



УДК 621.318.1

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-2-71-77>

Научная статья

Research article



Исследование влияния магнитных воздействий на прочностные характеристики модифицированных эпоксидных композиционных материалов

М. Д. Соснин, И. А. Шорсткий

Кубанский государственный технологический университет
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2

i-shorstky@mail.ru

Аннотация. Замена традиционных материалов композиционными представляет собой важный вектор развития авиационной и аэрокосмической отраслей промышленности. В работе рассмотрены вопросы применения магнитного поля вращающихся диполей с целью получения композиционных материалов на основе порошкового железа с высокими прочностными и структурными характеристиками. Исследованы физико-механические свойства модифицированных эпоксидных композиционных материалов. С помощью средств электронной микроскопии исследованы микроструктура, элементный состав и получена карта распределения компонентов в получаемых образцах. Экспериментальным путем выявлено, что при наложении магнитного поля вращающихся диполей прочность при сжатии композитов увеличивается на 16,6 % относительно образцов, полученных без применения этой технологии. Это вызвано тем, что данный метод позволяет удалять возникающую в процессе механосинтеза газовую пористость и раковины во внутренней структуре материала. Серия экспериментов с добавлением увеличенного массового соотношения Al-частиц показала, что магнитное поле вращающихся диполей способствует вытеснению излишков алюминия в виде поверхностного слоя. Таким образом, можно заключить, что применение магнитного поля вращающихся диполей является перспективным направлением в области создания композиционных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками. Получаемые эпоксидные композиты могут быть использованы в качестве конструкционных материалов в авиационной и космической отраслях, а также в качестве материалов адсорберов в радиотехнической аппаратуре и микроэлектронике.

Ключевые слова: эпоксидный композиционный материал, магнитное поле вращающихся диполей (МПВД), прочность на сжатие, наполнитель, порошковое железо, микроструктура

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках конкурса научно-инновационных проектов, ориентированных на коммерциализацию № НИП-20.1/23.

Для цитирования: Соснин М.Д., Шорсткий И.А. Исследование влияния магнитных воздействий на прочностные характеристики модифицированных эпоксидных композиционных материалов. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2023;17(2):71–77. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-2-71-77>

The influence of magnetic fields on the strength of modified epoxy resin composites

M. D. Sosnin, I. A. Shorstkii

Kuban State Technological University
2 Moskovskaya Str., Krasnodar 350072, Russia

✉ i-shorstky@mail.ru

Abstract. The aerospace industry is currently undergoing a major trend of transitioning to composites. This study examines the utilization of the magnetic field of rotating dipoles to produce high-strength iron powder-containing composites. The physical and mechanical properties of the modified epoxy composites were investigated through the use of SEM to analyze their microstructure and elemental composition, and a component distribution map was developed for the samples. Results indicate that the application of the magnetic field of rotating dipoles enhances the compression strength by 16.6 % relative to samples that were not exposed to it. Additionally, the magnetic field eliminates gas porosity and cavities formed during stirring. Tests conducted on composites with a higher content of Al particle showed that the magnetic field of rotating dipoles contributes to the release of excess aluminum as a surface layer. The use of the magnetic field of rotating dipoles is a promising technology for producing enhanced composites with superior physical and mechanical properties, which could potentially be used as structural material in aerospace industry or as adsorbing materials in microelectronics.

Keywords: epoxy composite, magnetic field of rotating dipoles (MFRD), compressive strength, filler, iron powder, microstructure

Acknowledgements: This study is supported by the Kuban Research Foundation as part of the research and innovation project commercialization contest No. NIP-20.1/23.

For citation: Sosnin M.D., Shorstkii I.A. The influence of magnetic fields on the strength of modified epoxy resin composites. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(2):71–77. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-2-71-77>

Введение

Объемы производства, масштабы потребления и области применения композиционных материалов (КМ) на основе порошковых наполнителей показывают ежегодную положительную динамику. Об этом свидетельствуют данные мирового рынка полимерных материалов. Так, за 2020 год объем мирового рынка полимерных КМ составил приблизительно 13 млн т [1].

Наряду с этим актуальность разработки полимерных композиционных материалов подтверждает дорожная карта «Технет», формирующая контуры развития передовых производственных технологий в Российской Федерации [2]. Согласно данной дорожной карте развитие и применение КМ с управляемой микроструктурой входят в одно из ключевых направлений развития передовых производственных технологий.

