Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-344-350 Оригинальная статья/Research article
УДК 618 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Свойства демпфирующих полимерных композиционных материалов на основе полидиметилсилоксана, модифицированного многостенными углеродными нанотрубками

Сергей А. Глызин [1] boss.glyzin@mail.ru 0009-0002-6607-7679
Светлана Ю. Воронина [1] simkina_svetlana@mail.ru 0000-0003-3804-2807
Александра А. Хохлова [1] ruddie.ax@ya.ru 0009-0004-7615-0774
Антон А. Мирошниченко [1] ant_mir_03@mail.ru 0009-0001-1110-9541

[1] Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр-т Мира, 82, г. Красноярск, 660049, Россия

Аннотация. Исследовано влияние ультразвуковой обработки на свойства демпфирующих полимерных композиционных материалов на основе силиконовой матрицы, модифицированной многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ). Образцы получали с применением только механического перемешивания и с включением дополнительной ультразвуковой обработки на стадии приготовления наполненной композиции. Содержание МУНТ в образцах составляло 0,10; 0,30 и 0,50 % масс. Массу образцов определяли на аналитических весах, плотность - методом гидростатического взвешивания, вязкоупругие свойства - методом динамического механического анализа по значениям E′, E″ и tan δ. Установлено, что предложенная технология обеспечивает получение цилиндрических образцов с близкими значениями массы и плотности. При исследованных концентрациях влияние ультразвуковой обработки на плотность выражено несущественно: различия между технологическими сериями сопоставимы с погрешностью измерения. При этом параметры динамического механического анализа изменяются более заметно и зависят от концентрации МУНТ и способа подготовки наполненной системы. Показано, что свойства демпфирующих композитов определяются не только содержанием МУНТ, но и особенностями технологии диспергирования.

Ключевые слова: полидиметилсилоксан, многостенные углеродные нанотрубки, ультразвуковая обработка, демпфирующие материалы, динамический механический анализ, плотность, масса, полимерные композиционные материалы..

Properties of damping polymer composite materials based on polydimethylsiloxane modified with multi-walled carbon nanotubes

Sergey A. Glyzin [1] boss.glyzin@mail.ru 0009-0002-6607-7679
Svetlana Y. Voronina [1] simkina_svetlana@mail.ru 0000-0003-3804-2807
Alexandra A. Khokhlova [1] ruddie.ax@ya.ru 0009-0004-7615-0774
Anton A. Miroshnichenko [1] ant_mir_03@mail.ru 0009-0001-1110-9541

[1] Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Mira Av., 82, Krasnoyarsk, 660049, Russia

Abstract. The effect of ultrasonic treatment on the properties of damping polymer composite materials based on a silicone matrix modified with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) was investigated. The samples were prepared by mechanical mixing only and by mechanical mixing with an additional ultrasonic treatment stage during preparation of the filled composition. The MWCNT content in the samples was 0.10, 0.30 and 0.50 wt.%. The sample mass was determined using analytical balances, density was measured by hydrostatic weighing, and viscoelastic properties were evaluated by dynamic mechanical analysis using E′, E″ and tan δ. It was found that the proposed technology provides cylindrical samples with close mass and density values. At the studied concentrations, the effect of ultrasonic treatment on density was insignificant: the differences between the technological series were comparable with the measurement uncertainty. At the same time, dynamic mechanical analysis parameters changed more markedly and depended on the MWCNT concentration and on the preparation method of the filled system. The results show that the properties of damping composites are determined not only by the MWCNT content, but also by the features of dispersion technology and formation of the internal structure of the composite.

Keywords: polydimethylsiloxane, multi-walled carbon nanotubes, ultrasonic treatment, damping materials, dynamic mechanical analysis, density, mass, polymer composite materials.

Для цитирования
Глызин С.А., Воронина С.Ю., Мирошниченко А.А., Хохлова А.А. Свойства демпфирующих полимерных композиционных материалов на основе полидиметилсилоксана, модифицированного многостенными углеродными нанотрубками // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 344–350. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-344-350

For citation
Glyzin S.A., Voronina S.Y., Miroshnichenko A.A., Khoklova A.A. Properties of damping polymer composite materials based on polydimethylsiloxane modified with multi-walled carbon nanotubes. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 344–350. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-344-350

© 2026, Глызин С.А. и др. / Glyzin S.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Демпфирующие полимерные материалы применяются для снижения негативного воздействия вибраций на конструкционные, электронные и измерительные узлы технических систем. Для таких материалов важны не только вязкоупругие свойства, но и воспроизводимость технологии получения, поскольку пористость, неравномерное распределение наполнителя и различия в массе образцов приводят к разбросу плотности и эксплуатационных характеристик изделий [1].

