

Оригинальная статья / Original article

УДК 53.06

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-149-158>

Экспериментальные исследования механических характеристик композиционных полимерных материалов на основе полипропилена, допированных углеродными нанотрубками

Л.С. Элбакян¹✉

¹ Волгоградский государственный университет
пр-т Университетский, д. 100, г. Волгоград 400062, Российская Федерация

✉ e-mail: lusniak-e@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В данной работе рассмотрены вопросы использования углеродных нанотрубок в качестве наполнителей с целью улучшения прочностных свойств полимерных материалов на основе полипропилена, используемых в различных областях промышленности, нефте- и газодобыче, металлургии, электроэнергетике и т.д.

Методы. Разработан способ создания нового полимерного композитного материала на основе полипропилена с добавлением углеродных нанотрубок. Проведены экспериментальные испытания прочности опытных образцов, изготовленных из композита «полипропилен – углеродные нанотрубки» в соответствии с ГОСТ 25.601-80 «Расчеты и испытания на прочность».

Результаты. В ходе экспериментальных исследований установлено, что ультразвуковое воздействие на углеродные нанотрубки с правильно подобранным растворителем и условиями воздействия является важным условием при использовании УНТ в качестве нанодобавки. Для получения композитного гранулированного полимерного материала путем введения углеродных нанотрубок целесообразнее всего использование двухшнекового экструдера с заранее подобранными температурными режимами в каждой зоне нагрева и скоростью вращения шнеков. Установлено, что введение углеродных нанотрубок в микроколичествах (0,2–0,4 мас. %) в полимерную матрицу приводит к увеличению максимально допустимой нагрузки до ~0,03–0,05 кН, коэффициента пластической деформации ~2,2–7,1% и предела прочности при растяжении ~1–2,5 Н/мм².

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование углеродных нанотрубок в качестве нанодобавок в полимерную матрицу полипропилена позволяет создавать специальные полимеры, обладающие уникальными свойствами, без существенного удорожания их производства. Кроме того, контроль процентного содержания УНТ дает возможность проектирования материалов «под заказ» с точным контролем свойств.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; композиционные материалы; полипропилен; прочностные характеристики.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема “FZUU-2023-0001”).

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Элбакян Л.С. Экспериментальные исследования механических характеристик композиционных полимерных материалов на основе полипропилена, допированных углеродными нанотрубками // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 149–158. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-149-158>.

Поступила в редакцию 31.03.2025

Подписана в печать 30.05.2025

Опубликована 30.06.2025

© Элбакян Л.С., 2025

Experimental studies of the mechanical characteristics of composite polymer materials based on polypropylene doped with carbon nanotubes

Lusine S. Elbakyan¹✉

¹ Volgograd State University
100 Universitetsky Ave., Volgograd 400062, Russian Federation

✉ e-mail: lusniak-e@yandex.ru

Abstract

Research objective. This work considers the issues of using carbon nanotubes as fillers in order to improve the strength properties of polymer materials based on polypropylene, which are used in various industries, oil and gas production, metallurgy, electric power engineering, etc.

Methods. A method for creating a new polymer composite material based on polypropylene with the addition of carbon nanotubes has been developed. Experimental tests of the strength of prototypes made of the "polypropylene-carbon nanotubes" composite were conducted in accordance with GOST 25.601-80 "Calculations and Tests for Strength".

Results. In the course of experimental studies, it was found that ultrasonic exposure of carbon nanotubes with a properly selected solvent and exposure conditions is an important condition for using CNTs as a nano-additive. To obtain a composite granular polymer material by introducing carbon nanotubes, it is most advisable to use a twin-screw extruder with pre-selected temperature regimes in each heating zone and the speed of rotation of the screws. It has been established that the introduction of carbon nanotubes in microquantities (0.2–0.4 wt. %) into the polymer matrix leads to an increase in the maximum allowable load to ~0.03–0.05 kN, the plastic deformation coefficient ~2.2–7.1% and the tensile strength ~1–2.5 N/mm².