Для изготовления композиционных структур на основе порошковых наполнителей в качестве основной матрицы наибольшее распространение получили термопластичные полимеры и эпоксидные смолы [3]. Применение термопластичных полимеров позволяет получать КМ с широким спектром механических характеристик, благодаря которым варьируются свойства и области применения полимерных композиций [4; 5]. В то же время их сочетание не всегда позволяет получать композиты со стабильным уровнем физико-механических свойств.

Одним из путей устранения этого недостатка представляется комплекс мер с добавлением различных армирующих наполнителей, направленных на улучшение адгезионной связи КМ [6; 7] и его прочностных характеристик [8]. Структура получаемых дисперсий позволяет достичь усиления поли-

меров после наполнения, преимущественно за счет формирования структурированных слоев [9], агрегативно-кластерной структуры наполнителя [10] и кристаллов [11].

К примеру, авторы [12] рассмотрели возможность усиления прочности и стойкости эпоксикомпозитов путем их наполнения карбидом кремния и нитридом титана, что привело к существенному повышению микротвердости (в 1,5–2,0 раза) и увеличению предела прочности при сжатии (на 9 %).

В последнее время комплекс мер совершенствования физико-механических характеристик композиционных материалов расширился спектром электрофизических методов. Так, при создании КМ разработаны методы воздействия сильного статического магнитного поля [13; 14], импульсных магнитных колебаний [15] и наложения магнитного поля вращающихся диполей (МПВД) [16]. Последний представляет собой эффективный способ, обеспечивающий возможность управления структурой укладки порошковых частиц в КМ, и при этом не требует значительных энергетических затрат.

Целью работы являлось исследование влияния магнитного поля вращающихся диполей на прочностные и структурные характеристики композиционных материалов на основе порошкового железа и алюминия.

Методика исследований

Материалы

В качестве основной рабочей композиции использовали микрочастицы железа марки ПЖВ1.160.26 (ГОСТ 9849-86) и алюминиевую пудру марки ПАП-2 (ГОСТ 5494-95). В качестве матричного материала выбрана смесь диановой смолы ЭД-20

(ГОСТ 10587-84) и полиэтиленполиамина (ПЭПА) в соотношении 5:1.

Технология получения композитов

Подготовку к формированию конечных модифицированных эпоксидных композиционных образцов осуществляли в соответствии с блок-схемой (рис. 1) согласно запатентованной технологии. В качестве порошкового наполнителя были рассмотрены отдельно частицы порошкового железа и смесь порошкового железа и Al-частиц в массовом соотношении 7:3. Композицию на базе смолы ЭД-20 смешивали в пластиковом цилиндре с внутренним диаметром 20 мм в массовой пропорции 1:1 с порошковым наполнителем, состоящим из микрочастиц железа марки ПЖВ1.160.26 (70 мас. %) и алюминиевой пудры ПАП-2 (30 мас. %). Далее в композицию вводили 1/5 (от массы смолы) отвердителя ПЭПА. Полученные композиции подвергали термической обработке ($t = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$) в течение 1–2 мин (для удаления газовой пористости) и разливали в формы. Далее образцы извлекали из формы для дальнейшего исследования.

В результате было получено 4 образца КМ, имеющих одинаковые геометрические параметры – диаметр 20 мм, длину 20 мм. Два из них с композициями из микрочастиц Fe–Al (FAM) и Fe (FM) были получены с применением технологии магнитного поля вращающихся диполей (рис. 2) с величиной магнитной индукции 0,5–0,7 Тл [17; 18], а два других (FA и F) – без нее.

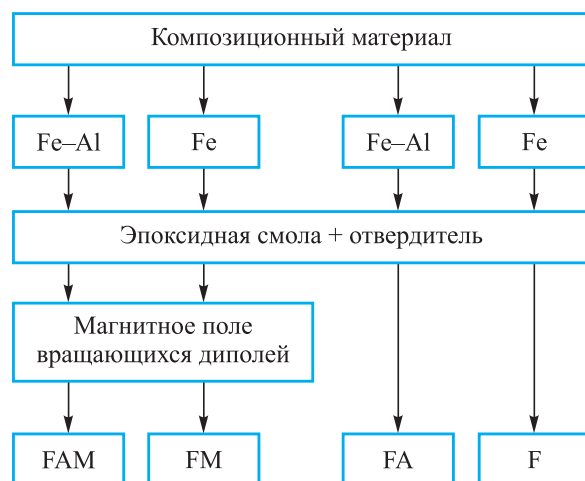


Рис. 1. Блок-схема получения модифицированных эпоксидных композиционных материалов
FAM – Fe–Al (МПВД); FM – Fe (МПВД);
FA – Fe–Al (без МПВД); F – Fe (без МПВД)