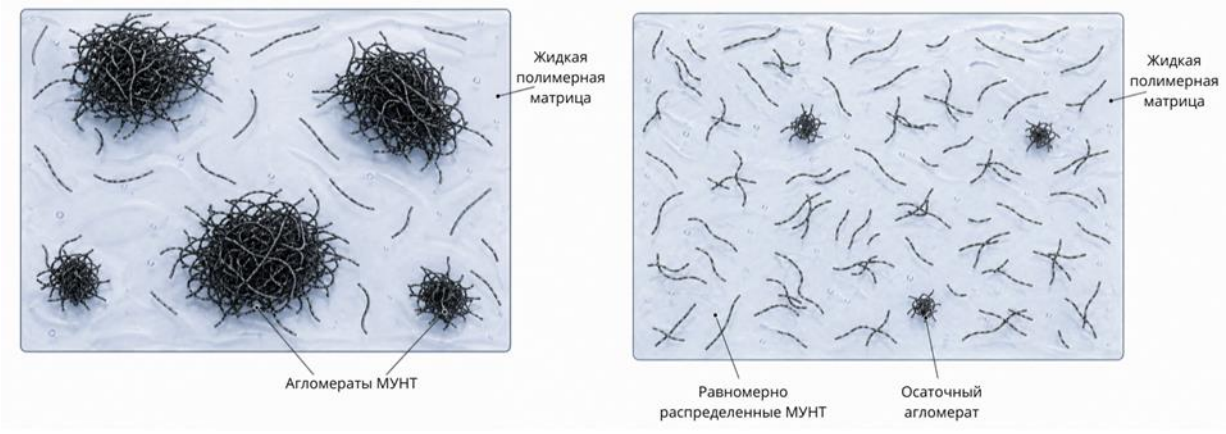
Особенно значимым данный вопрос является для малогабаритных технических систем, в том числе беспилотных летательных аппаратов, где демпфирующие элементы имеют ограниченные размеры и работают в условиях постоянного вибрационного воздействия. В таких условиях даже локальная неоднородность материала может приводить к нестабильности поведения демпфирующего элемента и снижению воспроизводимости его характеристик [2].

Полидиметилсилоксановые (ПДМС) материалы представляют интерес как матрица для демпфирующих композитов благодаря эластичности, химической инертности, технологичности формования и пригодности для изготовления мягких полимерных элементов сложной геометрии [3]. Введение углеродных наноматериалов, включая МУНТ, позволяет направленно изменять структуру наполненной системы и формировать функциональные свойства полимерных композитов [4], однако одновременно усложняет процесс получения однородной композиции.

МУНТ характеризуются высоким отношением длины к диаметру, развитой удельной поверхностью и склонностью к образованию спутанных пучков-агломератов. При введении такого порошка в вязкую силиконовую матрицу механическое перемешивание не всегда обеспечивает полное разрушение агломератов и удаление воздуха, удерживаемого внутри пучков нанотрубок и между ними. В результате в отвержденном материале могут сохраняться поры, локальные включения наполнителя и участки с различной плотностью.

Одной из техноло-гических операций, применяемых для повышения степени диспергирования МУНТ, является ультразвуковая обработка. В литературе отмечается, что акустическая кавитация способствует разрушению агломератов МУНТ, их распределению в полимерной среде и повышению однородности наполненной системы, что схематично показано на рисунке 1б [5, 7]. Однако при малых концентрациях нанонаполнителя влияние ультразвуковой обработки на плотность может быть незначительным, поэтому технологию получения демпфирующих ПКМ необходимо оценивать не по одному параметру, а по совокупности плотности, массы и вязкоупругого отклика материала.

