

Научная статья

УДК 539.422.5, 620.174

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29111>



С.Ю. Прилипко ✉, Д.С. Линник, Ю.А. Кудрявцев,
Д.Р. Беличко, Г.К. Волкова, В.А. Глазунова, В.В. Бурховецкий

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,
г. Донецк, Россия

✉ suprilipko@mail.ru

ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКИЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО Al_2O_3

Аннотация. Из порошков различного размера и формы получены образцы керамики с открытой пористостью. Величина пористости варьировалась в пределах 20–50%, прочность при четырехточечном изгибе при этом достигала 130 МПа. Исследовано влияние морфологии нанопорошков Al_2O_3 на структуру и прочность пористой керамики из них и установлена возможность повышения удельной прочности путем заполнения открытых пор эпоксидными смолами. Задача эксперимента заключалась в получении композита, в котором каждый компонент имел бы непрерывную структуру. В результате проведенных исследований разработан способ получения композитных материалов низким удельным весом (2–2,5 г/см³). Получены образцы полимер-керамических композитов с матрицей из Al_2O_3 , сочетающие в себе достоинства обоих материалов, что привело к повышению удельной прочности. Материалы статьи представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2022», проходившей в Санкт-Петербурге 21–25 ноября 2022 года.

Ключевые слова: полимер-керамический композит, оксид алюминия, эпоксидные смолы, прочность, плотность.

Для цитирования:

Прилипко С.Ю., Линник Д.С., Кудрявцев Ю.А. и др. Полимер-керамический композит на основе пористого Al_2O_3 // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 181–189. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29111>



S.Yu. Prilipko ✉, D.S. Linnik, Yu.A. Kudryavtsev,
D.R. Belichko, G.K. Volkova, V.A. Glazunova, V.V. Burkhovetsky

Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering,
Donetsk, Russia

✉ suprilipko@mail.ru

POLYMER-CERAMIC COMPOSITE BASED ON POROUS Al_2O_3

Abstract. Ceramic samples with open porosity were manufactured from powders of various sizes and shapes. The porosity value varied within 20–50%, while the bending strength reached 130 MPa. The influence of the morphology of Al_2O_3 nanopowders on the structure and strength of porous ceramics made from them was studied, and the possibility of increasing the specific strength by filling open pores with epoxy resins was established. A method for obtaining composite materials with low specific gravity (2–2.5 g/cm³) was developed. The objective of the experiment was to obtain a composite in which each component would have a continuous structure. Samples of polymer-ceramic composites with an Al_2O_3 matrix were made, combining the advantages of both materials, which led to an increase in specific strength. The materials of the article were presented at the International Scientific and Practical Conference "Advanced Engineering Technologies AET 2022" held in St. Petersburg on November 21–25, 2022.

Keywords: polymer-ceramic composite, aluminum oxide, epoxy resins, strength, density.

Citation:

S.Yu. Prilipko, D.S. Linnik, Yu.A. Kudryavtsev, etc., Polymer-ceramic composite based on porous Al_2O_3 , *Global Energy*, 29 (01) (2023) 181–189, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29111>

Введение. Одним из способов, обеспечивающих снижение энергозатрат при эксплуатации подвижных частей механизмов, является получение материалов с меньшим удельным весом [1–3]. Решением этой проблемы могло бы стать получение композитных полимер-керамических материалов [3], сочетающих в себе достоинства входящих в него компонентов – прочность и твердость керамики и легкость органических полимеров.

Важным структурной особенностью, определяющей свойства композиционных материалов [4–6], является наличие непрерывной матрицы и распределенных в ней наполнителей [7–10]. Как правило, керамико-органические композиты состоят из органической матрицы с керамическими частицами в качестве наполнителей [11–14].

Цель данной работы состояла в получении композита, в котором каждый компонент был бы представлен в виде непрерывной подструктуры с их взаимным проникновением, что приводило бы к рассеиванию энергии трещины на границах керамика-полимер [15] вследствие разветвления и упрочнению материала.

Методы и материалы

Нанодисперсный оксид алюминия получали методом химического осаждения раствором аммиака из раствора сульфата алюминия, либо нитрата алюминия с последующим прокаливанием. В зависимости от условий осаждения и температуры прокаливания получались порошки различной дисперсности и фазового состава. Дисперсный состав частиц определялся с использованием просвечивающей (трансмиссионной) электронной микроскопии на микроскопе JEM-200A при ускоряющем напряжении 200 кВ и сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-6490LV.

