

УДК 621.01

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-256-263

Для цитирования: Семенуха О. В., Воронина С. Ю., Фесик С. А. Исследование влияния гибридного наполнителя на тензочувствительность нанокomпозиционного материала // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 2. С. 256–263. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-256-263.

For citation: Semenukha O. V., Voronina S. Yu., Fesik S. A. [Study of the influence of hybrid filler on the strain sensitivity of nanocomposite material]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 2, P. 256–263. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-256-263.

Исследование влияния гибридного наполнителя на тензочувствительность нанокomпозиционного материала

О. В. Семенуха^{1,2}, С. Ю. Воронина², Фесик С. А.²

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: semenukha.cool@mail.ru

Рефлектор космического аппарата находится в процессе эксплуатации в раскрытом и сложенном положении, поэтому актуальной задачей является разработка тензодатчиков, определяющих положение рефлектора. В работе представлено исследование влияния гибридного наполнителя на величину коэффициента тензорезистивности гибкого тензорезистивного элемента из нанокomпозиционного материала и описан технологический процесс его изготовления методом вакуумной инфузии. В качестве гибридного наполнителя был использован состав, содержащий электропроводящий компонент (углеродные нанотрубки) и твердый компонент (карбид кремния), способствующий равномерному распределению наполнителя в полимерной матрице. С помощью ротационного реометра установлено содержание углеродных нанотрубок (УНТ), при котором достигается предельный уровень вязкости для пропитки связующим стекловолокна. Особенности распределения наполнителя в нанокomпозиционном материале исследовали сканирующим электронным микроскопом в Красноярском региональном центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН. В ходе работы определено влияние содержания гибридного наполнителя на тензорезистивные свойства нанокomпозиционного материала. Максимальные значения коэффициента тензорезистивности наблюдались на начальном этапе исследования (растяжение 0,05 %) – при растяжении на 0,1 мм при общей длине 200 мм у образцов нанокomпозиционного материала с гибридным наполнителем SiC 1, 5 и 10 % – и составляли 38, 40 и 40. Коэффициент тензорезистивности образцов нанокomпозиционного материала с содержанием гибридного наполнителя SiC 1, 5 и 10 % при максимальном растяжении (1 %) составляет около 19, 21 и 22 соответственно.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал (ПКМ), тензорезистивный датчик, нанокomпозиционный материал, мониторинг состояния трансформируемых конструкций, углеродные нанотрубки, углеродный волокнистый наполнитель.

Study of the influence of hybrid filler on the strain sensitivity of nanocomposite material

O. V. Semenukha^{1,2}, S. Yu. Voronina², Fesik S. A.²

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: semenukha.cool@mail.ru

The reflector of spacecraft is in operation in an open and folded position, so an urgent task is to develop strain gauges that determine the position of the reflector. The paper presents a study of the influence of a hybrid filler on the value of the strain resistance coefficient of a flexible strain-resistive element made of a nanocomposite material and describes the technological process of its manufacture using the vacuum infusion method. As a hybrid filler, a composition was used containing an electrically conductive component (carbon nanotubes) and a solid component (silicon carbide), which promotes uniform distribution of the filler in the polymer matrix. Using the rotational rheometer, the content of carbon nanotubes (CNTs) was determined at which the limiting level of viscosity for impregnation of glass fiber with a binder is achieved. The distribution features of the filler in the nanocomposite material were studied using a scanning electron microscope at the Krasnoyarsk Regional Center for Collective Use of the Federal Research Center KSC SB RAS. In the course of the work, the influence of the content of the hybrid filler on the tensor resistive properties of the nanocomposite material was determined. The maximum values of the tensor resistance coefficient were observed at the initial stage of the study (stretching 0.05 %): with a stretch of 0.1 mm with a total length of 200 mm for samples of nanocomposite material with a SiC hybrid filler of 1, 5 and 10 % and is 38, 40 and 40. The tensor resistance coefficient of nanocomposite material samples containing 1, 5 and 10 % SiC hybrid filler at maximum stretch (1 %) is about 19, 21 and 22, respectively.