Цель работы – получение демпфирующих полимерных композиционных материалов на основе ПДМС, модифицированного МУНТ, и оценка влияния технологической схемы с ультразвуковой обработкой на плотность, массу и вязкоупругие характеристики полученных образцов.



(a) (b)

Рисунок 1. Схематичное распределение углеродного наноматериала без ультразвуковой обработки (a) и после ультразвуковой обработки (b)

Figure 1. Schematic distribution of carbon nanomaterial without ultrasonic treatment (a) and with ultrasonic treatment (b)

Материалы и методы

Объектом исследования являлись демпфирующие полимерные композиционные материалы на основе двухкомпонентного силикона Flexilis R200 (Россия). Компонент А представляет собой силиконовый каучук на основе ПДМС, компонент В – отвердитель на основе платинового катализатора. Смешение компонентов А:В проводили в массовом соотношении 1:1 в соответствии с техническим описанием материала Flexilis R200 [9].

В качестве нанодисперсного модификатора использовали МУНТ производства ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов, Россия), представляющие собой порошкообразный углеродный наноматериал в виде спутанных пучков многостенных трубок (рисунок 2). Исследование морфологических особенностей МУНТ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения FE-SEM S-5500 (Япония) [8]. Основные параметры использованных МУНТ: диаметр 8–15 нм, длина более 2 мкм, насыпная плотность 0,020 г/см³. Насыпную плотность углеродных наноструктур определяли по ГОСТ 25699.14–93. Содержание МУНТ в композиции составляло 0,10; 0,30 и 0,50% масс.

Образцы изготавливали в лабораторных условиях с использованием аналитических весов Госметр ВЛ-224В (Россия), доукомплектованных набором для определения плотности SMK-401 (Госметр, Россия). Массу образцов определяли на аналитических весах, плотность – методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 15139–69 [10]. Образцы формовали в виде цилиндров высотой 10 мм и диаметром 12 мм. Выбор формы образцов обусловлен требованиями методики определения плотности и последующих испытаний на сжатие [11].

