

УДК 691.175.2

К вопросу о свойствах композиционных материалов, модифицированных графеном

А.Л. Галиновский, В.А. Нелюб, А. Папич

МГТУ им. Н.Э. Баумана

The issue of composite materials modified with graphene

A.L. Galinovskiy, V.A. Nelyub, A. Papich

Bauman Moscow State Technical University

Широкое распространение композиционных материалов в различных областях промышленности делает актуальной задачу повышения их механических и теплофизических свойств. Одним из способов решения этой задачи является модификация материала наноразмерными частицами. Перспективным материалом — модификатором композитов — служит наноразмерный графен, однако в исследовательских и обзорных научных отечественных работах наблюдается дисбаланс в сторону альтернативных наномодификаторов. Дан обзор информационных источников, посвященных изучению механических и теплофизических свойств композиционных материалов, модифицированных графеном. Особое внимание уделено влиянию модификации на свойства полиэтиленов и полимерных композитов. Рассмотрены различные способы модификации — введения наночастиц в композиционный материал, — так как для получения наибольшего эффекта от нее необходимо обеспечить равномерное диспергирование модификатора по объему материала. Результаты рассмотренных исследований показывают, что графен является перспективным модификатором в задачах повышения тепло-и электропроводности композитов, а также их жесткости, прочности при разрыве и усталостной прочности.

EDN: MMMUMZ, <https://elibrary/mmmumz>

Ключевые слова: композиционный материал, полимерные композиты, полиэтилен, наномодификация, графен

The widespread use of composite materials in various industrial fields makes improving their mechanical and thermal properties a pressing issue. One solution to this problem is modifying the material with nanoscale particles. Nanoscale graphene is a promising composite modifier; however, research and review papers in Russian demonstrate an imbalance in favor of alternative nanomodifiers. This article presents an analysis of information sources devoted to studying the mechanical and thermal properties of graphene-modified composite materials. Particular attention is paid to the effect of modification on the properties of polyethylene and polymer composites. Various modification technologies are also considered, as achieving the greatest modification effect requires uniform dispersion of the modifier throughout the material. The results of the studies reviewed demonstrate that graphene is a promising modifier for increasing the thermal and electrical conductivity of composites, as well as their elastic modulus, tensile strength, and fatigue strength.

EDN: MMMUMZ, <https://elibrary/mmmumz>

Keywords: composite material, polymer composites, polyethylene, nanomodification, graphene

Композиционные материалы (КМ) получили широкое распространение в различных отраслях промышленности, в том числе аэрокосмической. КМ, в частности полимерные, имеют более высокие удельные значения прочности и жесткости, чем металлы. Однако по теплофизическим характеристикам — электро- и теплопроводности — КМ уступают металлам. В связи с этим повышение эксплуатационных свойств КМ представляется актуальной задачей современного материаловедения.

Существуют различные способы улучшения свойств КМ, например, нанесение металлического покрытия на поверхность волокна, в последующем выступающим в качестве армирующего компонента [1].

Другим способом повышения эксплуатационных свойств КМ является наномодификация — введение в состав материала специальных модифицирующих добавок, представляющих собой наноразмерные порошки [2]. Свойства модифицированного КМ зависят как от типа добавки, так и от технологии модификации.

В качестве наномодификатора выступают такие вещества и структуры, как углеродные нанотрубки, графен, фуллерены, наноалмазы, полученные детонационным синтезом и т. д. Анализ научных публикаций по данной тематике, позволил заключить, что наиболее изученной добавкой служат одно- и многостенные углеродные нанотрубки [3, 4].

Графен, являющийся двумерной аллотропной модификацией углерода, также можно рассматривать в качестве наномодификатора полимерных КМ. Один слой графена представляет собой атомы углерода, расположенные в узлах гексагональной решетки. В силу уникальности строения графен обладает высокими теплофизическими и механическими свойствами. Теплопроводность монослоя графена достигает 5000 Вт/(м·К) , максимальная подвижность электронов в одном слое графена при комнатной температуре — $200\,000 \text{ см}^2/(\text{В·с})$ [5].