Keywords: polymer composite material (PCM), strain-sensitive sensor, nanocomposite material, condition monitoring of transformable structures, carbon nanotubes, carbon fiber filler.

Введение

Современные тенденции развития космических систем связи, навигации, радиолокации, астрономии привели к необходимости создания развертываемых в космосе крупногабаритных космических антенн. По мере развития таких конструкций увеличивается интерес в усовершенствовании изготовления и укладки радиоотражающей поверхности в транспортировочном положении трансформируемого рефлектора с разной апертурой. При выборе материала для изготовления сегментов рефлектора, обладающего гибкой поверхностью, обращает на себя внимание композиционный материал на основе эластичного связующего полиметилдисилоксана (ПДМС). Наиболее важными требованиями являются стабильность физико-механических свойств материала при большом перепаде температур от -150 до $+150$ °С, оптическая прозрачность в любой полосе частот, возможность упругого деформирования материала без разрушения для обеспечения раскрытия космических антенн.

Данные о состоянии и положении рефлектора собираются с помощью сенсорных систем, смонтированных на элементах конструкции. Контроль механических нагрузок на элементы конструкции может осуществляться датчиками деформации. Для того чтобы измерить с помощью тензометрического датчика деформацию, напряжение или усилие, используют явление влияния упругой деформации проволоки или полупроводникового стержня на сопротивление материала датчика [1]. Как правило, обычные датчики деформации, изготовленные из металлической фольги и полупроводников, могут обнаруживать только низкие деформации из-за их ограниченной способности к растяжению (примерно $\sim 0,07$ %) [2]. Для увеличения чувствительности датчики деформации производят из композиционных материалов, где полимерная матрица заполнена частицами углеродных нанотрубок (УНТ), графеном или структурными композитами из керамики и металлов. Это позволяет существенно увеличить коэффициент упругости и увеличить диапазон деформаций, которые может измерить датчик [3].

Введение наполнителя в полимерную матрицу изменяет структуру и свойства материала. Освоение эффективных методов введения УНТ в полимерный материал и определение уровня их влияния на количественные результаты конечного продукта, а также технических карт на текущий момент является релевантной и основной задачей в области разработки современных продуктов. Очевидно, что данная технология найдёт широкое применение в производстве конструкций из функциональных материалов из ПДМС [4; 5].

Известно, что углеродные наночастицы и нановолокна обладают комплексом уникальных физико-химических свойств и считаются идеальным армирующим материалом для полимеров.

Многофункциональный наполнитель УНТ улучшает механические свойства материала (жесткость, граница прочности при сжатии), улучшает электропроводность, увеличивает теплопроводность, теплостойкость и придает нанокпозиционному материалу новую функциональную способность. Однако серьезной проблемой получения нанокпозиционного материала является сложность гомогенного распределения УНТ в объеме полимерной матрицы и обеспечение стабильной адгезионной связи с ней. Эта проблема обусловлена сильным ван-дер-ваальсовым взаимодействием УНТ между собой и их склонностью к агрегированию [6].

В настоящее время для получения стабильного нанокпозиционного материала с диспергированными УНТ в основном применяют метод ультразвукового воздействия [7–9]. Для эффективного распределения частиц в объеме полимерной матрицы, его часто комбинируют с другими методами диспергирования:

- методом, состоящим из механического и ультразвукового диспергирования;
- механического и ультразвукового диспергирования с добавлением твердого наполнителя в качестве мелющего агента внутри объема полимерной матрицы;
- ультразвукового диспергирования с использованием магнитной мешалки.

На чувствительность нанокпозиционного материала оказывает влияние метод диспергирования наполнителя в полимерной матрице. Это свидетельствует о том, что при помощи данного фактора можно изменять физико-механические, теплофизические, оптические, электромагнитные и другие эксплуатационные характеристики нанокпозиционного материала. Ранее нами SiC был обработан по технологии, описанной в публикации [10]. Обработка SiC привела к увеличению функциональных групп на поверхности частиц, что способствовало усилению межфазного взаимодействия между частицами наполнителя и полимером. Правильно подобранный способ введения способствует равномерному распределению нанотрубок по объему полимерной матрицы, улучшению их смачивания и адгезии и, соответственно, улучшению характеристик нанокпозиционного материала [11].