Fig. 1. Composite exposure to the magnetic field of rotating dipoles
FAM – Fe–Al (MFRD); FM – Fe (MFRD);
FA – Fe–Al (no MFRD); F – Fe (no MFRD)

Анализ прочностных характеристик

В качестве испытательного оборудования использовался гидравлический пресс с автоматизированным управлением ИП-100М-авто, предназначенный для нагружения образцов статической нагрузкой при испытаниях на сжатие и изгиб.

Скорость нагружения была установлена на уровне 1 мм/мин. По результатам эксперимента строилась кривая «нагрузка – деформация при сжатии». По полученным данным определялось разрушающее напряжение при сжатии и рассчитывалась относительная деформация образцов. Для определения величины деформации во время процесса сжатия осуществлялась видеофиксация с высокой частотой кадров, позволившая получить точные значения.

Разрушающее напряжение при сжатии (σ , МПа) вычисляли по формуле

$$\sigma = F/A,$$

где F – максимальное значение прочности на сжатие, Н; A – площадь сечения исследуемого образца, мм².

Относительную деформацию сжатия при разрушении определяли по уравнению

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\%,$$

где Δh – величина деформации, мм; h_0 – исходная высота образца, мм.

В ходе испытаний визуально наблюдали за поведением образцов. По окончании экспериментов все образцы фотографировали для анализа характера разрушений.

Исследование микроструктуры, элементного состава и распределения компонентов в получен-

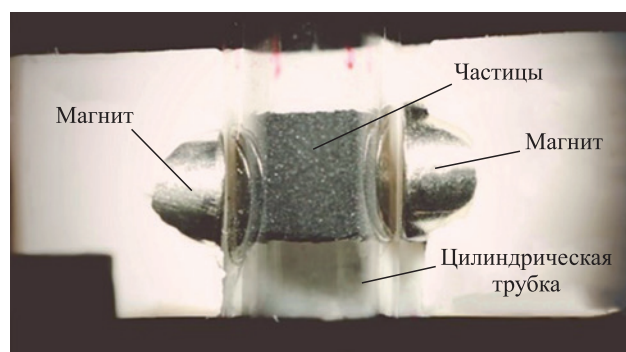


Рис. 2. Схема воздействия магнитного поля вращающихся диполей на материал

Fig. 2. Modified epoxy resin composite manufacturing process

ных образцах КМ осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа EVO HD 15 («Carl Zeiss», Великобритания/Германия) в режиме низкого вакуума (ЕР, 70 Па) при ускоряющем напряжении 20–25 кВ.

Результаты и их обсуждение

Исследование прочностных характеристик

На основании полученных в ходе испытаний данных построены графики зависимости деформации от нагрузки (рис. 3). При сжатии КМ с порошковым наполнителем основная нагрузка приходится на матрицу, так что после ее разрушения величина нагрузки резко снижается. По диаграммам сжатия цилиндрических образцов, представленных на рис. 3, видно, что объемное деформирование композиционных материалов вызывает их размягчение, причем большее для образцов без применения МПВД.

Полученное в результате исследования разрушающее напряжение при сжатии образцов представлено в таблице. Анализируя полученные результаты, стоит отметить, что наиболее прочным (57,5 МПа) оказался КМ на базе наполнителя из Fe–Al, подвергнутый МПВД.

Сравнительный анализ механических характеристик КМ, полученных с наложением МПВД и без него, показал, что образцы с МПВД выдерживают большую нагрузку, что обусловлено более плотному, структурированному распределению частиц в эпоксидной матрице [19].