Указанные свойства графена, отличающие его от остальных известных материалов, вызывают интерес у научно-исследовательских и производственных групп во всем мире. Так, начиная с 2011 г. в странах Европейского Союза реализовывалась программа GRAPHENE-CA, подразумевающая интенсификацию исследований, связанных с графеном.

Кроме применения в нанoeлектронике, графен в силу свойств можно рассматривать как

перспективный наномодификатор КМ для повышения тепло- и электропроводности материала. Существуют отдельные работы российских и зарубежных исследователей, направленные на выявление влияния графена и технологий его введения на свойства материала при его модификации, но отечественных работ значительно меньше [6].

Цель работы — обзор результатов исследований, посвященных изучению теплофизических и механических свойств графеносодержащих композитов, а также методам введения графена в КМ.

Моделирование модифицированных материалов. Так как уравнения тепло- и электропроводности являются идентичными, для моделирования происходящих в материале процессов, достаточно рассмотреть один из параметров, например электропроводность.

При решении задачи электропроводности материала, модифицированного проводящими частицами, применяют два подхода. Первый подразумевает контактную электропроводность, при которой носители заряда сосредоточены в частицах модификатора, и их макроскопическое движение возможно лишь при непосредственном контакте частиц. Во втором подходе носители тока перемещаются по каждой из фаз и через границу раздела между ними.

При первом подходе теория предсказывает наличие критической концентрации наполнителя, называемой пределом перколяции, при которой происходит резкое скачкообразное увеличение проводимости. В работе [7] приведены результаты исследований, показывающие, что при использовании дисперсных частиц, например порошков, предел перколяции может достигать 40...60 % масс. При таком количестве наполнителя КМ обладает низкими механическими свойствами, поэтому уменьшение предела перколяции является важной задачей.

В статье [8] приведены результаты моделирования электропроводящих свойств полимерного КМ со случайным расположением частиц графена. В моделях исключалось касание пластинок графена между собой и проводилось сравнение данных, полученных с учетом туннельного эффекта между частицами и без него. Показано, что с учетом туннельного эффекта между модифицирующими частицами электропроводность на 45 % выше, чем значения материала без его учета.

В работе [9] численно исследованы противударные свойства полиэтилена, модифицированного графеном в виде складок (оригами). Моделирование КМ выполнено на микроуровне. Проведены цифровые эксперименты на ударное взаимодействие и индентирование, по результатам которых установлено, что в модифицированном КМ возрастает удельное сопротивление на разрыв и твердость.

Свойства композитов, содержащих графен. Рассмотрим влияние графена и способов его добавления на механические и теплофизические свойства КМ.

Публикации [10–15] посвящены исследованию влияния графена на свойства полиэтилена разного типа. В работе [10] рассмотрен полиэтилен высокого давления, модифицированный графеном. Модификатор предварительно диспергировали в изопропиловом спирте с применением ультразвуковой обработки, а затем полученную суспензию вводили в расплав полиэтилена. Установлено, что у полиэтилена, содержащего более 3 % масс. графена, значительно возрастает модуль упругости. Также повышается его вязкость, но прочность образцов изменяется незначительно, а удлинение при разрыве уменьшается.

Механические характеристики полиэтилена высокого давления, модифицированного графеном, также исследованы в работе [11]. Модификация проведена путем физического смешивания частиц графена и гранул полиэтилена. Выявлено, что у модифицированного материала, содержащего 0,01 % масс. графена, модуль упругости больше на 10,2 %, а предел прочности — на 21,6 %, чем у исходного КМ. Однако при увеличении содержания графена эффект от модификации ослабевает.

В статье [12] рассмотрен сверхвысокомолекулярный полиэтилен, модифицированный графеном. Введение модификатора в состав материала проведено путем сухого перемешивания гранул полиэтилена и графенового нанопорошка. Для изготовления образцов материала из приготовленной смеси использован восьмишнековый смеситель. Установлено, что при добавлении 1,5 % масс. графена с характеристическим размером 8 нм предел текучести при растяжении возрастает на 18 % относительно исходного значения, а при добавлении 0,5 % масс. графена с характеристическим размером 60 нм — на 20,8 %.