Целью данной работы является разработка технологии изготовления гибкого тензорезистивного элемента из гибридного композиционного материала для мониторинга состояния трансформируемых конструкций с уровнем коэффициента тензорезистивности не менее 10.

В процессе разработки технологии изготовления гибкого тензорезистивного элемента необходимо решить следующие задачи:

- разработка методики введения наполнителя для его равномерного распределения в ПДМС;
- разработка технологии изготовления нанокпозиционного материала;
- исследование влияние наполнителей на величину коэффициента тензорезистивности нанокпозиционного материала при растяжении;
- изготовление гибкого тензорезистивного элемента на основе нанокпозиционного материала.

Предметом работы является технология изготовления гибкого тензорезистивного элемента из нанокпозиционного материала.

Эксперимент

В данном исследовании использовались образцы нанокпозиционного материала, состоящие из ПДМС, стеклоткани Т-53, карбида кремния (SiC) фракция F1200 (размер зерна: 2,5–3,5 мкм) и Matrix 603 – концентрат УНТ с содержанием 10 % УНТ от общего состава концентрата. Стеклоткань предварительно была обработана раствором АПТЭС в хлороформе для обеспечения повышенной адгезии ПДМС к волокнистому наполнителю. Для придания материалу электропроводящих свойств в матрицу вводился наполнитель Matrix. В качестве перемешивающего агента (для дополнительного размалывания УНТ по всему объему связующего и предотвращения их агломерации) вводился SiC. Таким образом гибридный наполнитель представляет собой смесь электропроводящего (УНТ) и мелющего агента (SiC). Кроме того, добавление микронаполнителя (SiC) уменьшает свободное пространство связующего, доступное нанопополнителю (в нашем случае УНТ) для формирования проводящих сетей. В ряде исследования применение

гибридного наполнителя увеличивает электропроводность, поскольку УНТ не могут диффундировать в микронаполнитель, представляющий собой твердую частицу [12; 13].

В данной работе за основу бралась технология введения наполнителей в матрицу, описанная нами ранее [14].

Образцы нанокompозита изготавливались методом вакуумной инфузии: стеклоткань пропитывали смесью, состоящей из ПДМС и гибридного наполнителя, в форме с последующим отверждением в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 30 мин. На рис. 1 представлена технологическая схема изготовления гибкого тензорезистивного элемента из нанокompозиционного материала.

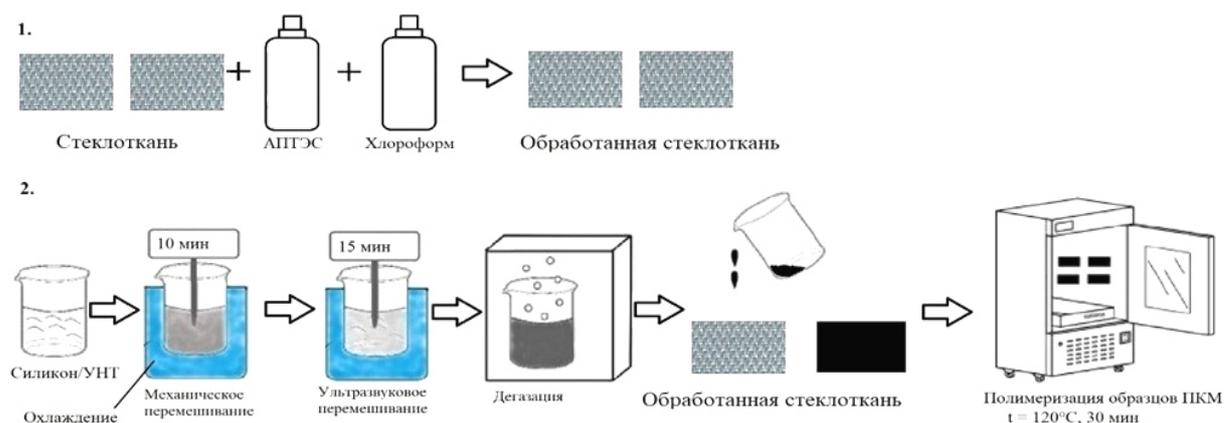


Рис. 1. Технологическая схема изготовления гибкого тензорезистивного элемента из нанокompозиционного материала