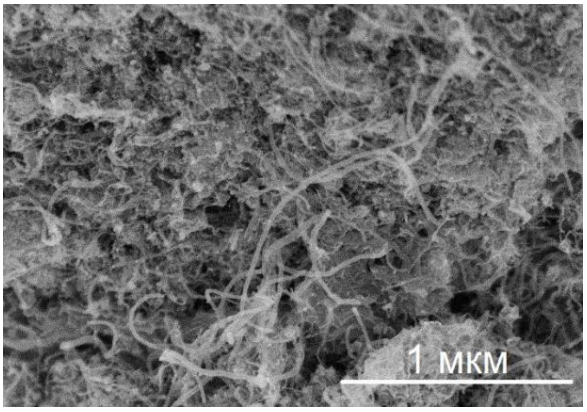


Рисунок 2. СЭМ-изображение МУНТ

Figure 2. SEM image of MWCNTs

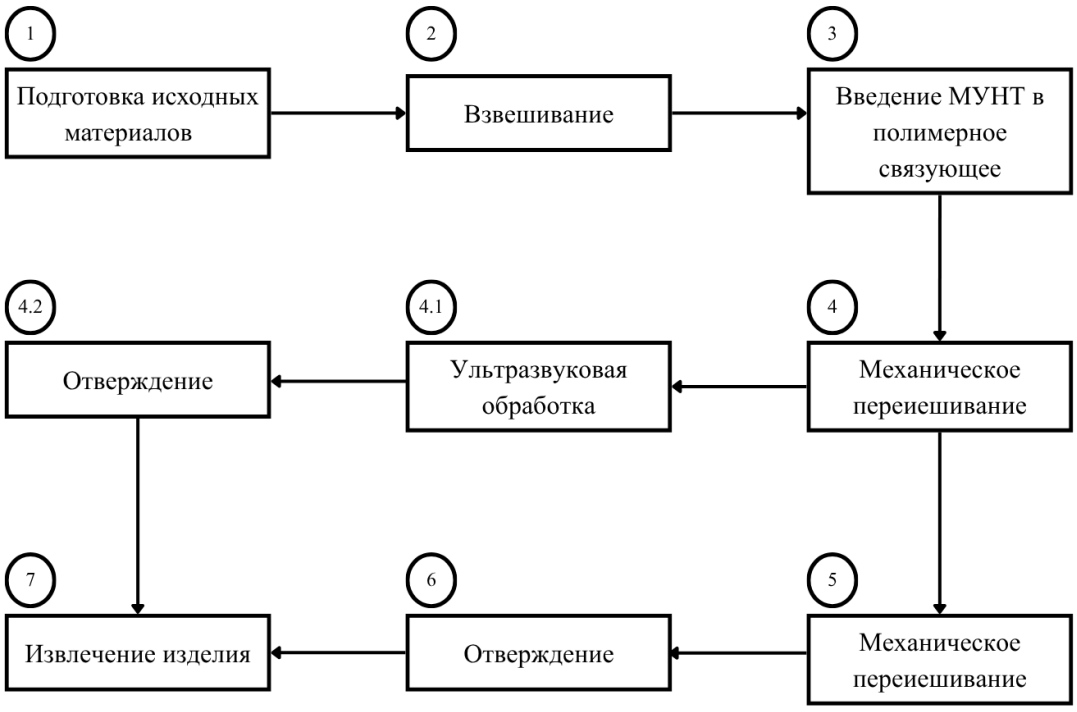


Рисунок 3. Технология изготовления демпфирующих ПКМ

Figure 3. Manufacturing technology of damping polymer composite materials

На первой стадии приготовления в компонент А вводили МУНТ и проводили механическое перемешивание на верхнеприводной мешалке US-2000A (ULAB, Китай) при скорости 150 об/мин в течение 2 мин. Для серий с ультразвуковой обработкой после первичного перемешивания композицию дополнительно диспергировали в ультразвуковой ванне ПСБ-4035–05 (ПСБ-Галс, Россия) в течение 15 мин при фактической рабочей частоте 40 кГц и температуре 25 °С, после чего повторно перемешивали на верхнеприводной мешалке US-2000A при скорости 150 об/мин в течение 2 мин.

Далее в смесь вводили компонент В в массовом соотношении А : В = 1 : 1 и вновь перемешивали при 150 об/мин в течение 2 мин. Полученную композицию дегазировали в вакуум-эксикаторе в течение 10 мин при остаточном давлении 0,1 мбар с использованием пластинчато-роторного вакуумного насоса WELCH CRV PRO4 (Welch Vacuum, США), затем заливали в оснастку. Отверждение осуществляли при температуре 25 °С в течение 24 ч. Общая схема технологии изготовления демпфирующих ПКМ представлена на рисунке 3.

Вязкоупругие свойства полученных материалов оценивали методом динамического механического анализа (ДМА). Для сопоставления техноло-гических серий использовали значения модуля упругости E′, модуля механических потерь E″ и тангенса угла механических потерь tan δ при частоте 100 Гц и температуре 25 °С

Результаты

В таблице 1 приведены значения вязкоупругих характеристик, плотности и массы образцов демпфирующих ПКМ, полученных по двум технологическим схемам: без ультразвуковой обработки и с ультразвуковой обработкой наполненной композиции. Таблица объединяет результаты ДМА с плотностными и массовыми характеристиками, поэтому позволяет рассматривать технологию получения материала не только как последовательность операций, но и как фактор формирования итоговых свойств образцов.

Таблица 1.

Динамические механические характеристики, плотность и масса образцов демпфирующих ПКМ на основе R200

Table 1.

Dynamic mechanical characteristics, density and mass of damping polymer composite samples based on R200

Образец Sample	Без ультразвуковой обработки Without ultrasonic treatment				С ультразвуковой обработкой With ultrasonic treatment			
	E′, кПа	E″, кПа	tan δ	ρ, г/см³	E′, кПа	E″, кПа	tan δ	ρ, г/см³
R200 исх	57,12 ± 2,86	39,57 ± 1,98	0,90 ± 0,05	1,083 ± 0,054				
R200 МУНТ 0,10%	115,30 ± 5,77	83,04 ± 4,15	0,73 ± 0,04	1,085 ± 0,054	121,30 ± 6,07	25,68 ± 1,28	0,19 ± 0,01	1,084 ± 0,054
R200 МУНТ 0,30%	137,30 ± 6,87	33,21 ± 1,66	0,21 ± 0,01	1,085 ± 0,054	151,20 ± 7,56	32,03 ± 1,60	0,24 ± 0,01	1,084 ± 0,054
R200 МУНТ 0,50%	171,00 ± 8,55	104,60 ± 5,23	0,28 ± 0,01	1,086 ± 0,054	107,20 ± 5,36	32,30 ± 1,62	0,29 ± 0,01	1,082 ± 0,054