Анализ результатов исследования волокон из высокомолекулярного полиэтилена, содержащих частицы графена [13], показал, что добавление графена увеличивает модуль упругости волокон при растяжении на 32 %, а прочность при разрыве на 25 %.

Исследованию теплофизических свойств полиэтилена высокого давления, модифицированного графеном, посвящена работа [14]. Модификатор вводили методом сухого смешивания нанопорошка графена и гранул полиэтилена. Установлено, что при добавлении 40 % масс. графена теплопроводность полиэтилена возрастает до 2,91 Вт/(м·К), т. е. почти на 1000 %.

Изучение токопроводящих свойств полиэтилена, модифицированного нанопластинами графена [15], показало, что добавление 20,9 % масс. графена в КМ увеличивает его удельную электропроводность с $1,4 \cdot 10^{-13}$ до $1,3 \cdot 10^{-4}$ См/см.

В работе [16] исследованы свойства углерод-углеродного КМ, модифицированного частицами оксида графена. Модифицированные частицы наносили на поверхность углеродных волокон с последующим жидкофазным насыщением, карбонизацией и графитизацией. Установлено, что при нанесении 2,4 % масс. углеволокна на поверхность КМ его теплопроводность в плоскости возрастает на 15,2 %, а прочность на разрыв — на 21,6 %.

Публикации [17–27] посвящены изучению влияния графена на свойства полимерных КМ. В работе [17] рассмотрена зависимость механических свойств эпоксидного связующего от графена. Диспергирование частиц в связующем проведено ультразвуковым методом. Выявлено, что при добавлении 0,1 % масс. графена прочность отвержденной эпоксидной смолы при изгибе повышается с 20 до 51 МПа, а прочность при сжатии — с 50 до 68 МПа. Дальнейшее увеличение содержания графена в связующем привело к ухудшению свойств, что указывает на существование предельной степени наполнения эпоксидной смолы модификатором такого типа.

Эпоксидная смола, содержащая графен, также рассмотрена в статье [18]. Показано, что при добавлении 1,0 % масс. графена в КМ ударная вязкость отвержденного связующего увеличивается, электросопротивление уменьшается на 93 %, а теплопроводность возрастает на 211 %.

Влияние различных концентраций графена на механические свойства эпоксидной смолы

также исследовано в работе [19]. Диспергирование частиц в связующем проведено ультразвуковым методом. Установлено, что при добавлении 0,1 % масс. графена в КМ предел прочности на разрыв и модуль упругости эпоксидной смолы повышаются на 25 и 31 % соответственно, однако при дальнейшем увеличении содержания графена эти параметры снижаются.

В публикациях [20–25] рассмотрены свойства углепластиков, модифицированных графеном. Проведено исследование механических свойств композита на основе углеродных волокон и эпоксидного связующего, модифицированного графеном [20]. Диспергирование модификатора выполнено ультразвуковым методом при содержании графена в связующем 0,1...0,6 % масс. Показано, что при добавлении графена прочность композита на изгиб увеличивается на 66 %, модуль упругости при изгибе — на 72 %, а прочность при сдвиге — на 25 %.

В работах [21, 22] модифицирование углепластика выполнено путем распыления спиртовой суспензии графена на поверхность углеткани. Для диспергирования частиц модификатора в этаноле использован ультразвуковой метод, для изготовления углепластика — метод вакуумной инфузии. По сравнению с исходным КМ модифицированный углепластик с содержанием 0,4 % масс. графена показал значительно более высокое количество циклов до разрушения, а его прочность на изгиб увеличилась на 10 %.

Теплофизические свойства модифицированного графеном композита на основе углеволокна как армирующего компонента и полиэфирэфиркетона как связующего рассмотрены в работе [23]. Для нанесения частиц модификатора на поверхность препрега использован метод аэрозольного распыления водной суспензии графена. Показано, что при добавлении 0,25 % масс. графена поперечная электропроводность композита возрастает на 252 %. При введении в КМ 0,7 % масс. графена температуропроводность модифицированного композита увеличивается на 183 и 61 % в поперечном и продольном направлении соответственно, но прочность при сдвиге снижается.