Fig. 1. Technological scheme for manufacturing a flexible strain-resistive element made of nanocomposite material

Визуализация морфологических особенностей нанокompозиционного материала осуществлялась в Красноярском региональном центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) высокого разрешения.

На рис. 2 представлена микрофотография наполнителя SiC, на рис. 3 – образца нанокompозиционного материала с гибридным наполнителем.



Рис. 2. СЭМ микрофотография наполнителя SiC
Fig. 2. SEM micrograph of SiC filler

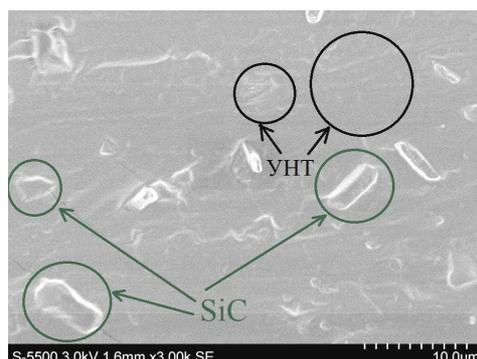


Рис. 3. СЭМ микрофотография образца нанокompозиционного материала с гибридным наполнителем
Fig. 3. SEM micrograph of sample of nanocomposite material with hybrid filler

Технология и качество пропитки армирующего наполнителя существенно зависит от вязкости полимерного связующего, поэтому в данной работе проведено исследование влияния содержания гибридного наполнителя на вязкость неотвержденной матрицы для технологии изго-

товления нанокomпозиционного материала. Известно, что максимальная вязкость связующего, позволяющая проводить вакуумную инфузию, составляет 300 мПа×с [15–17]. Получены результаты определения вязкости модифицированной полимерной матрицы и исходного ПДМС. Определение зависимости вязкости от скорости сдвига проводилось в диапазоне изменения частоты ротора от 0,01 до 100 Гц. Испытания образцов проведены при температуре 25 °С с помощью ротационного реометра. Выявлено, что при содержании 0,15 % УНТ достигается предельный уровень вязкости (250 мПа×с), возможный для пропитки связующим стекловолкна методом вакуумной инфузии. Исходя из этого, для дальнейшей работы было использовано содержание 0,15 % УНТ в гибридном наполнителе, так как при содержании 0,2 % УНТ вязкость наполненной полимерной системы составила 350 мПа×с. В работах И. А. Тимошкина приведена максимальная вязкость связующего, позволяющая проводить вакуумную инфузию, которая составляет 300 мПа×с. Последнее значение существенно превышает максимальную вязкость связующего и не позволяет получить образец композита с качественной пропиткой [15–17].

Были получены образцы нанокomпозиционного материала со следующим содержанием гибридного наполнителя:

- УНТ 0,15 %, SiC 1 %;
- УНТ 0,15 %, SiC 5 %;
- УНТ 0,15 %, SiC 10 %.

Работа тензорезистивного элемента характеризуется коэффициентом тензорезистивности (K):

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}, \quad (1)$$

где R и L – соответственно сопротивление и длина тензорезистивного элемента при отсутствии растяжения; ΔR и ΔL – изменение сопротивления и длины тензорезистивного элемента при растяжении.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента тензорезистивности образцов нанокomпозиционного материала от растяжения (до 2 мм). Образцы представляли собой пластины композита размером 200×20 мм, толщиной 0,3 мм.