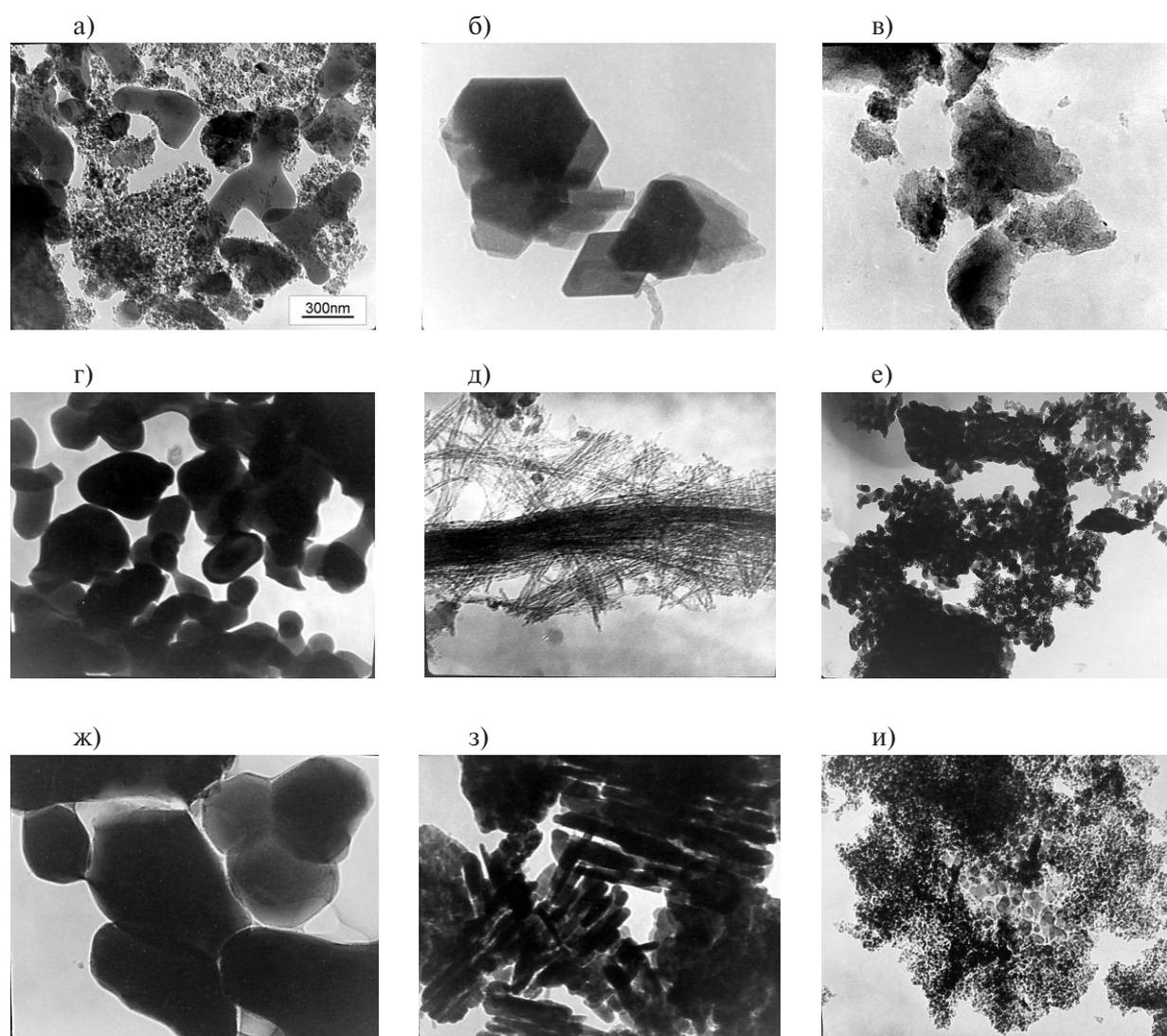


Рис. 1. Исходные порошки Al_2O_3 . Масштаб всех фотографий одинаковый
 Fig. 1. Initial Al_2O_3 powders. The scale for all photos is the same

Прочность на четырехточечный изгиб измерялась на установке Tinius Olsen H50kt.