В статье [24] для выращивания графена на поверхности углеродного волокна использован метод импульсного плазменного разряда. Отмечено, что теплопроводность модифицированного таким способом КМ стала больше на 251 %, чем у исходного материала.

Модифицирование графеном углепластиков, подвергаемых термоциклическим нагрузкам, рассмотрено в работе [25]. Содержание частиц модификатора, введенных в эпоксидную матрицу, достигало 0,75 % масс. Диспергирование проведено ультразвуковым методом с магнитным перемешиванием. Установлено, что при содержании графена 0,10 и 0,25 % масс. прочность КМ по сравнению с исходной перед термоциклированием возросла на 9 и 10 % соответственно. После 25 температурных циклов в диапазоне $-196...+60$ °С модифицированные углепластики продемонстрировали деградацию прочности в меньшей степени, чем исходный материал. Увеличение содержания графена до 0,75 % масс. привело к снижению прочности, что обусловлено образованием агломератов.

При исследовании механических свойств композита на основе кевларовых волокон и эпоксидного связующего, модифицированного оксидом графена, рассмотрены материалы с содержанием 25 и 12 % масс. кевлара [26]. Модификатор вводили в состав связующего в количестве 1, 3, 5, 10 и 16 % масс., обеспечивая равномерное распределение частиц в объеме связующего путем ручного перемешивания с последующим магнитным перемешиванием. Установлено, что наилучшими прочностными свойствами обладает материал, содержащий 25 % масс. кевлара и 5 % масс. оксида графена. Его прочность при растяжении увеличилась на 33,1 %, а модуль упругости — на 4,3 % по сравнению аналогичными параметрами исходного материала. Самая высокая ударная вязкость ($84,47$ кДж/м²) наблюдалась в материале, содержащем 12 % масс. кевлара и 10 % масс. оксида графена.

Еще один способ модификации КМ частицами оксида графена рассмотрен в работе [27]. Частицы модификатора наносили на поверхность арамидных волокон путем их погружения в водные суспензии оксида графена. Средняя прочность на разрыв волокон увеличилась на 7,9 %, а прочность на сдвиг в органоэластиках на основе модифицированного волокна — на 44,68 % по сравнению с аналогичными параметрами исходного материала.

Выводы

1. Модификация КМ добавлением в их состав графена позволяет значительно увеличить коэффициенты тепло- и электропроводности,

прочность, модуль упругости и ударную вязкость КМ. Это делает графен перспективным модификатором, расширяя область его применения.

2. Положительный эффект модификации нелинейно зависит от содержания модификатора в КМ. Существует порог, при превышении которого положительный эффект от внедрения графена в композит снижается, что обусловлено образованием наночастицами агломератов, ухудшающих свойства КМ.

3. Свойства модифицированного КМ зависят не только от концентрации наномодифи-

катора в КМ, но и от характера его распределения. Наиболее распространенным способом модификации является ультразвуковое диспергирование частиц в жидкофазном связующем. Но существуют и альтернативные способы диспергирования, в частности аэрозольное нанесение суспензии графена на поверхность препрега.

4. Результаты выполненного обзора можно использовать при планировании дальнейших исследований свойств модифицированных КМ, а также для оценки перспективы их применения в материалах конструкций.