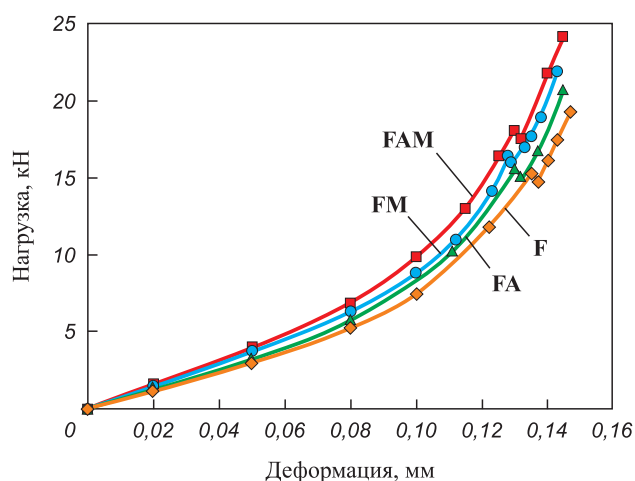


Рис. 3. Кривые деформирования композиционных материалов, полученных по разным технологиям
FAM – Fe–Al (МПВД); FM – Fe (МПВД);
FA – Fe–Al (без МПВД); F – Fe (без МПВД)

Fig. 3. Strain curves for the composites
FAM – Fe–Al (MFRD); FM – Fe (MFRD);
FA – Fe–Al (no MFRD); F – Fe (no MFRD)

Сравнивая твердость образца (44 МПа), имеющего в своем составе только эпоксидную смолу, можно видеть, что у КМ с наполнителем из частиц Fe–Al, полученного с помощью технологии МПВД, этот показатель выше на 30 % (57,5 МПа). При сравнении образцов с наполнителем Fe–Al показатель твердости увеличился на 16,6 % при наложении МПВД.

Рядом авторов был отмечен армирующий эффект от введения дисперсных систем в полимерные матрицы [20]. Так, кремниевая микроразмерная добавка способствовала улучшению прочностных характеристик на 10–15 % [21]. При этом добавление наночастиц кремния позволило увеличить прочность на сжатие эпоксидных композитов на 30 % [22].

Визуальный анализ исследуемых КМ показал, что при сжатии они подвергались хрупкому разрушению (рис. 4). В образцах, полученных с помощью технологии МПВД, образовались трещины по наклонным плоскостям, а у образцов без воздействия МПВД – по продольным. Возможной причиной различия в характере разрушений является упаковка частиц в полимерной матрице, о чем также свидетельствует различие в плотности рассматриваемых композиционных материалов (см. таблицу).

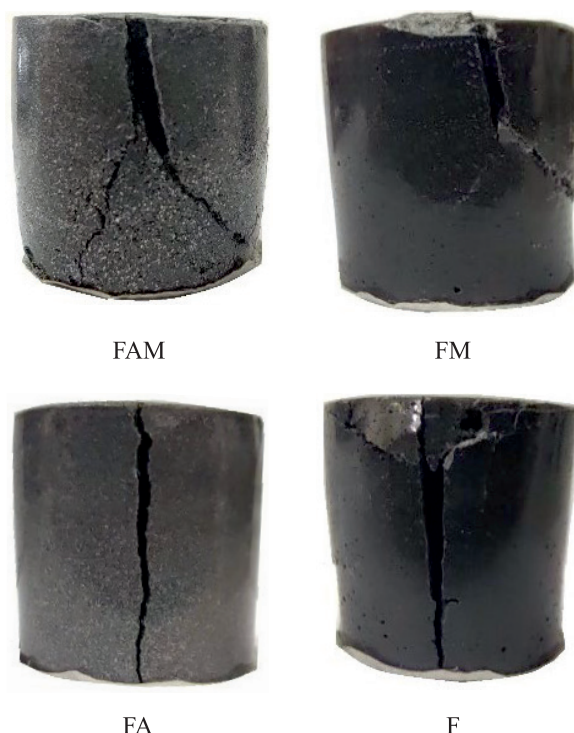


Рис. 4. Фотографии образцов после испытания на сжатие
FAM – Fe–Al (МПВД); FM – Fe (МПВД);
FA – Fe–Al (без МПВД); F – Fe (без МПВД)

Fig. 4. Samples after the compression test
FAM – Fe–Al (MFRD); FM – Fe (MFRD);
FA – Fe–Al (no MFRD); F – Fe (no MFRD)

Механические свойства при сжатии композиционных материалов различного типа

Compressive mechanical properties of the composites

Тип композита	ρ , г/см ³	F_{\max} , кН	σ , МПа	ε , %
FAM (Fe–Al + МПВД)	2,79	18,06	57,5	0,650
FM (Fe + МПВД)	2,86	16,39	52,2	0,635
FA (Fe–Al без МПВД)	2,72	15,48	49,3	0,650
F (Fe без МПВД)	2,64	15,26	48,6	0,675
Эпоксидная смола	1,20	13,80	44,0	0,800

Микроскопический анализ
и карты распределения компонентов
в образцах композиционных
материалов

На рис. 5 представлен срез поверхности КМ, полученных с применением МПВД и без него. Видно, что основным отличием является наличие

воздушных раковин в образце, изготовленном без воздействия МПВД.