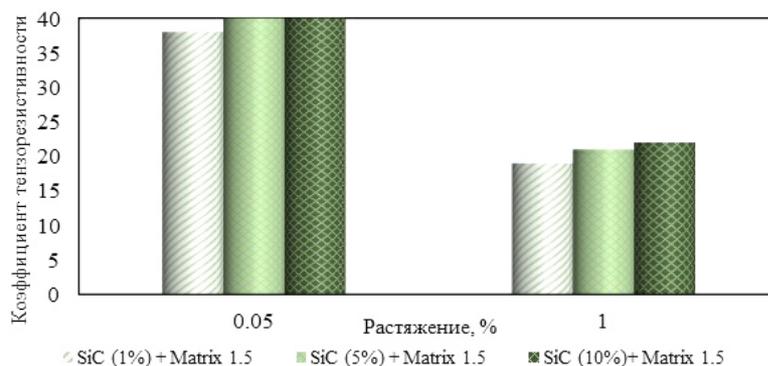


Рис. 4. Зависимость коэффициента тензорезистивности (K) образцов нанокomпозиционного материала с гибридным наполнителем SiC 1, 5 и 10 % от растяжения

Fig. 4. Dependence of the gage factor (C) of samples of nanocomposite material with a SiC hybrid filler of 1, 5 and 10 % on tension

Максимальное значение коэффициента тензорезистивности наблюдалось на начальном этапе исследования (растяжение 0,05 %): при растяжении на 0,1 мм при общей длине 200 мм у образцов нанокomпозиционного материала с гибридным наполнителем SiC 1, 5 и 10 % и составило 38, 40 и 40 соответственно. Коэффициент тензорезистивности образцов нанокomпозиционного мате-

риала с содержанием гибридного наполнителя SiC 1, 5 и 10 % при максимальном растяжении (1 %) составляет около 19, 21 и 22 соответственно.

На рис. 5 представлен полученный гибкий тензорезистивный элемент на основе нанокomпозиционного материала с гибридным наполнителем.

Заключение

Разработана технологии изготовления гибкого тензорезистивного элемента. Для разработки технологии изготовления были решены следующие задачи:

- разработана методика введения наполнителя для его равномерного распределения в ПДМС;
- исследовано влияние гибридного наполнителя на коэффициент тензорезистивности нанокomпозиционного материала. Наибольший коэффициент тензорезистивности зафиксирован у образцов, содержащих УНТ 0,15 %, SiC 5 % и УНТ 0,15 %, SiC 10 %, и составил 40 и 40 соответственно при растяжении 0,1 мм (0,05 % от общей длины образца 200 мм).

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Интеллектуальные материалы и структуры» проекта «Разработка многофункциональных интеллектуальных материалов и структур на основе модифицированных полимерных композиционных материалов, способных функционировать в экстремальных условиях» (Номер темы FEFE-2020-0015).

Acknowledgment

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the implementation by the team of the scientific laboratory “Intelligent Materials and Structures” of the project “Development of multifunctional intelligent materials and structures based on modified polymer composite materials capable of functioning in extreme conditions” (Topic number FEFE-2020-0015).

Библиографические ссылки

1. Ханин М. В., Зайцев Г. П. Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов. М. : Химия, 1990. 256 с.
2. Хошев А. В. Тензорезистивные плёнки и их применение в датчиках давления // Современная техника и технологии. 2014. № 10. С. 59–65.
3. Баженов С. Л. Механика и технология композиционных материалов. М. : Интеллект, 2014. 328 с.
4. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы. М. : Университетская книга ; Логос, 2006. 400 с.
5. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений / И. Д. Краев, О. В. Попков, Е. М. Шульдешов и др. // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). С. 46–60.
6. Соломонов Ю. Методы расчета цилиндрических оболочек из композиционных материалов. М. : Мир, 2009. 910 с.
7. Патент № 2548083 С2 Российская Федерация, МПК C01B 31/02, B82B 3/00, B82Y 40/00. Способ модифицирования углеродных наноматериалов ; № 2013128040/05 ; заявл. 18.06.2013 ; опубл. 10.04.2015 / А. Г. Ткачев, А. В. Мележик, Т. П. Дьячкова ; заявитель ООО «НаноТехЦентр».
8. Червинская А. С. Влияние ультразвуковой обработки на диэлектрическую проницаемость композитов на основе вододисперсионной краски и МУНТ // Углеродные наноструктуры и их



Рис. 5. Гибкий тензорезистивный элемент из нанокomпозиционного материала

Fig. 5. Flexible strain-resistive element made of nanocomposite material

электромагнитные свойства : тр. материалов 4 Росс.-Белорусс. семинара. Томск : Изд-во НТЛ, 2019. С. 29–32.