Результаты и обсуждение

Для получения керамической основы с высокой открытой пористостью, применялось твердофазное спекание порошков Al_2O_3 с различной формой частиц (рис. 1), размерами, а также типом кристаллической решетки. Средний размер кристаллитов варьировался от 10 нм (рис. 1в) до 2000 нм (рис. 1ж). Также для повышения плотности компакта применялись полидисперсная смесь порошков (рис. 1а). Форма частиц была как правильной многоугольной (рис. 1б) сферической (рис. 1г, 1е, 1и), так и нитевидной (рис. 1д), столбчатой (рис. 1з). Химический состав всех порошков был одинаковый, добавки не применялись. Давление холодного изостатического прессования составляло от 200 до 1000 МПа. Температура спекания составляла 1450°C. В результате спекания были получены образцы с пористостью от 25 до 55% при теоретической плотности 3,99 г/см³.

Испытания на четырехточечный изгиб (рис. 2) продемонстрировали большое влияние на прочность не только плотности образцов и давления их предварительного прессования, но и

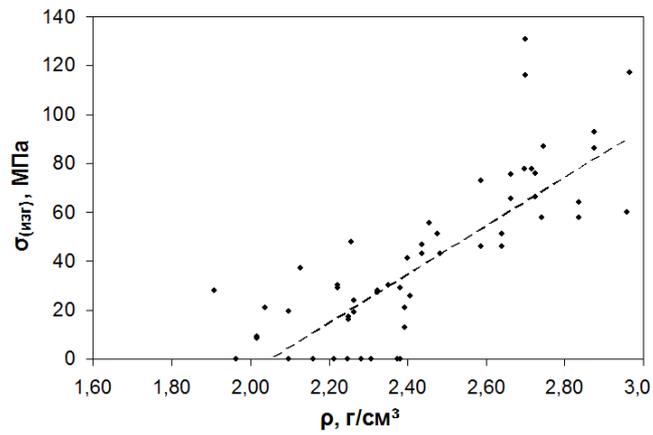
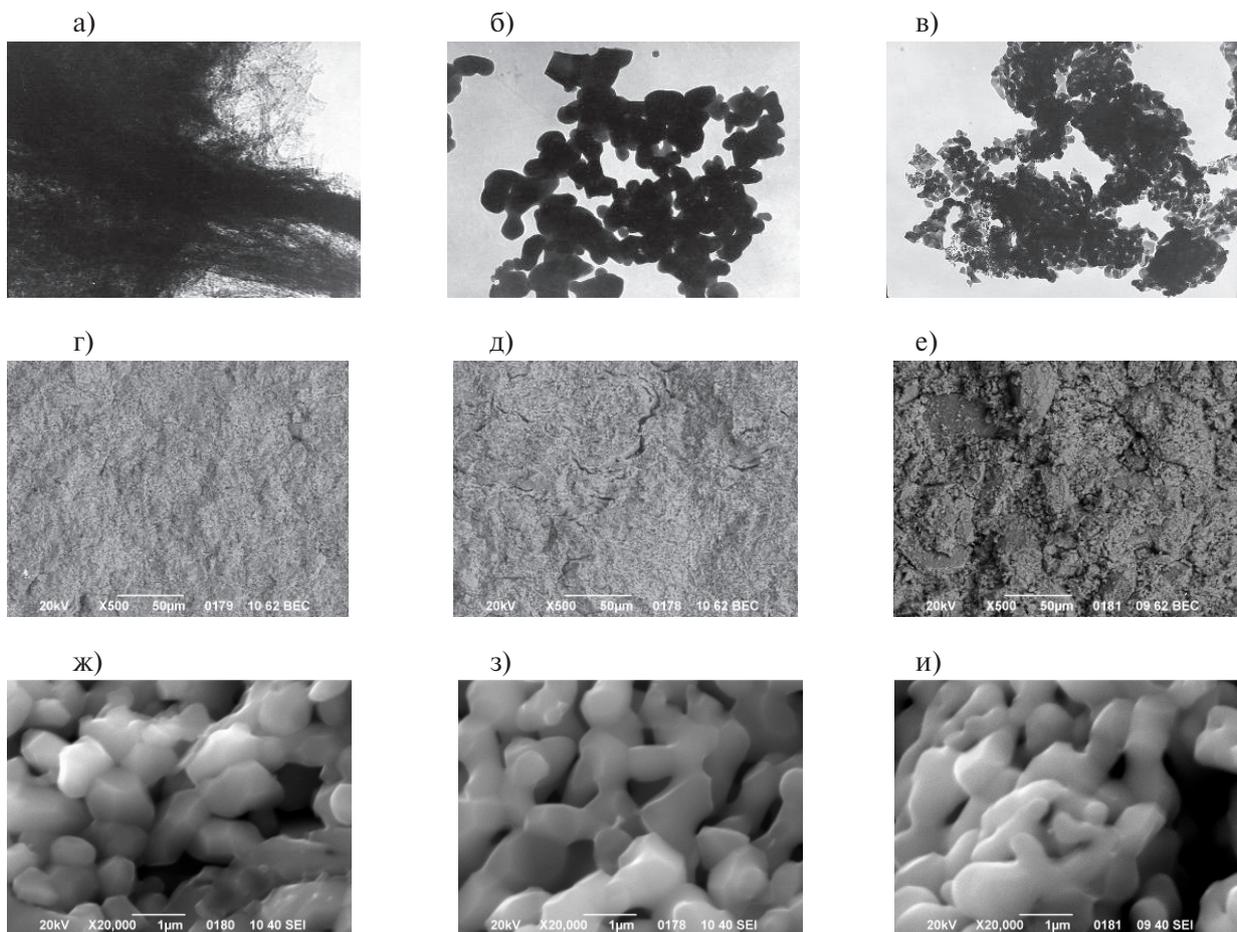