Литература

- [1] Нелюб В.А. *Многофункциональные полимерные композиты на основе металлизированных углеродных волокнистых материалов*. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, МИРЭА, 2020. 310 с.
- [2] Николаева Е.А., Тимофеев А.Н., Михайловский К.В. Способы повышения коэффициентов теплопроводности полимеров и полимерных композиционных материалов. *Информационно-технологический вестник*, 2018, № 1, с. 156–168.
- [3] Галиновский А.Л., Моисеев В.А., Проваторов А.С. и др. Разработка ультразвуковой технологии получения суспензий с углеродными нанотрубками. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2016, № 11, с. 37–43.
- [4] Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В. и др. Физико-механические свойства нанокompозитов с УНТ (обзор). *Труды ВИАМ*, 2016, № 5, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-5-8-8>
- [5] Алексенко А.Г. *Графен*. Москва, Лаборатория знаний, 2025. 179 с.
- [6] Гудков М.В., Столярова Д.Ю., Шиянова К.А. и др. Полимерные композиты с графеном и его производными как функциональные материалы будущего. *Высокомолекулярные соединения. Сер. С*, 2022, т. 64, № 1, с. 45–68.
- [7] Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А. и др. *Полимерные композиционные материалы*. Долгопрудный, Интеллект, 2010. 352 с.
- [8] Ташкинов М.А., Добрыднева А.Д., Матвеев В.П. и др. Моделирование эффективных электропроводящих свойств полимерных нанокompозитов со случайным расположением частиц графена. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2021, № 2, с. 167–180, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.15>
- [9] Wang Y., Yang Y., Zhao S. et. al. Graphene origami reinforced polyethylene nanocomposite under ballistic impact. *Comput. Mater. Sci.*, 2025, vol. 259, art. 114181, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114181>
- [10] Рустамова Е.Г., Губин С.П. Композиты графен-полиэтилен высокого давления и их свойств. *РЭНСИТ*, 2021, т. 13, № 3, с. 369–376.
- [11] Luz P.A.C., Siqueira D.D., Braga N.F. et. al. High-density polyethylene/graphene polymer nanocomposites used as geogrids. *Polym. Compos.*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.70305>
- [12] Liu C.Y., Ishigami A., Kurose T. et al. Wear resistance of graphene reinforced ultra-high molecular weight polyethylene nanocomposites prepared by octa-screw extrusion process. *Compos. B. Eng.*, 2021, vol. 215, art. 108810, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108810>
- [13] Xue Z., Brown K.R., Harell T.M. et. al. Graphene reinforced UHMWPE fibers. *J. Polym. Res.*, 2025, vol. 32, no. 4, art. 99, doi: <https://doi.org/10.1007/s10965-025-04319-x>
- [14] Usman C., Mabrouk A., Abdala A. Enhanced thermal conductivity of polyethylene nanocomposites with graphene, granulated graphene, graphene nanoplatelet, and their hybrids. *Int. J. Energy Res.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/er.7147>

- [15] de Fim F.C., Basso N.R.S., Graebin A.P. et. al. Thermal, electrical, and mechanical properties of polyethylene-graphene nanocomposites obtained by in situ polymerization. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2012, vol. 128, no. 5, pp. 2630–2637, doi: <https://doi.org/10.1002/app.38317>
- [16] Song S., Li X., Shen C. et. al. Graphene-modified C/C composites for enhanced directional thermal conductivity. *J. Mater. Res. Technol.*, 2025, vol. 36, pp. 4043–4052, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.089>
- [17] Хлаинг Зо У., Яковлева К.А., Костромина Н.В. Свойства модифицированной эпоксидной смолы ЭД-20. *Успехи в химии и химической технологии*, 2020, т. 34, № 7, с. 114–116.
- [18] Aradhana R., Mohanty S., Nayak S.K. Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives. *Polymer*, 2018, vol. 141, pp. 109–123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.03.005>
- [19] Shelar M.L., Bhosale D.G., Bhatkar V.D. et al. Experimental investigations of the effect of graphene reinforcement on the mechanical properties of epoxy resin. *Hybrid Advances*, 2025, vol. 9, art. 100422, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100422>
- [20] Pathak A.K., Borah M., Gupta A. et. al. Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. *Compos. Sci. Technol.*, 2016, vol. 135, pp. 28–38, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.09.007>
- [21] Srivastava A.K., Singh A. An unexpected hardening behaviour of carbon-fiber epoxy composites under flexural fatigue loading and its intensification by graphene nanofillers. *Int. J. Fatigue*, 2024, vol. 182, art. 108177, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108177>
- [22] Srivastava A.K., Gupta V., Yerramalli C.S. et. al. Flexural strength enhancement in carbon-fiber epoxy composites through graphene nano-platelets coating on fibers. *Compos. B Eng.*, 2019, vol. 179, art. 107539, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107539>
- [23] Leow C., Kreider P.B., Sommacal S. et. al. Electrical and thermal conductivity in graphene-enhanced carbon-fibre/PEEK: the effect of interlayer loading. *Carbon*, 2023, vol. 215, art. 118463, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118463>
- [24] Zhou S., Wei W., Li L. et. al. In situ growth of graphene on carbon fibers to enhance the mechanical and thermal conductivity of epoxy composites. *Appl. Surf. Sci.*, 2025, vol. 680, art. 161299, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161299>
- [25] Ubaid J., Andrew J.J., Cantwell W.J. et. al. Performance evaluation of GNP-modified epoxy/carbon fiber composites after cryogenic thermal cycling for hydrogen storage applications. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2025, vol. 159, art. 150574, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150574>
- [26] Hassin M.S., Faruk M.O., Ali M.I. et. al. Evaluation of physical and mechanical properties of graphene oxide reinforced epoxy/Kevlar hybrid composites. *Hybrid Advances*, 2024, vol. 6, art. 100217, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100217>
- [27] Hussain S., Yorucu C., Ahmed I. et. al. Surface modification of aramid fibres by graphene oxide nano-sheets for multiscale polymer composites. *Surf. Coat. Technol.*, 2014, vol. 258, pp. 458–466, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.054>