Полученные данные показывают, что предложенная технологическая схема обеспечивает получение демпфирующих ПКМ с близкими значениями плотности и массы в пределах исследованного диапазона концентраций МУНТ. Для серии без ультразвуковой обработки плотность возрастает от 1,083 г/см³ для исходного R200 до 1,086 г/см³ для состава с 0,50% масс. МУНТ. Относительное изменение составляет около 0,24%, что указывает на умеренное влияние малых концентраций нанодисперсного наполнителя на плотность материала. Для серии с ультразвуковой обработкой значения плотности находятся в диапазоне 1,082–1,085 г/см³, а для наполненных образцов различаются еще меньше. Разность плотности между парными образцами одной концентрации не превышает 0,003 г/см³ и сопоставима с приведенной погрешностью измерения. При этом для наполненных полимерных систем кажущаяся плотность может определяться не только содержанием нанодисперсного наполнителя, но и пористостью, объемом газовой фазы и особенностями формирования внутренней структуры материала [12–14].

Масса стандартных наполненных образцов также изменяется в узком диапазоне: от 1,224 до 1,228 г. Разброс массы для наполненных серий составляет менее 0,004 г, что подтверждает воспроизводимость формования

образцов при использованной технологии. Поэтому плотность и масса в данной работе рассматриваются как технологические показатели, позволяющие контролировать стабильность получения демпфирующих ПКМ, но не как единственные критерии эффективности ультразвуковой обработки.

Результаты ДМА показывают, что изменение вязкоупругих характеристик выражено сильнее, чем изменение плотности. В серии без ультразвуковой обработки модуль накопления E′ возрастает от 57,12 кПа для исходного R200 до 171,00 кПа для состава с 0,50% масс. МУНТ, что соответствует ожидаемому упрочняющему влиянию углеродного нанонаполнителя на полимерную матрицу. Модуль механических потерь E″ и tan δ изменяются немонотонно, что указывает на сложное взаимодействие процессов армирования, межфазного трения и перераспределения внутренних механических потерь в композите [1, 3, 6].

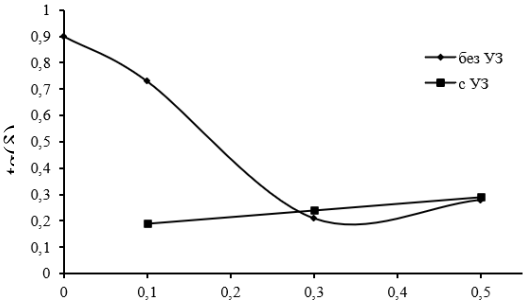


Рисунок 4. Изменение тангенса угла механических потерь демпфирующих ПКМ в зависимости от содержания МУНТ

Figure 4. Change in the mechanical loss tangent of damping polymer composite materials depending on MWCNT concentration

Анализ зависимости tan δ от содержания МУНТ показывает, что ультразвуковая обработка способствует снижению внутренних механических потерь в исследованных образцах ПКМ. Это связано с более равномерным распределением МУНТ в объеме полимерной матрицы и формированием более упорядоченной внутренней структуры демпфирующего ПКМ. Снижение tan δ при отдельных концентрациях МУНТ может быть связано с более однородным распределением наполнителя в полимерной матрице и уменьшением внутренних механических потерь.

В серии с ультразвуковой обработкой эффект также не является однозначным: при 0,10 и 0,30% масс. МУНТ модуль E′ выше, чем в соответствующих образцах без ультразвуковой обработки, однако при 0,50% масс. МУНТ он снижается до 107,20 кПа. Это показывает, что ультразвуковая обработка при выбранном режиме не может рассматриваться как универсальный фактор повышения всех свойств материала. Ее роль заключается прежде всего в изменении состояния наполненной системы: деагломерации МУНТ, перераспределении нанонаполнителя в матрице и изменении внутренней структуры композита [5, 7, 15, 16].