Рис. 2. Прочность пористой керамики Al₂O₃ при испытаниях на четырехточечный изгиб
 Fig. 2. Strength of Al₂O₃ porous ceramic in four-point bending tests



$\rho = 2,71 \text{ г/см}^3$; $\rho = 130 \text{ МПа}$; $\rho = 2,66 \text{ г/см}^3$; $\rho = 76 \text{ МПа}$; $\rho = 2,59 \text{ г/см}^3$; $\rho = 46 \text{ МПа}$

Рис. 3. Зависимость микроструктуры и прочности образцов от морфологии исходного порошка
 Fig. 3. Dependence of the microstructure and strength of the samples on the morphology of the initial powder

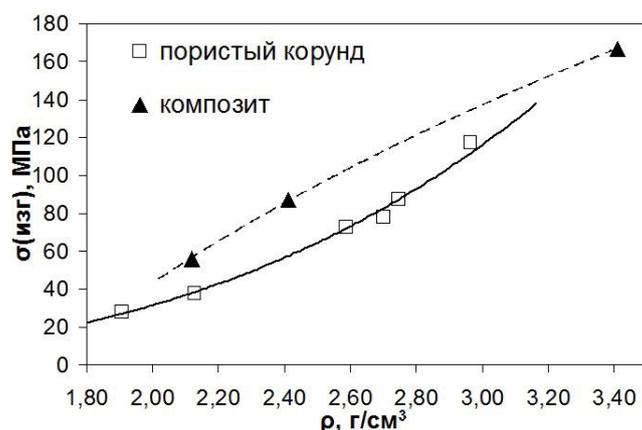


Рис. 4. Зависимость прочности на изгиб от плотности для исходной корундовой матрицы и корундовой матрицы заполненной полимером

Fig. 4. Dependence of the strength of samples on their density for the original corundum matrix and for corundum matrix filled with polymer