9. Микитаев А. К., Козлов Г. В. Влияние обработки ультразвуком на структуру углеродных нанотрубок в полимерных нанокомпозитах // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 80–83.

10. A method for modifying the surface of silicon carbide with a controlled number of functional groups on surface / M. Yu. Flerko, S. Yu. Voronina, D. V. Antishin et al. // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2022. Vol. 7, No. 4. P. 281–289.

11. Шерышев М. А., Тихонов Н. Н. Организация и проектирование предприятий переработки пластмасс. СПб. : Профессия. 2018. 384 с.

12. Bao H.-D., Guo Z.-X. Effect of electrically inert particulate filler on electrical resistivity of polymer/multi-walled carbon nanotube composites // Polymer (Guildf). 2008. Vol. 49. P. 3826–3831.

13. Effect interfacial size and multiple interface on electromagnetic shielding of silicon rubber/carbon nanotube composites with mixing segregated particles / D. Yang, J.-R. Tao, Y. Yang et al. // Compos. Struct. 2022. Vol. 292, P. 115.

14. Роль метода введения углеродных нанотрубок на коэффициент тензорезистивности / Е. В. Гребенников, С. Ю. Воронина, М. М. Симуни, О. В. Семенуха // Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч. конф. (09–11 ноября 2022, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. ун-т. 2022. С. 648–650.

15. Термостойкие углепластики с матрицами на основе сополимера бис-фталонитрилов и бис-бензонитрила / И. А. Тимошкин, В. В. Алешкевич, Е. С. Афанасьева и др. // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2020. Т. 62, № 2. С. 174–185.

16. Патент № 2598608 С2 Российская Федерация, МПК С08G 18/08, С08G 18/66, С08L 75/04. Полиуретановые композиты, полученные с помощью вакуумной инфузии ; № 2013147457/04 ; заявл. 20.03.2012 ; опубл. 27.09.2016 / У. И. Юнс ; заявитель БАЙЕР МАТИРИАЛЬСАЙЕНС ЛЛСИ.

17. Патент № 2527086 С2 Российская Федерация, МПК С08L 63/00. Эпоксидное связующее для полимерных композиционных материалов ; № 2012149800/05 ; заявл. 22.11.2012 ; опубл. 27.08.2014 / В. А. Нелюб, И. А. Буянов, А. С. Бородулин и др. ; заявитель МГТУ им. Н. Э. Баумана.

References

1. Khanin M. V., Zaitsev G. P. *Iznashivanie i razrushenie polimernyh kompozitsionnykh materialov* [Wear and destruction of polymer composite materials]. Moscow, Himiya Publ., 1990, 256 p.

2. Khoshev A. V. [Strain-resistive films and their application in pressure sensors]. *Sovremennaja tehnika i tehnologii*. 2014. No. 10. P. 59–65 (In Russ.).

3. Bazhenov S. L. *Mehanika i tehnologija kompozitsionnykh materialov* [Mechanics and technology of composite materials]. Moscow, Intellect Publ., 2014, 328 p.

4. Bataev A. A., Bataev V. A. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. Moscow, Universitetskaja kniga, Logos Publ., 2006, 400 p.

5. Kraev I. D., Popkov O. V., Shuldeshov E. M., Sorokin A. E., Jurkov G. Ju. [Prospects for the use of organosilicon polymers in the creation of modern materials and coatings for various purposes]. *Trudy VIAM*. 2017, No. 12, P. 46–60 (In Russ.).

6. Solomonov Yu. *Metody rascheta cilindricheskikh obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Methods for calculating cylindrical shells made of composite materials]. Moscow, Fiziko-matematicheskaja literature Publ., 2009, 910 p.