Таким образом, новизна работы состоит в технологическом сопоставлении двух схем получения демпфирующих ПКМ с одновременным учетом плотности, массы и параметров ДМА. Установлено, что ультразвуковая обработка в исследованном режиме оказывает ограниченное влияние на технологические параметры материала на основе ПДМС (плотность и массу), однако существенно изменяет его вязкоупругие свойства. Полученные результаты подтверждают, что эффективность демпфирующих ПКМ (в диапазоне концентраций нанонаполнителя 0,1–0,5%) определяется не только содержанием МУНТ, но и особенностями технологии диспергирования и формирования внутренней структуры композита.

Заключение

В работе реализована технология получения демпфирующих ПКМ на основе силиконового связующего Flexilis R200, модифицированного МУНТ, по двум технологическим схемам: без ультразвуковой обработки и с ультразвуковой обработкой наполненной композиции.

Показано, что предложенная технология обеспечивает получение цилиндрических образцов с близкими значениями массы и плотности. Для наполненных образцов масса изменяется в диапазоне 1,224–1,228 г, а плотность – в диапазоне 1,082–1,086 г/см³, что подтверждает воспроизводимость формования при использованных техноло-гических режимах.

Установлено, что при концентрациях МУНТ 0,10–0,50% масс. влияние ультразвуковой обработки на плотность выражено несущественно: различия между технологическими сериями сопоставимы с погрешностью измерения. Следовательно, в данном диапазоне концентраций ультразвуковая обработка не является самостоятельным фактором существенного изменения плотности материала.

Параметры ДМА при частоте 100 Гц изменяются заметнее, чем плотность и масса: введение МУНТ влияет на E′, E″ и tan δ, однако характер изменения зависит от концентрации

наполнителя и способа подготовки наполненной системы. Это подтверждает необходимость комплексной оценки технологии получения демпфирующих ПКМ по совокупности плотностных и вязкоупругих характеристик.

Научно-технологическая новизна работы состоит в том, что выявлено расхождение между слабым изменением плотности и более выраженным изменением вязкоупругого отклика при изменении технологической схемы. Это позволяет рассматривать технологию получения как самостоятельный фактор формирования свойств демпфирующих полимерных композитов.

Литература

1 Sujon M.A.S., Islam A., Nadimpalli V.K. Damping and sound absorption properties of polymer matrix composites: A review // Polymer Testing. 2021. Vol. 104. Art. 107388. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107388.

2 Li Z. et al. Development and Design Methodology of an Anti-Vibration System on Micro-UAVs // International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV 2017). Toulouse, France, 18–22 September 2017. Paper IMAV2017–32. URL: http://www.imavs.org/pdf/imav.2017.32 (дата обращения: 18.04.2026).

3 Ariati R., Sales F., Souza A., Lima R.A., Ribeiro J. Polydimethylsiloxane Composites Characterization and Its Applications: A Review // Polymers. 2021. Vol. 13. No. 23. Art. 4258. DOI: 10.3390/polym13234258.

4 Филимонова А.А., и др. Создание электропроводящего композита с полимерными материалами для 3D-печати на основе поверхностной модификации // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87. № 3. С. 241–248. DOI: 10.20914/2310–1202–2025–3–241–248.

5 Huang Y.Y., Terentjev E.M. Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties // Polymers. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 275–295. DOI: 10.3390/polym4010275.

6 Laftah W.A., Abdul Rahman W.A.W., Ibrahim A.N. Effects of carbon nanotube and curing agent concentrations on the mechanical, thermal and electrical properties of polydimethylsiloxane: optimization and statistical analysis // RSC Advances. 2025. Vol. 15. P. 14838–14847. DOI: 10.1039/D5RA01890K.

7 Sabet S.M., Mahfuz H., Hashemi J. et al. Effects of sonication energy on the dispersion of carbon nanotubes in a vinyl ester matrix and associated thermo-mechanical properties // Journal of Materials Science. 2015. Vol. 50. P. 4729–4740. DOI: 10.1007/s10853–015–9024-y.

8 Voronina S., et al. The influence of the carbon nanofiller in the PDMS-based composites on the strain resistive effect // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2025. Vol. 33. No. 7. P. 754–765. DOI: 10.1080/1536383X.2025.2454397.