Для анализа однородности распределения частиц в КМ были составлены карты распределения компонентов в структуре материала для образцов FA и FAM (рис. 6). Видно, что магнитное поле вращающихся диполей позволяет получить более равномерное их распределение, без образования агломератов частиц.

Закключение

В ходе работы проведено сравнительное экспериментальное исследование прочности при сжатии эпоксидных композиционных материалов цилиндрической формы на базе частиц Fe–Al и Fe. В результате установлено, что образец, полученный при помощи технологии МПВД и имеющий в своем составе частицы Al, оказался самым прочным. Его прочность на сжатие была на 14 % выше, чем у образца без применения МПВД. Это вызвано тем, что воздействие МПВД позволяет удалять возникающую в процессе механосинтеза газовую пористость и раковины во внутренней структуре

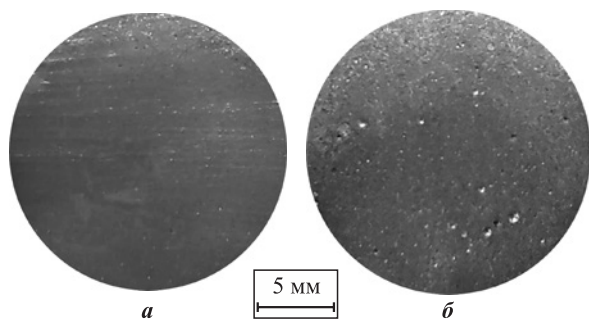


Рис. 5. Структура поверхности композиционных материалов FAM (а) и FA (б)

Fig. 5. Surface structure of the FAM (a) and FA (b) composites

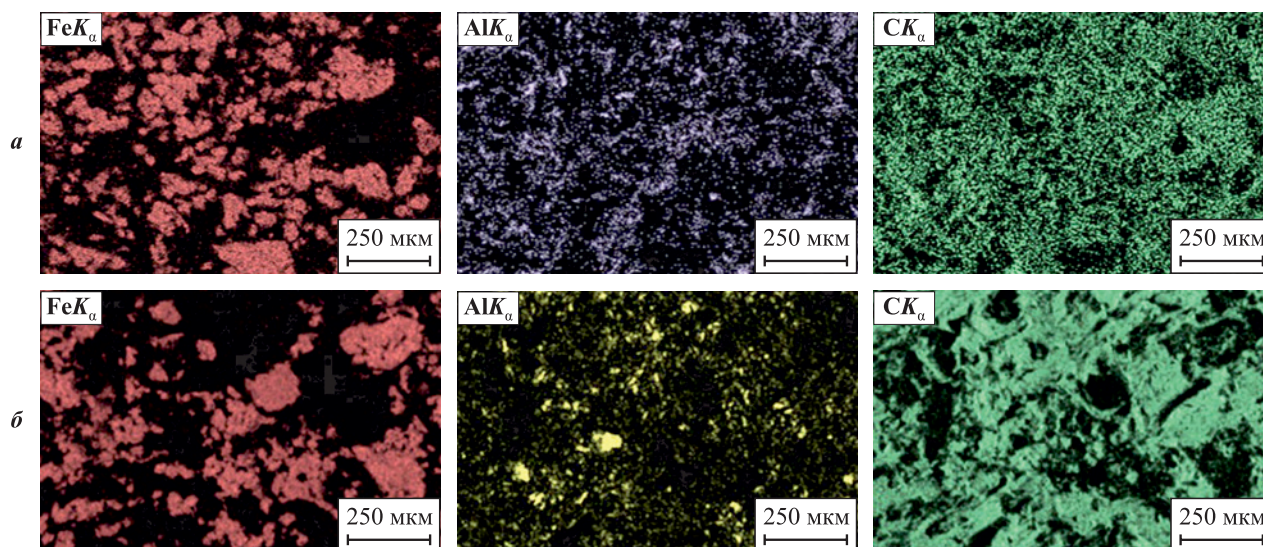


Рис. 6. Карты распределения Fe, Al и C в композиционных материалах FAM (а) и FA (б)

Fig. 6. Fe, Al, and C distribution maps for the FAM (a) and FA (b) samples composites

материала за счет использования процесса, характеризующегося магнитным вакуумированием.