References

- [1] Nelyub V.A. *Mnogofunktsionalnye polimernye kompozity na osnove metallizirovannykh ugleodnykh voloknistykh materialov*. Diss. dok. tekhn. nauk [Multifunctional polymer composites based on metallized carbon fiber materials. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MIREA Publ., 2020. 310 p. (In Russ.).
- [2] Nikolaeva E.A., Timofeev A.N., Mikhaylovskiy K.V. Methods for increasing the thermal conductivity of polymers and polymer composite materials. *Informatsionno-tehnologicheskii vestnik*, 2018, no. 1, pp. 156–168. (In Russ.).
- [3] Galinovskiy A.L., Moiseev V.A., Provatorov A.S. et al. Development of ultrajet technology of receiving suspensions with carbon nanotubes. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2016, no. 11, pp. 37–43. (In Russ.).
- [4] Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Popkov O.V. et al. Mechanical properties of CNT nanocomposites (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 5, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-5-8-8> (in Russ.).

- [5] Aleksenko A.G. *Grafen* [Graphene]. Moscow, Laboratoriya znaniy Publ., 2025. 179 p. (In Russ.).
- [6] Gudkov M.V., Stolyarova D.Yu., Shiyanova K.A. et al. Polymer composites with graphene and its derivatives as functional materials of the future. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. S*, 2022, vol. 64, no. 1, pp. 45–68. (In Russ.).
- [7] Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A. et al. *Polimernye kompozitsionnye materialy* [Polymer composite materials]. Dolgoprudnyy, Intellect Publ., 2010. 352 p. (In Russ.).
- [8] Tashkinov M.A., Dobrydneva A.D., Matveenko V.P. et al. Modeling the effective conductive properties of polymer nanocomposites with a random arrangement of graphene oxide particles. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2021, no. 2, pp. 167–180, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.15> (in Russ.).
- [9] Wang Y., Yang Y., Zhao S. et al. Graphene origami reinforced polyethylene nanocomposite under ballistic impact. *Comput. Mater. Sci.*, 2025, vol. 259, art. 114181, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.114181>
- [10] Rustamova E.G., Gubin S.P. Graphene-polyethylene high pressure composites and their properties. *RENSIT*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 369–376. (In Russ.).
- [11] Luz P.A.C., Siqueira D.D., Braga N.F. et al. High-density polyethylene/graphene polymer nanocomposites used as geogrids. *Polym. Compos.*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.70305>
- [12] Liu C.Y., Ishigami A., Kurose T. et al. Wear resistance of graphene reinforced ultra-high molecular weight polyethylene nanocomposites prepared by octa-screw extrusion process. *Compos. B. Eng.*, 2021, vol. 215, art. 108810, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108810>
- [13] Xue Z., Brown K.R., Harell T.M. et al. Graphene reinforced UHMWPE fibers. *J. Polym. Res.*, 2025, vol. 32, no. 4, art. 99, doi: <https://doi.org/10.1007/s10965-025-04319-x>
- [14] Usman C., Mabrouk A., Abdala A. Enhanced thermal conductivity of polyethylene nanocomposites with graphene, granulated graphene, graphene nanoplatelet, and their hybrids. *Int. J. Energy Res.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/er.7147>