Conclusion. The results obtained allow us to conclude that the use of carbon nanotubes as nanoadditives in the polymer matrix of polypropylene allows us to create special polymers with unique properties without significantly increasing the cost of their production. In addition, the control of the percentage of CNTs allows us to design custom materials with precise control of their properties.

Keywords: carbon nanotubes; composite materials; polypropylene; strength characteristics.

Funding: The work was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic "FZUU-2023-0001").

Conflict of interest: The Author declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Elbakyan L.S. Experimental studies of the mechanical characteristics of composite polymer materials based on polypropylene doped with carbon nanotubes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(2):149–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-149-158>.

Received 31.03.2025

Accepted 30.05.2025

Published 30.06.2025

Введение

Полимерные материалы не просто двигают прогресс, но и формируют новые технологические уклады, делая возможным то, что ещё несколько десятилетий назад казалось фантастикой. Полимерные материалы действительно стали одним из ключевых факторов технологического прогресса в современной промышленности. Их уникальные свойства: лёгкость,

прочность, химическая стойкость, гибкость в обработке и относительно низкая стоимость – сделали их незаменимыми в самых разных отраслях. Однако с развитием промышленности и технологий возникает потребность в создании новых материалов, обладающих уникальными свойствами, зачастую недостижимыми для обычных полимеров (проводимость, высокие механические свойства и т. д.).

В течение последнего десятилетия углеродные нанотрубки (УНТ) привлекают большое внимание благодаря своим уникальным свойствам [1]. Они обладают высокой прочностью на растяжение, низкой плотностью, отличной теплопроводностью и проводимостью, а также высокой химической стойкостью [2]. Эти характеристики делают УНТ идеальными для использования в различных областях, в качестве нанодобавок и служат основой для создания новых наноматериалов и устройств. На сегодняшний день ученые работают над улучшением методов дисперсии, модификации поверхности УНТ для повышения их совместимости с различными полимерами, а также над разработкой новых композитов с уникальными свойствами [3]. УНТ могут улучшать механические свойства полимеров и металлов, что делает их идеальными для создания легких и прочных материалов [4; 5]. Тем не менее, несмотря на их многообещающие свойства, существует ряд вызовов, связанных с производством и обработкой УНТ, включая их агрегацию и сложность интеграции в другие материалы. Хорошая дисперсность и плотный контакт между наполнителем и матрицей являются основными препятствиями для полной реализации выдающихся свойств УНТ в композиционных материалах [6]. Таким образом, равномерное распределение УНТ и формирование надлежащей межфазной связи между матрицей и УНТ являются критически важными для достижения оптимальных механических свойств нанокомпозитов. Природа полимерного связующего также играет важную роль в формировании комплекса свойств композита [7].

Полипропилен (ПП) стал одним из самых популярных и широко используемых термопластичных полимеров в мире [8]. Его универсальность и множество положительных свойств способствуют его ак-

тивному применению в различных отраслях. Полипропилен является важным материалом в строительстве, предлагая множество решений для различных задач [9]. Он используется в разнообразных отраслях, таких как: рыболовный флот; яхтинг; сельское хозяйство; строительство; авиационная отрасль и т.д. [10] Именно поэтому разработка и получение новых материалов на основе полипропилена с усовершенствованными свойствами открывает новые горизонты для их применения в строительстве и других отраслях [11]. Это позволяет удовлетворять растущие требования к качеству, безопасности и устойчивости материалов, что, в свою очередь, способствует более эффективному и экологически чистому строительству [12].

Целью данной работы является улучшение механических характеристик полипропилена путем добавления углеродных нанотрубок.

Материалы и методы

Для эффективного упрочнения полимеров путем допирования углеродными нанотрубками необходимо обеспечить максимально равномерное распределение УНТ в полимере [13]. Это может быть достигнуто благодаря комплексному подходу, включающему: модификацию поверхности УНТ (химическую или физическую), подбор оптимального метода диспергирования, а также контроль параметров обработки (температура, время, концентрация и т. д.) [14]. Ранее нами была смоделирована система «ПП-УНТ», теоретически доказана адсорбционная активность фрагмента рассматриваемого полимера по отношению к УНТ, которая реализуется при физической адсорбции [15]. Также исследовано влияние слойности УНТ на механизм создания композитного материала на основе полипропилена путем допирования УНТ [16]. Полученные

результаты подтвердили возможность создания стабильного комплекса «ПП-УНТ».