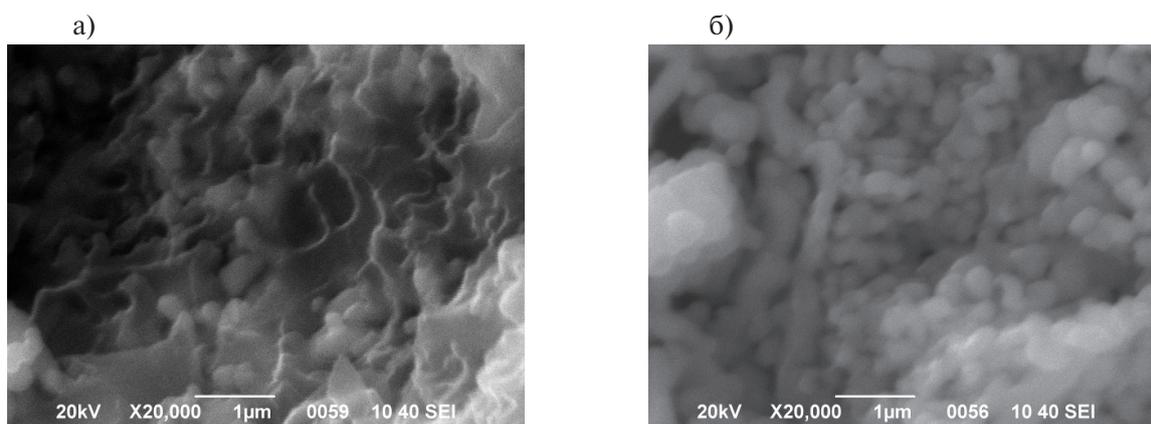


Рис. 5. Внутренняя структура образцов Al_2O_3 с заполненными полимером порами (а) и исходная структура (б)

Fig. 5. Internal structure of Al_2O_3 samples with polymer-filled pores (a) and initial structure (b)

морфологии исходных порошков и, как следствие, полученной микроструктуры керамики (рис. 3).

Как видно из рис. 2, максимальная прочность пористых образцов, достигнутая в ходе экспериментов, составила 130 МПа. Результаты исследований микроструктуры образцов выявили определенные закономерности, влияющие на их прочность. Ключевым фактором, определяющим прочность образцов, оказалось наличие крупных пор (рис. 3д, 3е), появление которых, по-видимому, обусловлено морфологией исходного порошка и в некоторой степени нивелируется повышением давления холодного изостатического прессования. Отметим, что из частиц нитевидной формы получены более прочные образцы (рис. 3а) чем из сферических частиц (рис. 3б, 3в).

На следующем этапе изучалось изменение прочности образцов при заполнении пор полимерным составом. Задача эксперимента заключалась в получении композита, в котором каждый компонент имел бы непрерывную структуру. Основываясь на ранее полученных результатах, для получения композита были выбраны исходные порошки, наиболее перспективные с точки зрения удельной прочности. В качестве полимерного наполнителя использовался эпоксидный полимер катионной полимеризации УП-650Т. Основные требования, предъявлявшие-

ся к полимеру, заключались в длительном отверждении с минимальными изменениями размеров при этом, а также высокой степени адгезии с керамикой. Нужно отметить, что выбранный полимер при отсутствии керамического каркаса был гибким, что не позволило измерить его собственную прочность при изгибе. Тем не менее, заполнение пустот в пористых керамических образцах привело к существенному росту их удельной прочности (рис. 4).

По данным электронной микроскопии (рис. 5) установлена возможность заполнения как крупных пор, так и мелких капилляров, однако предельно возможную глубину проникновения различных полимеров еще предстоит выяснить.

Заключение

Получение прочной керамической структуры с открытой пористостью позволило решить задачу полного заполнения пор полимером и получить композитные образцы с удельной прочностью на изгиб выше, чем у исходной пористой керамики. Из приведенных результатов можно сделать вывод о перспективности применения эпоксидных смол для получения полимер-керамических композитов. Предложенные композиты с керамической матрицей способны соединять в себе достоинства обоих компонентов: высокую прочность и износостойкость при низком удельном весе и устойчивости к коррозии.