Получаемые эпоксидные КМ могут быть использованы в качестве конструкционных материалов в авиационной и космической отраслях промышленности, а также в качестве материалов адсорберов в радиотехнической аппаратуре и микроэлектронике.

Список литературы / References

1. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор). *Труды ВИАМ*. 2020;6-7(89):29–37.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Trudy VIAM*. 2020;6-7(89):29–37. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
2. Национальная технологическая инициатива (НТИ). URL: <http://fea.ru/compound/national-technology-initiative> (дата обращения: 01.04.2022 г.).
National technology initiative (NTI). URL: <http://fea.ru/compound/national-technology-initiative> (accessed: 01.04.2022 г.). (In Russ.).
3. Алентьев А.Ю., Яблокова М.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 69 с.
4. Тимофеев А.А., Тимошенко В.В. Влияние смесей термопластичных полимерных отходов на физико-механические характеристики полимер-минеральных композиций. В сб.: *Материалы V Республиканской научно-технической конференции молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования»* (г. Гомель, 12–14 ноября 2018 г.). Гомель: Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, НАН Беларуси, 2018. С. 30–31.
5. Кондратьев Д.Н., Журавский В.Г. Использование наноструктурных материалов для повышения надежности РЭА. *Наноиндустрия*. 2008;4:14–18.
Kondratyev D.N., Zhuravskiy V.G. The use of nanostructured materials to increase the reliability of REA. *Nanoin-dustriya*. 2008;4:14–18. (In Russ.).
6. Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Нгуен Дык Ань, Иванова Л.Р. Влияние углеродных нановолокон/нанотрубок на формирование физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМ-ПЭ и ПЭЭК. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2017;60(9):45–51.
<https://doi.org/10.6060/tcct.2017609.7y>
Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Nguyen Duc Anh, Ivanova L.R. Influence of nanofibers/nanotubes on physical-mechanical and tribotechnical properties of polymer composites based on thermoplastic UHMWPE and PEEK matrixes. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2017;60(9):45–51. (In Russ.).
<https://doi.org/10.6060/tcct.2017609.7y>
7. Ozolin A.V., Sokolov E.G., Golius D.A. Obtaining of tungsten nanopowders by high energy ball milling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;862(2):022057.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/2/022057>
8. Нелюб В.А. Количественная оценка адгезионного взаимодействия углеродного волокна и эпоксидного связующего. *Известия вузов. Авиационная техника*. 2016;2(97):97–100.
Nelyub V.A. Quantitative assessment of the adhesive interaction of carbon fiber and epoxy binder. *Izvestiya vuzov. Aviacionnaya tekhnika*. 2016;2(97):97–100. (In Russ.).
9. Липатов Ю.С. Физико-химия наполненных полимеров. Киев: Наук. Думка, 1991. 256 с.
10. Старокадомский Д.Л. Некоторые особенности набухания фотополлимерных композитов с различным содержанием высокодисперсного кремнезёма. *Пластические массы*. 2008;2:33–36.
Starokadomsky D.L. Some features of swelling of photopolymer composites with different content of highly dispersed silica. *Plasticheskie massy*. 2008;2:33–36. (In Russ.).
11. Емелина О.Ю. Композиционные полимерные материалы, модифицированные дисперсными наполнителями, применяемые в строительстве и при ремонте техники. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(3):128–130.
Emelina O.Yu. Composite polymer materials modified with dispersed fillers used in construction and repair of machinery. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2014;17(3):128–130. (In Russ.).
12. Старокадомский Д.Л., Головань С.В., Сигарёва Н.В., Ткаченко А.А., Мошкова Н.М., Кохтыч Л.М., Гарашченко И.И. Возможности усиления прочности и стойкости эпоксид-композитов путём наполнения карбидом кремния и нитридом титана. *Science Rise*. 2019;4:55–59.
<https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.164289>
Starokadomsky D., Golovan S., Sigareva N., Tkachenko O., Moshkovska N., Kokhtych L., Garashchenko I. Possibilities of enhancement of the strength and durability of epoxy composites by silicon carbide and titanium nitride filling. *Science Rise*. 2019;4:55–59. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.164289>
13. Милутин В.А., Гержасьева И.В. Термально активированные трансформации в сплавах с различным типом магнитного упорядочения под высоким магнитным полем. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019;492:165654.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165654>
14. Zuo X., Zhang L., Wang E. Influence of external static magnetic fields on properties of metallic functional materials. *Crystals*. 2017;7(12):374.
<https://doi.org/10.3390/cryst7120374>
15. Zhao J., Yu J.H., Han K., Zhong H.G., Li R.X., Zhai Q.J. Effect of coil configuration design on Al solidified structure refinement. *Metals*. 2020;10(1):153.
<https://doi.org/10.3390/met10010153>
16. Шорсткий И.А., Яковлев Н. Метод формирования материала-поглотителя электромагнитного излучения на