В качестве нанодобавок были использованы многослойные углеродные нанотрубки серии «Таунит» с внешним диаметром порядка 20–50 нм, внутренним 10–20 нм, длиной не менее 2 мкм. Общее количество примесей в составе УНТ не более 10%.

Как известно, УНТ склонны к образованию агрегатов из-за ван-дер-ваальсовых сил [17]. С целью улучшения агрегационных свойств углеродные нанотрубки предварительно диспергировали в растворе додецилбензолсульфоната натрия. Диспергирование осуществляли методом ультразвуковой обработки, обеспечивающей эффективное разрушение агломератов. Оптимальные параметры обработки в ультразвуковой ванне были определены экспериментально: частота 40 кГц, мощность 180 Вт, продолжительность обработки 20–30 минут при температуре $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. После диспергирования растворитель удаляли методом отгонки в условиях, исключающих коагуляцию УНТ.

Для синтеза композитных материалов на основе полипропилена, модифицированного углеродными нанотрубками, использовался двухшнековый экструдер.

Конструкция экструдера обеспечивает максимальную эффективность диспергирования и гомогенизации компонентов. Кроме того, двухшнековые экструдеры данного типа позволяют осуществлять точный контроль термомеханических параметров процесса, включая температурный режим и давление, а также обеспечивают возможность переработки широкого спектра материалов: термопластичных полимеров, эластомеров и наполненных композиционных систем. В используемой установке реализована двухстадийная система загрузки сырья и семь независимых термостатированных зон.

Температурный режим получения композита «ПП – УНТ» установлен в пределах $180\text{--}200^\circ\text{C}$ с индивидуальным подбором температуры для каждой зоны нагрева. В процессе экструзии расплав подается через фильеру, приобретая форму нити диаметром 2 мм.

Нить из композитного материала была охлаждена в водяной ванне, после чего подверглась гранулированию с использованием дробилки-гранулятора для полимерных материалов. На рисунке 1 показаны гранулированные образцы полипропилена с углеродными нанотрубками (УНТ) и без них.



а



б

Рис. 1. Гранулированный полимерный материал на основе полипропилена: а – без УНТ; б – модифицированный УНТ

Fig. 1. Granular polymer material based on polypropylene: а – without CNT; б – modified CNT

Перед получением образцов исследования гранулированный полипропилен с или без УНТ высушивался в специальном сушильном оборудовании в течение 4 часов при температуре 80°C . Это позволяет удалить лишнюю влагу из полимера и тем самым избежать появления пор в самих образцах. Далее с помощью термопластавтомата (ТПА) Siger Classic 160V нами

были изготовлены пластины размером $150 \times 100 \times 1$ мм (рис. 2). Используемый ТПА имеет четыре зоны нагрева, которые также были подобраны для данного вида полимера. Также ТПА позволяет регулировать скорость, давление и положение впрыска в соответствии с особенностями продукта.