Материалы статьи представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2022», проходившей в Санкт-Петербурге 21–25 ноября 2022 года.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Khuyen N.Q., Kim J.B., Kim B.S., Lee S.** Effect of Atmospheric Plasma Treatments on Mechanical Properties of VGCF/Epoxy, *Advanced Composite Materials*, 2 (17) (2008) 167–175.
- [2] **Guo W., Xiao H., Xie W., Hu J., Li Q., Gao P.** A new design for preparation of high performance recrystallized silicon carbide, *Ceramics International*, 38 (2012) 2475–2481.
- [3] **Zusho Y., Kobayashi S., Osada T.** Mechanical behavior of hydroxyapatite-poly(lactic acid) hybrid porous scaffold, *Advanced Composite Materials*, 29 (6) (2020) 587–602.
- [4] **Шестаков А.М.** Керамика на основе кремнийорганических полимеров-прекурсоров: микроструктура и свойства (обзор). Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2021. № 8 (102). С. 21–33.
- [5] **Shamsipur A., Asadkarami S.** Microstructure and mechanical properties of copper surface composite layers reinforced by nano and microscale SiC particles via friction stir processing. *Advanced Composite Materials*, 28 (6) (2019) 591–606.
- [6] **Nam T.H., Goto K., Shimamura Y., Inoue Y., Ogihara S.** Property improvement of CNT spun yarns and their composites through pressing, stretching and tensioning. *Advanced Composite Materials, Advanced Composite Materials*, 28 (5) (2019) 507–524.
- [7] **Дуюнова В.А., Серебrenникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Сидельников В.В., Сомов А.В.** Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. №1. С. 65–77.
- [8] **Choi S.-M., Awaji H.** Nanocomposites – a new material design concept, *Science and Technology of Advanced Materials*, 6 (2005) 2–10.
- [9] **Bhoi N.K., Singh H., Pratap S., Gupta M., Jain P.K.** Investigation on the combined effect of ZnO nanorods and Y₂O₃ nanoparticles on the microstructural and mechanical response of aluminium, *Advanced Composite Materials*, 31 (3) (2022) 289–310.
- [10] **Arabli V., Aghili A.** The effect of silica nanoparticles, thermal stability, and modeling of the curing kinetics of epoxy/silica nanocomposite, *Advanced Composite Materials*, 6 (24) (2015) 561–577.

[11] Охлопкова А.А., Адрианова О.А., Попов С.Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. 222 с.

[12] Кропотин О.В., Машков Ю.К., Егорова В.А., Кургузова О.А. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена // Журнал технической физики. 2014. № 5 (84) С. 66–70.

[13] Bhatia S., Angra S., Khan S. A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite, *Advanced Composite Materials*, 30 (4) (2020) 307–337.

[14] Jin Y., Gwak Y., Gerhardt R.A. Effects of nanoparticles size and interactions on dielectric properties of polymer matrix flexible dielectric nanocomposites, *Advanced Composite Materials*, 29 (3) (2019) 235–246.

[15] Suga K., Okamoto K., Ogihara S., Kikuchi M. Model-based inverse characterization of high velocity tension impact failure in composites, *Advanced Composite Materials*, 6 (25) (2016) 567–579.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПРИЛИПКО Сергей Юрьевич – старший научный сотрудник, Донецкий Физико-технический институт имени А.А. Галкина, канд. техн. наук.
E-mail: suprilipko@mail.ru

ЛИННИК Дмитрий Сергеевич – аспирант, Донецкий Физико-технический институт имени А.А. Галкина, без степени.
E-mail: linnikal@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ Юрий Александрович – ведущий инженер, Донецкий Физико-технический институт имени А.А. Галкина, без степени.
E-mail: ix@uask.biz

БЕЛИЧКО Данил Романович – младший научный сотрудник, Донецкий Физико-технический институт имени А.А. Галкина, без степени.
E-mail: danil.belichko@yandex.ru

ВОЛКОВА Галина Кузьминична – научный сотрудник, Донецкий Физико-технический институт имени А.А. Галкина, без степени.
E-mail: g.k.volkova@rambler.ru

ГЛАЗУНОВА Валентина Александровна – научный сотрудник, Донецкий Физико-технический институт имени А.А. Галкина, без степени.
E-mail: glasunova-2007@rambler.ru

БУРХОВЕЦКИЙ Валерий Викторович – научный сотрудник, Донецкий Физико-технический институт имени А.А. Галкина, без степени.
E-mail: val-bur_63@mail.ru

REFERENCES

[1] N.Q. Khuyen, J.B. Kim, B.S. Kim, S. Lee, Effect of Atmospheric Plasma Treatments on Mechanical Properties of VGCF/Epoxy, *Advanced Composite Materials*, 2 (17) (2008) 167–175.