7. Tkachev A. G., Melezhik A. V., Dyachkova T. P. *Sposob modifitsirovaniya uglerodnykh nanomaterialov* [Method for modifying carbon nanomaterials]. Patent RF, No. 2548083, 2013.

8. Chervinskaya A. S. [The influence of ultrasonic treatment on the dielectric constant of composites based on water-dispersed paint and MWCNTs]. *Trudy materialov Chetvertogo Rossiyskogo Belorusskogo seminara "Uglerodnye nanostruktury i ikh elektromagnitnye svoystva"*

[Proc. 4th Russian Belarusian Semin. “Carbon nanostructures and their electromagnetic properties”]. Tomsk, 2019, P. 29–32 (In Russ.).

9. Mikitaev A. K., Kozlov G. V. [Effect of ultrasonic treatment on the structure of carbon nanotubes in polymer nanocomposites]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2015, No. 2, P. 80–83 (In Russ.).

10. Flerko M. Yu., Voronina S. Yu., Antishin D. V., Shalygina T. A., Semenukha O. V. A method for modifying the surface of silicon carbide with a controlled number of functional groups on surface. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2022, Vol. 7, No. 4, P. 281–289.

11. Sheryshev M. A., Tikhonov N. N. *Organizatsiya i proektirovanie predpriyatiy pererabotki plastmass* [Organization and design of plastics processing enterprises]. St.Petersburg, Professiya Publ., 2018, 384 p.

12. Bao H.-D., Guo Z.-X. Effect of electrically inert particulate filler on electrical resistivity of polymer/multi-walled carbon nanotube composites. *Polymer (Guildf)*. 2008, Vol. 49, P. 3826–3831.

13. Yang D., Tao J.-R., Yang Y., He Q.-M., Weng Y.-X., Fei B., Wang M. Effect interfacial size and multiple interface on electromagnetic shielding of silicon rubber/carbon nanotube composites with mixing segregated particles. *Compos. Struct.* 2022, Vol. 292, P. 115.

14. Grebennikov E. V., Voronina S. Yu., Simunin M. M., Semenukha O. V. [The role of the method of introducing carbon nanotubes on the tensor resistivity coefficient]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Reshetnev readings: materials of the XXVI Intern. scientific-practical. conf.]. Krasnoyarsk, 2022, No. 1, P. 648–650 (In Russ.).

15. Timoshkin I. A., Aleshkevich, V. V., Afanas'eva E. S., Bulgakov B. A., Babkin A. V., Kepman A. V., Avdeev V. V. Heat-resistant carbon plastics with matrices based on a copolymer of bis-phthalonitriles and bis-benzonitrile]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*. 2020, Vol. 62, No. 2, P. 174–185 (In Russ.).

16. Youns W. I. *Poliuretanovye kompozity, poluchennyye s pomoshh'yu vakuumnoy infuzii* [Polyurethane composites obtained using vacuum infusion]. Patent RF, No. 2598608, 2012.

17. Nelyub V. A., Buyanov I. A., Borodulin A. S., Chudnov I. V., Aleksandrov I. A., Muranov A. N., Kuznetsova M. N. *Jepoksidnoe svyazujushhee dlja polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Epoxy binder for polymer composite materials]. Patent RF, No. 2527086, 2014.

© Семенуха О. В., Воронина С. Ю., Фесик С. А., 2024

Семенуха Оксана Викторовна – инженер-технолог, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»; аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: semenukha.cool@mail.ru.

Воронина Светлана Юрьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры ресурсного центра коллективного пользования «Космические аппараты и системы»; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: simkina_svetlana@mail.ru.

Фесик Семён Александрович – студент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: semafesik@mail.ru.

Semenukha Oksana Viktorovna – engineer-technologist; JSC “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”; postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: semenukha.cool@mail.ru.

Voronina Svetlana Yurievna – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of the Resource Center for Collective Use “Spacecraft and Systems”; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: simkina_svetlana@mail.ru.

Fesik Semyon Aleksandrovich – student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: semafesik@mail.ru.