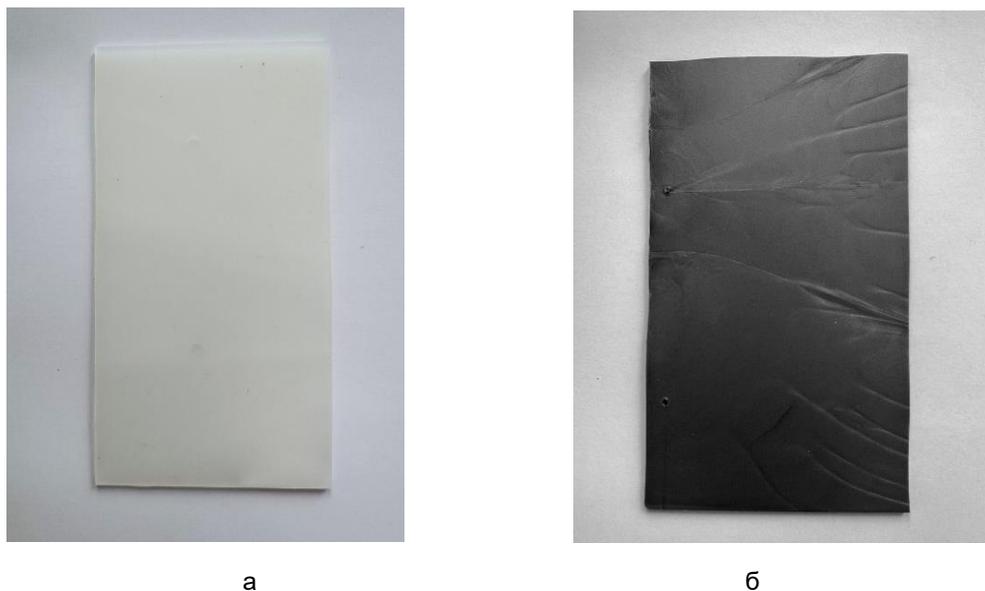


Рис. 2. Пластины, полученные с использованием ТПА Siger Classic 160V: а – без УНТ; б – модифицированный УНТ

Fig. 2. Plates obtained using TPA Siger Classic 160V: a – without CNT; б – modified CNT

Далее из полученных пластин вырезаны образцы лопаток неоднаправленных композиционных материалов в соответствии с ГОСТ 25.601-80 «Расчеты и испытания на прочность» (рис. 3). Выбор данного типа композитных материалов

обусловлен хаотичным распределением армирующего компонента – углеродных нанотрубок в полимерной матрице. Лазерная резка образцов позволила добиться минимальных погрешностей в размерах.

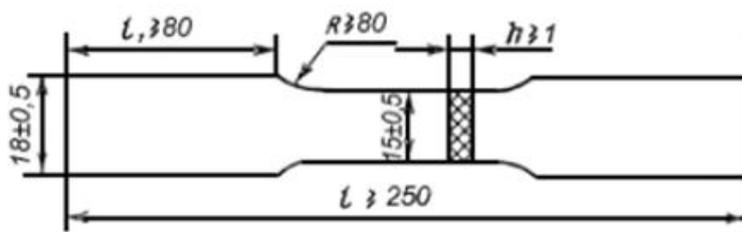


Рис. 3. Форма и размеры образца неоднаправленных композиционных материалов (ГОСТ 25.601-80)

Fig. 3. Shape and dimensions of a sample of non-directional composite materials (GOST 25.601-80)

Результаты и их обсуждение

Образцы композитного материала с различным процентным содержанием УНТ и образец сравнения (без УНТ), полученные в соответствии с ГОСТ 25.601-80 (рис. 4), были подвергнуты испытанию на универсальной разрывной электро-механической машине РЭМ-50-1. Установка позволяет определить следующие механические характеристики: максимальная допустимая нагрузка, коэффициент пластической деформации. Основные условия проведения испытания: максимальная

нагрузка установки 50 кН, рабочая скорость перемещения подвижной траверсы 25 мм/мин, предел допускаемой относительной погрешности перемещения $\pm 1\%$, предел относительной погрешности поддержания скорости нагружения прибора $\pm 1\%$. Испытания проводились до разрушения образца с начальным значением нагрузки, прикладываемой к образцу, равной 0,1 Н. С целью минимизации погрешностей в исследовании тестировали по 10 образцов для каждого варианта процентного содержания УНТ.

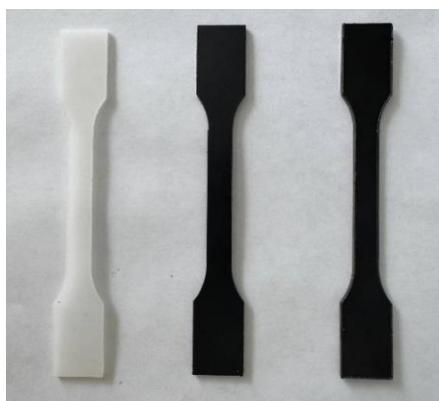


Рис. 4. Образцы лопаток из полипропилена без УНТ и с различным процентным содержанием УНТ

Fig. 4. Samples of polypropylene blades without CNTs and with different percentage of CNTs

Предел прочности при растяжении определен по формуле, указанной в ГОСТ 25.601-80:

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{b \cdot h}, \quad (1)$$

где F_{\max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;

b – ширина образца, мм; h – высота образца, мм.

