоскостей.

Заключения

С применением современных методов и фундаментальных основ материаловедения исследована структура, определены плотность и объемное содержание углерода в МКМ системы Al–C. Измерены значения ТКЛР углеродного пористого каркаса и МКМ в диапазоне температур от 20 до 200 °С. Установлено, что в зависимости от направления базисных плоскостей в углеродном каркасе значения ТКЛР уменьшаются на 30–35 %. После пропитки углеродного пористого каркаса литейным алюминиевым сплавом разница между значениями ТКЛР в зависимости от направления базисных плоскостей снижается до 15–20 %, значения ТКЛР увеличиваются в 2,5–3 раза при сохранении соответствующей разницы для базисных плоскостей. Значение ТКЛР полученного МКМ в 2,2 раза меньше значения ТКЛР матричного сплава системы Al–Si–Cu. Повышенная технологичность и более низкий уровень ТКЛР для МКМ по сравнению с углеродным каркасом позволяют рассматривать их в качестве перспективного материала для изготовления нагруженных деталей со сложной формой в изделиях силовой электроники и приборостроения.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Zweben C. Advances in photonics thermal management and packaging materials // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. USA, 2008. DOI: 10.1117/12.761748.
2. Вишняков Л.Р., Коханий В.Л., Мороз В.П., Кладницкий Е.И. Алюминиевые композиты триботехнического назначения, полученные методом вакуумно-компрессионной пропитки // Композиционные материалы в промышленности: материалы 23-й Междунар. конф. Ялта, 2003. С. 161–162.
3. Структура и свойства композиционных материалов: сб. науч. тр. / под ред. К.И. Портного. М.: Машиностроение, 1979. 253 с.
4. Kotval P.S. Wear resistant aluminum – a new approach: cast surface composites // Journal of Metals. 1974. Vol. 26. No. 1. P.13–17.
5. Pepper R.T., Upp J.W., Rossi R.C., Kendall E.G. The tensile properties of graphite-fiber reinforced Al–Si alloy // Metallurgical Transactions. 1971. Vol. 2. No. 1. P. 117–120.
6. Салибеков С.Е., Заболоцкий А.А. Исследование влияния никелевых покрытий на волокне на структуру и свойства композиционного материала алюминий-углеродное волокно // Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. М.: Наука, 1976. С. 33–37.
7. Устройство для получения изделия из металломатричного композиционного материала: пат. 110310 Рос. Федерация; заявл. 31.05.11; опубл. 20.11.11.
8. Способ получения изделия из композиционного материала: пат. 2448808 Рос. Федерация; заявл. 05.10.10; опубл. 27.04.12.
9. Каблов Е.Н., Соловьянчик Л.В., Кондрашов С.В. и др. Электропроводящие гидрофобные полимерные композиционные материалы на основе окисленных углеродных нанотрубок, модифицированных теломерами тетрафторэтилена // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 91–97.
10. Лукина Е.А., Зайцев Д.В., Романенко В.А. Структура и свойства композиционного материала на основе алюминиевого сплава с добавлением углеродных нанотрубок // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-27-34.

11. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.07.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
12. Няфкин А.Н., Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Исследование влияния размера частиц карбида кремния на температурный коэффициент линейного расширения композиционного материала на основе алюминиевого сплава // *Труды ВИАМ*. 2020. № 2 (86). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-41-49.
13. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbott G.L. Rash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // *Journal of Applied Physics*. 1961. No. 32. P. 1679–1684.
14. ASTM E228. Standard test method for linear thermal expansion of solid materials with a push-rod dilatometer. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. P. 1–10. DOI: 10.1520/E0228-17.
15. ASTM E831. Standard test method for linear thermal expansion of solid materials by thermomechanical analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. P. 1–5. DOI: 10.1520/E0831-19.
16. Няфкин А.Н., Лощинин Ю.В., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Исследование влияния фракционного состава карбида кремния на теплопроводность композиционного материала на основе алюминиевого сплава // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-53-59.
17. ГОСТ 18898–89 (ИСО 2738–87). Изделия порошковые. Методы определения плотности, содержания масла и пористости. М.: Изд-во стандартов, 1990. 10 с.
18. ГОСТ Р 22309–2015 (ИСО 22309–2011). Государственная система обеспечения единства измерений. Микроанализ электронно-зондовый. Количественный анализ с использованием энергодисперсионной спектроскопии для элементов с атомным номером от 11 (Na) и выше. М.: Стандартинформ, 2015. 19 с.