9 Силикон формовочный на основе платины Flexilis R200, полупрозрачный // Композит Строй: каталог материалов. URL: https://www.composit-stroy.ru/catalog/silicone/1502/ (дата обращения: 03.05.2026).

10 ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). Москва: Издательство стандартов, 1969.

11 ГОСТ 4651–2014 (ISO 604:2002). Пластмассы. Метод испытания на сжатие. Москва: Стандартинформ, 2015. 23 с.

12 Stanciu N.–V., Stan F., Sandu I.–L., Fetecau C., Turcanu A.–M. Thermal, rheological, mechanical, and electrical properties of polypropylene/multi-walled carbon nanotube nanocomposites // Polymers. 2021. Vol. 13. No. 2. Art. 187. DOI: 10.3390/polym13020187.

13 Xu X., et al. The synthesis and properties of isocyanate-based polyimide foam composites containing MWCNTs of various contents and diameters // RSC Advances. 2022. Vol. 12. P. 5546–5556. DOI: 10.1039/D1RA06721D.

14 Rezvantalab H., Ghazi N., Ambrusch M.J., Infante J., Shojaei-Zadeh S. An aqueous-based approach for fabrication of PVDF/MWCNT porous composites // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Art. 1716. DOI: 10.1038/s41598–017–01770–9.

15 Liu C.–X., Choi J.–W. Improved dispersion of carbon nanotubes in polymers at high concentrations // Nanomaterials. 2012. Vol. 2. No. 4. P. 329–347. DOI: 10.3390/nano2040329.

16 Moseenkov S.I. et al. Effect of ultrasonic treatment on the properties of multiwalled carbon nanotubes-polymethylmethacrylate composites: effect of applied voltage and pressure on conductivity of the composites // Express Polymer Letters. 2019. Vol. 13. No. 12. P. 1057–1070. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2019.92.

References

1 Sujon M.A.S., Islam A., Nadimpalli V.K. Damping and sound absorption properties of polymer matrix composites: A review. Polymer Testing, 2021, vol. 104, article 107388. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107388.

2 Li Z., et al. Development and Design Methodology of an Anti-Vibration System on Micro-UAVs. International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV 2017), Toulouse, France, 18–22 September 2017, paper IMAV2017–32. Available at: http://www.imavs.org/pdf/imav.2017.32 (accessed 18 April 2026).

3 Ariati R., Sales F., Souza A., Lima R.A., Ribeiro J. Polydimethylsiloxane Composites Characterization and Its Applications: A Review. Polymers, 2021, vol. 13, no. 23, article 4258. DOI: 10.3390/polym13234258.

4 Filimonova A.A., et al. Creation of an electrically conductive composite with polymer materials for 3D-printing based on surface modification. Proceedings of VSUET, 2025, vol. 87, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.20914/2310-1202-2025-3-241-248. (in Russian).

5 Huang Y.Y., Terentjev E.M. Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties. Polymers, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 275–295. DOI: 10.3390/polym4010275.

6 Laftah W.A., Abdul Rahman W.A.W., Ibrahim A.N. Effects of carbon nanotube and curing agent concentrations on the mechanical, thermal and electrical properties of polydimethylsiloxane: optimization and statistical analysis. RSC Advances, 2025, vol. 15, pp. 14838–14847. DOI: 10.1039/D5RA01890K.

7 Sabet S.M. et al. Effects of sonication energy on the dispersion of carbon nanotubes in a vinyl ester matrix and associated thermo-mechanical properties. Journal of Materials Science, 2015, vol. 50, pp. 4729–4740. DOI: 10.1007/s10853-015-9024-y.

8 Voronina S., et al. The influence of the carbon nanofiller in the PDMS-based composites on the strain resistive effect. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2025, vol. 33, no. 7, pp. 754–765. DOI: 10.1080/1536383X.2025.2454397.

9 Silicone molding material based on platinum Flexilis R200, translucent. Kompozit Stroy: materials catalog. Available at: https://www.composit-stroy.ru/catalog/silicone/1502/ (accessed 03 May 2026). (in Russian).

10 GOST 15139–69. Plastics. Methods for determination of density (volume mass). Moscow, Standards Publishing House, 1969. (in Russian).