основе магнитоуправляемых частиц Fe_3O_4 . *Перспективные материалы*. 2020;3:70–79.

Shorstkii I.A., Yakovlev N. Method of absorbing material formation based on magnetically controlled particles of Fe_3O_4 . *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020;11(5):1236–1243.

<https://doi.org/10.1134/S2075113320050317>

17. Шорсткий И.А., Соснин М.Д. Способ плакирования порошкового магнитного материала: Патент 2760847 (РФ). 2021.
18. Shorstkii I. Dynamic arrays based on magnetically controlled particles: Synthesis and application. *Materials Research*. 2019;22(4):e20180317.
<http://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0317>
19. Deng S., Ye L., Friedrich K. Fracture behaviours of epoxy nanocomposites with nano-silica at low and elevated temperatures. *Journal of Materials Science*. 2007;42(8):2766–2774. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-1420-x>

20. Горбачева С.Н., Горбунова И.Ю., Кербер М.Л., Антонов С.В. Свойства композиционных полимерных материалов на основе эпоксидной смолы, модифицированных нитридом бора. *Успехи в химии и химической технологии*. 2017;31(11(192)):35–36.

Gorbacheva S.N., Gorbunova I.Y., Kerber M.L., Antonov S.V. The properties of composite polymeric materials based on epoxy resins, modified with boron nitride. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2017;31(11)(192):35–36. (In Russ.).

21. Chow T.S. Size-dependent adhesion of nanoparticles on rough substrates. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003;15(2):L83.

<http://doi.org/10.1088/0953-8984/15/2/111>

22. Vaganova T.A. Synthesis and characterization of epoxy-anhydride polymers modified by polyfluoroaromatic oligoimides. *Journal of Polymer Research*. 2014;21(11):588.
<http://doi.org/10.1007/s10965-014-0588-z>

Сведения об авторах



Максим Дмитриевич Соснин – аспирант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)

ORCID: 0000-0001-6275-6274

E-mail: maksim-sosnin7@mail.ru

Иван Александрович Шорсткий – к.т.н., доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, КубГТУ

ORCID: 0000-0001-5804-7950

E-mail: i-shorstky@mail.ru

Information about the Authors

Maxim D. Sosnin – Graduate Student of the Department of Technological Equipment and Life-Support Systems, Kuban State Technological University (KubSTU)

ORCID: 0000-0001-6275-6274

E-mail: maksim-sosnin7@mail.ru

Ivan A. Shorstkii – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Life-Support Systems, KubSTU

ORCID: 0000-0001-5804-7950

E-mail: i-shorstky@mail.ru

Вклад авторов



М. Д. Соснин – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, проведение расчетов, испытаний образцов, формулировка выводов.

И. А. Шорсткий – обеспечение ресурсами, подготовка эксперимента, проведение экспериментов, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

Contribution of the Authors

M. D. Sosnin – formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, conducting the calculations, testing the samples, formulation of the conclusions.

I. A. Shorstkii – provision of the resources, preparation and management of the experiments, conducting the experiments, formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, formulation of the conclusions.

Статья поступила 05.05.2022 г.
Доработана 27.10.2022 г.
Принята к публикации 31.10.2022 г.

Received 05.05.2022
Revised 27.10.2022
Accepted 31.10.2022