[2] W. Guo, H. Xiao, W. Xie, J. Hu, Q. Li, P. Gao, A new design for preparation of high performance recrystallized silicon carbide, *Ceramics International*, 38 (2012) 2475–2481.

[3] Y. Zusho, S. Kobayashi, T. Osada, Mechanical behavior of hydroxyapatite-poly(lactic acid) hybrid porous scaffold, *Advanced Composite Materials*, 29 (6) (2020) 587–602.

- [4] **A.M. Shestakov**, Ceramics based on organosilicon polymers-precursors: microstructure and properties (review). Part 1, Proceedings of VIAM 8 (102) (2021) C. 21–33.
- [5] **A. Shamsipur, S. Asadkarami**, Microstructure and mechanical properties of copper surface composite layers reinforced by nano and microscale SiC particles via friction stir processing. *Advanced Composite Materials*, 28 (6) (2019) 591–606.
- [6] **T.H. Nam, K. Goto, Y. Shimamura, Y. Inoue, S. Ogihara**, Property improvement of CNT spun yarns and their composites through pressing, stretching and tensioning. *Advanced Composite Materials*, 28 (5) (2019) 507–524.
- [7] **V.A. Duyunova, N.Yu. Serebrennikova, Yu.N. Nefedova, V.V. Sidelnikov, A.V. Somov**, Methods of forming metal-polymer composite materials (review) // *Aviation materials and technologies*. 1 (2022) 65–77.
- [8] **S.-M. Choi, H. Awaji**, Nanocomposites – a new material design concept, *Science and Technology of Advanced Materials*, 6 (2005) 2–10.
- [9] **N.K. Bhoi, H. Singh, S. Pratap, M. Gupta, P.K. Jain**, Investigation on the combined effect of ZnO nanorods and Y₂O₃ nanoparticles on the microstructural and mechanical response of aluminium, *Advanced Composite Materials*, 31 (3) (2022) 289–310.
- [10] **V. Arabli, A. Aghili**, The effect of silica nanoparticles, thermal stability, and modeling of the curing kinetics of epoxy/silica nanocomposite, *Advanced Composite Materials*, 6 (24) (2015) 561–577.
- [11] **A.A. Okhlopkova, O.A. Adrianova, S.N. Popov**, Modifikatsiya polimerov ultradispersnymi soyedineniyami [Modification of polymers by ultradispersed fillers], Yakutsk, YaF Izd-Va SO RAN, 2003.
- [12] **O.V. Kropotin, Yu.K. Mashkov, V.A. Egorova, O.A. Kurguzova**, Effect of Carbon Modifiers on the Structure and Wear Resistance of Polytetrafluoroethylene-Based Polymer Nanocomposites, *Technical Physics* 5 (84) (2014) 696.
- [13] **S. Bhatia, S. Angra, S. Khan**, A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite, *Advanced Composite Materials*, 30 (4) (2020) 307–337.
- [14] **Y. Jin, Y. Gwak, R.A. Gerhardt**, Effects of nanoparticles size and interactions on dielectric properties of polymer matrix flexible dielectric nanocomposites, *Advanced Composite Materials*, 29 (3) (2019) 235–246.
- [15] **K. Suga, K. Okamoto, S. Ogihara, M. Kikuchi**, Model-based inverse characterization of high velocity tension impact failure in composites, *Advanced Composite Materials*, 6 (25) (2016) 567–579.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey Yu. PRILIPKO – *Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering*.
E-mail: suprilipko@mail.ru

Dmitriy S. LINNIK – *Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering*.
E-mail: linnikal@mail.ru

Yuriy A. KUDRYAVTSEV – *Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering*.
E-mail: ix@uask.biz

Danil R. BELICHKO – *Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering*.
E-mail: danil.belichko@yandex.ru

Galina K. VOLKOVA – *Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering*.
E-mail: g.k.volkova@rambler.ru

Valentina A. GLAZUNOVA – *Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering*.
E-mail: glasunova-2007@rambler.ru

Valeriy V. BURKHOVETSKY – *Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering.*
E-mail: val-bur_63@mail.ru

Поступила: 20.01.2023; Одобрена: 18.02.2023; Принята: 21.02.2023.
Submitted: 20.01.2023; Approved: 18.02.2023; Accepted: 21.02.2023.