11 GOST 4651–2014 (ISO 604:2002). Plastics. Compression test method. Moscow, Standartinform, 2015. 23 p. (in Russian).

12 Stanciu N. – V., Stan F., Sandu I. – L., Fetecau C., Turcanu A. – M. Thermal, rheological, mechanical, and electrical properties of polypropylene/multi-walled carbon nanotube nanocomposites. Polymers, 2021, vol. 13, no. 2, article 187. DOI: 10.3390/polym13020187.

13 Xu X., et al. The synthesis and properties of isocyanate-based polyimide foam composites containing MWCNTs of various contents and diameters. RSC Advances, 2022, vol. 12, pp. 5546–5556. DOI: 10.1039/D1RA06721D.

14 Rezvantalab H., Ghazi N., Ambrusch M.J., Infante J., Shojaei-Zadeh S. An aqueous-based approach for fabrication of PVDF/MWCNT porous composites. Scientific Reports, 2017, vol. 7, article 1716. DOI: 10.1038/s41598–017–01770–9.

15 Liu C. – X., Choi J. – W. Improved dispersion of carbon nanotubes in polymers at high concentrations. Nanomaterials, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 329–347. DOI: 10.3390/nano2040329.

16 Moseenkov S.I., et al. Effect of ultrasonic treatment on the properties of multiwalled carbon nanotubes-polymethylmethacrylate composites: effect of applied voltage and pressure on conductivity of the composites. Express Polymer Letters, 2019, vol. 13, no. 12, pp. 1057–1070. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2019.92.

Сведения об авторах

Сергей А. Глызин магистрант, кафедра химической технологии твёрдых ракетных топлив, нефтепродуктов и полимерных композиций, Сибирский государственный университет науки и технологии им. М.Ф. Решетнева,, пр. Красноярский рабочий 31, Красноярск, 660038, Россия, boss.glyzin@mail.ru
https://orcid.org/0009-0002-6607-7679

Светлана Ю. Воронина к.х.н., доцент, кафедра химической технологии твёрдых ракетных топлив, нефтепродуктов и полимерных композиций, Сибирский государственный университет науки и технологии им. М.Ф. Решетнева, пр. Красноярский рабочий 31, Красноярск, 660038, Россия, simkina_svetlana@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3804-2807

Александра А. Хохлова магистрант, кафедра химической технологии твёрдых ракетных топлив, нефтепродуктов и полимерных композиций, Сибирский государственный университет науки и технологии им. М.Ф. Решетнева, пр. Красноярский рабочий 31, Красноярск, 660038, Россия, ruddie.ax@ya.ru
https://orcid.org/0009-0004-7615-0774

Антон А. Мирошниченко аспирант, научная лаборатория Интеллектуальные материалы и структуры, Сибирский государственный университет науки и технологии им. М.Ф. Решетнева,, пр. Красноярский рабочий 31, Красноярск, 660038, Россия, ant_mir_03@mail.ru
https://orcid.org/0009-0001-1110-9541

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Sergey A. Glyzin master's student, Department of Chemical Technology of Solid Rocket Propellants, Petroleum Products and Polymer Composites, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy ave., 660037, Krasnoyarsk, Russia, boss.glyzin@mail.ru
https://orcid.org/0009-0002-6607-7679

Svetlana Y. Voronina Cand. Sci. (Chem.), laboratory “High molecular weight compounds”, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy ave., 660037, Krasnoyarsk, Russia, simkina_svetlana@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3804-2807

Alexandra A. Khokhlova master's student, Department of Chemical Technology of Solid Rocket Propellants, Petroleum Products and Polymer Composites, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy ave., 660037, Krasnoyarsk, Russia), ruddie.ax@ya.ru
https://orcid.org/0009-0004-7615-0774

Anton A. Miroshnichenko postgraduate student, Scientific Laboratory "Intelligent Materials and Structures", Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy ave., 660037, Krasnoyarsk, Russia, ant_mir_03@mail.ru
https://orcid.org/0009-0001-1110-9541

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 14/03/2026	**После редакции** 24/03/2026	**Принята в печать** 29/04/2026
Received 14/03/2026	**Accepted in revised** 24/03/2026	**Accepted** 29/04/2026