Усредненные результаты экспериментального исследования прочностных свойств полученных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментального исследования прочностных характеристик композитов «ПП+УНТ» и образца сравнения – чистого ПП

Table 1. Results of an experimental study of the strength characteristics of PP+CNT composites and a reference sample of pure PP

Основные прочностные характеристики	Содержание УНТ, мас. %		
	0	0,2	0,4
Максимальная допустимая нагрузка F , кН	0,833	0,853	0,881
Коэффициент пластической деформации A , %	9,81	12,08	16,90
Предел прочности при растяжении, Н/мм ²	41,6	42,5	44,1

Графическая интерпретация влияния процентного содержания УНТ на механические свойства полипропиленовых композитов представлена на рисунке 5, вклю

чая: а) максимальную нагрузку; б) коэффициент пластической деформации; в) предел прочности на растяжение.

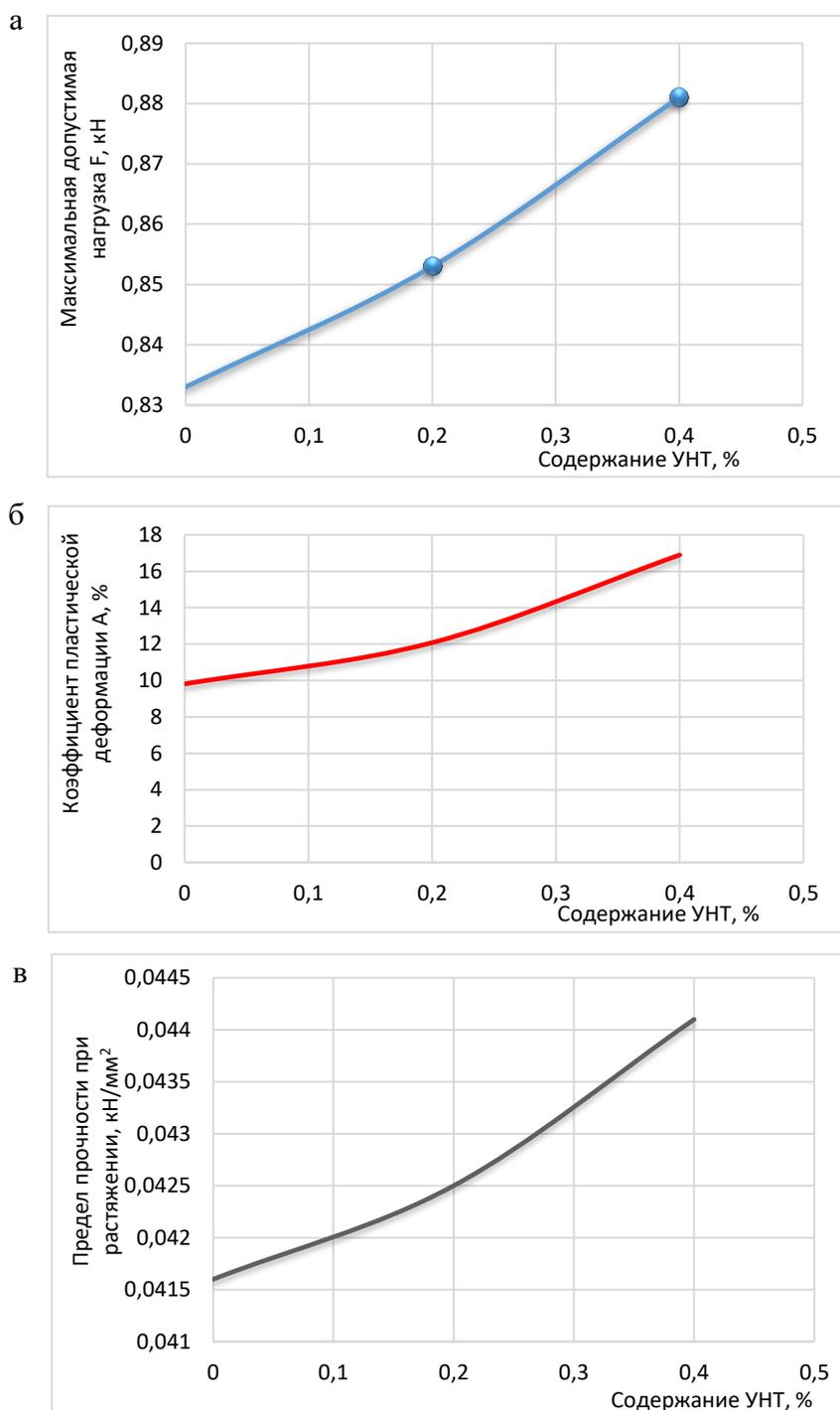


Рис. 5. Графики зависимостей прочностных характеристик образцов исследования от концентрации УНТ: а – максимально допустимой нагрузки; б – коэффициента пластической деформации; в – предела прочности при растяжении.

Fig.5. Graphs of the dependence of the strength characteristics of the study samples on the concentration of CNTs: а – the maximum permissible load; б – the coefficient of plastic deformation; в – the tensile strength

Проведенные измерения выявили, что даже незначительное добавление углеродных нанотрубок способствует повышению прочности полипропиленового композита.

Вывод

Проведённые эксперименты и разработанная технология производства подтвердили, что даже незначительное введение углеродных нанотрубок существенно улучшает механические свойства поли-

мерного композита. При этом варьирование концентрации УНТ позволяет целенаправленно регулировать эксплуатационные характеристики материала. Это еще раз подтверждает факт того, что углеродные нанотрубки представляют собой многообещающий инструмент для создания новых поколений полимерных материалов с улучшенными характеристиками, что может привести к значительным прорывам в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Ibrahim K.S. Carbon nanotubes-properties and applications: a review. *Carbon Lett.* 2013. Vol. 14, is. 3. P. 131-144.
2. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 293 с.
3. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки // *Успехи физических наук.* 1997. Т. 167, № 9. С. 945-972.
4. Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010. 99 с.
5. Винг Май Ю., Жонг-Жен Ю. Полимерные нанокompозиты. М.: Техносфера, 2011. 688 с.
6. Stern T., Marom G. Failure mechanisms and strength of polymer nanocomposites: A brief review. *J. Compos. Sci.* 2024. Vol. 8, is. 10. P. 395. <https://doi.org/10.3390/jcs8100395>.
7. Greene J.P. Automotive plastics and composites. *Materials and processing.* Elsevier Science & Technology Books, 2021. P. 83-105. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03030-3>.
8. Campo E.A. Selection of polymeric materials. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2008. P. 21-50.
9. Carbon nanotube polymer nanocomposites coated aggregate enabled highly conductive concrete for structural health monitoring / D. Lu, Y. Huo, Z. Jiang, J. Zhong // *Journal Carbon.* 2023. Vol. 206. P. 340-350.
10. Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties /Z. Spitalsky, D. Tasis, K. Papagelis, C. Galiotis // *Progress in Polymer Science.* 2010. Vol. 35, is. 3. P. 357-401 <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.09.003>.
11. Rathinavel S., Priyadharshini K., Dhananjaya Panda. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application // *Materials Science and Engineering: B.* 2021. Vol. 268. P. 115095 <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115095>.
12. Fenta E.W., Mebratie B.A. Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques // *Heliyon.* 2024. Vol. 10, is. 16. P. e36490. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36490>.
13. Transparent conductive thin film synthesis based on single-walled carbon nanotubes dispersion containing polymethylmethacrylate binder / H. Jung, S. Y. An, J. S. Lim, D. Kim // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology,* 2011. Vol. 11, is. 7. P. 6345-6349.
14. Запороцкова И. В. Углеродные и не углеродные наноматериалы и композитные структуры на их основе: строение и электронные свойства. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2009. 490 с.

15. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Polypropylene modified with carbon nanomaterials: structure, properties and application possibilities (a review) // *Polymers (basel)*. 2025. Vol. 17(4). P. 517. <https://doi.org/10.3390/polym17040517>.

16. Элбакян Л.С., Запороцкова И.В. Механизм создания композита на основе полипропилена, модифицированного углеродными нанотрубками разной слойности // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2025. № 1. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202501.646>.

17. Елецкий А.В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // *Успехи физических наук*. 2004. Т. 174, № 11. С. 1191-1231.

References

1. Ibrahim K.S. Carbon nanotubes-properties and applications: a review. *Carbon Lett.* 2013;14(3):131-144.

2. Dyachkov P.N. Carbon nanotubes: structure, properties, applications. Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii, 2006. 293 p. (In Russ.).

3. Yeletsky A.V. Carbon nanotubes. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics Uspekhi*. 1997;167(9): 945-972. (In Russ.)

4. Shevchenko V.G. Fundamentals of the physics of polymer composite materials. Moscow: Izd-vo MGU im. M.V. Lomonosova; 2010. 99 p. (In Russ.)

5. Wing Mai Y., Zhong-Zhen Y. Polymer nanocomposites. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 688 p. (In Russ.)

6. Stern T., Marom G. Failure mechanisms and strength of polymer nanocomposites: A brief review. *J. Compos. Sci.* 2024;8(10):395. <https://doi.org/10.3390/jcs8100395>.

7. Greene J.P. Automotive plastics and composites. Materials and processing. Elsevier Science & Technology Books; 2021. P. 83-105. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03030-3>.

8. Campo E.A. Selection of Polymeric Materials. Norwich, NY: William Andrew Publishing. 2008. P. 21-50.

9. Lu D., Huo Y., Jiang Z., Zhong J. Carbon nanotube polymer nanocomposites coated aggregate enabled highly conductive concrete for structural health monitoring. *Journal Carbon*. 2023;206:340-350.

10. Spitalsky Z., Tasis D., Papagelis K., Galiotis C. Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties. *Progress in Polymer Science*. 2010;35(3):357-401. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.09.003>.

11. Rathinavel S., Priyadarshini K., Dhananjaya Panda. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Vol. 268. P. 115095. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115095>.

12. Fenta E.W., Mebratie B.A. Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques. *Heliyon*. 2024;10(16):e36490. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36490>.

13. Jung H., An S.Y., Lim J.S., Kim D. Transparent conductive thin film synthesis based on single-walled carbon nanotubes dispersion containing polymethylmethacrylate binder. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2011;11(7):6345-6349.

14. Zaporotskova I.V. Carbon and non-carbon nanomaterials and composite structures based on them: structure and electronic properties. Volgograd: Izd-vo VolGU, 2009. 490 p. (In Russ.)

15. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Polypropylene modified with carbon nanomaterials: structure, properties and application possibilities (a review). *Polymers (basel)*. 2025;17(4):517. (In Russ.) <https://doi.org/10.3390/polym17040517>.

16. Elbakyan L.S., Zaporotskova I.V. Mechanism for creating a composite based on polypropylene modified with carbon nanotubes of different layer density. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki = Bulletin of higher educational institutions. Materials of electronic engineering*. 2025;(1). (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202501.646>.

17. Yeletsky A.V. Sorption properties of carbon nanostructures. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics Uspekhi*. 2004;174(11):1191-1231. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Элбакян Лусине Самвеловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения, Институт приоритетных технологий, Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация,
e-mail: lusniak-e@yandex.ru,
ORCID: 0009-0006-1014-240X

Lusine S. Elbakyan, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of Forensic Examination and Physical Materials Science, Institute of Priority Technologies, Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation,
e-mail: lusniak-e@yandex.ru,
ORCID: 0009-0006-1014-240X