References

1. Zweben C. Advances in photonics thermal management and packaging materials. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2008. DOI: 10.1117/12.761748.
2. Vishnyakov L.R., Kokhany V.L., Moroz V.P., Kladnitsky E.I. Aluminum composites for tribotechnical purposes, obtained by vacuum-compression impregnation. *Composite materials in industry: materials of the 23rd Intern. conf. Yalta, 2003*, pp. 161–162.
3. *Structure and properties of composite materials: collection. scientific tr.* Ed. K.I. Portnoy. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 253 p.
4. Kotval P.S. Wear resistant aluminum – a new approach: cast surface composites. *Journal of Metals*, 1974, vol. 26, no. 1, pp.13–17.
5. Pepper R.T., Upp J.W., Rossi R.C., Kendall E.G. The tensile properties of graphite-fiber reinforced Al–Si alloy. *Metallurgical Transactions*, 1971, vol. 2, no. 1, pp. 117–120.
6. Salibekov S.E., Zabolotsky A.A. Study of the influence of nickel coatings on fiber on the structure and properties of aluminum-carbon fiber composite material. *Fiber and dispersion-strengthened composite materials*. Moscow: Nauka, 1976, pp. 33–37.
7. Device for producing a product from a metal matrix composite material: pat. 110310 Rus. Federation; appl. 31.05.11; publ. 20.11.11.
8. Method for producing a product from a composite material: patent. 2448808 Rus. Federation; appl. 05.10.10; publ. 27.04.12.
9. Kablov E.N., Solovyanchik L.V., Kondrashov S.V. and others. Electrically conductive hydrophobic polymer composite materials based on oxidized carbon nanotubes modified with tetrafluoroethylene telomers. *Rossiyskie nanotekhnologii*, 2016, vol. 11, no. 11–12, pp. 91–97.

10. Lukina E.A., Zaitsev D.V., Romanenko V.A. Structure and properties of a composite material based on aluminum alloy with the addition of carbon nanotubes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-27-34.
11. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 17, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
12. Nyafkin A.N., Shavnev A.A., Kurbatkina E.I., Kosolapov D.V. Studying the effect of silicon carbide particle size on the linear thermal expansion coefficient of the composite material based on aluminum alloy. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-41-49.
13. ASTM E228. *Standard test method for linear thermal expansion of solid materials with a push-rod dilatometer*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017, pp. 1–10. DOI: 10.1520/E0228-17.
14. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbott G.L. Rash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, 1961, no. 32, pp. 1679–1684.
15. ASTM E831. *Standard test method for linear thermal expansion of solid materials by thermomechanical analysis*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1520/E0831-19.
16. Nyafkin A.N., Loshchinin Yu.V., Kurbatkina E.I., Kosolapov D.V. Investigation of influence of silicon carbide fractional composition on thermal conductivity of composite material based on aluminium alloy. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 6. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-53-59.
17. State Standard 18898–89 (ISO 2738–87). *Powder products. Methods for determining density, oil content and porosity*. Moscow: Publ. house of standards, 1990, 10 p.
18. State Standard R 22309–2015 (ISO 22309–2011). *State system for ensuring the uniformity of measurements. Electron probe microanalysis. Quantitative analysis using energy dispersive spectrometry for elements with atomic number 11 (Na) and higher*. Moscow: Standartinform, 2015, 19 p.

Информация об авторах

Няфкин Андрей Николаевич, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Косолапов Дмитрий Викторович, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Жабин Александр Николаевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey N. Nyafkin, Head of Production Area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry V. Kosolapov, Deputy Head of the Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander N. Zhabin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.09.2023.
The article was submitted 23.08.2023; approved and accepted for publication after reviewing 06.09.2023.