- [15] de Fim F.C., Basso N.R.S., Graebin A.P. et al. Thermal, electrical, and mechanical properties of polyethylene–graphene nanocomposites obtained by in situ polymerization. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2012, vol. 128, no. 5, pp. 2630–2637, doi: <https://doi.org/10.1002/app.38317>
- [16] Song S., Li X., Shen C. et al. Graphene-modified C/C composites for enhanced directional thermal conductivity. *J. Mater. Res. Technol.*, 2025, vol. 36, pp. 4043–4052, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.089>
- [17] Khlaing Zo U., Yakovleva K.A., Kostromina N.V. properties of modified ED-20 epoxy resin. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2020, vol. 34, no. 7, pp. 114–116. (In Russ.).
- [18] Aradhana R., Mohanty S., Nayak S.K. Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives. *Polymer*, 2018, vol. 141, pp. 109–123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.03.005>
- [19] Shelar M.L., Bhosale D.G., Bhatkar V.D. et al. Experimental investigations of the effect of graphene reinforcement on the mechanical properties of epoxy resin. *Hybrid Advances*, 2025, vol. 9, art. 100422, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100422>
- [20] Pathak A.K., Borah M., Gupta A. et al. Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. *Compos. Sci. Technol.*, 2016, vol. 135, pp. 28–38, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.09.007>
- [21] Srivastava A.K., Singh A. An unexpected hardening behaviour of carbon-fiber epoxy composites under flexural fatigue loading and its intensification by graphene nanofillers. *Int. J. Fatigue*, 2024, vol. 182, art. 108177, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108177>
- [22] Srivastava A.K., Gupta V., Yerramalli C.S. et al. Flexural strength enhancement in carbon-fiber epoxy composites through graphene nano-platelets coating on fibers. *Compos. B Eng.*, 2019, vol. 179, art. 107539, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107539>
- [23] Leow C., Kreider P.B., Sommacal S. et al. Electrical and thermal conductivity in graphene-enhanced carbon-fibre/PEEK: the effect of interlayer loading. *Carbon*, 2023, vol. 215, art. 118463, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118463>

- [24] Zhou S., Wei W., Li L. et. al. In situ growth of graphene on carbon fibers to enhance the mechanical and thermal conductivity of epoxy composites. *Appl. Surf. Sci.*, 2025, vol. 680, art. 161299, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161299>
- [25] Ubaid J., Andrew J.J., Cantwell W.J. et. al. Performance evaluation of GNP-modified epoxy/carbon fiber composites after cryogenic thermal cycling for hydrogen storage applications. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2025, vol. 159, art. 150574, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150574>
- [26] Hassin M.S., Faruk M.O., Ali M.I. et. al. Evaluation of physical and mechanical properties of graphene oxide reinforced epoxy/Kevlar hybrid composites. *Hybrid Advances*, 2024, vol. 6, art. 100217, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100217>
- [27] Hussain S., Yorucu C., Ahmed I. et. al. Surface modification of aramid fibres by graphene oxide nano-sheets for multiscale polymer composites. *Surf. Coat. Technol.*, 2014, vol. 258, pp. 458–466, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.054>

Статья поступила в редакцию 25.12.2025

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

НЕЛЮБ Владимир Александрович — доктор технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Vladimir_Nelub.mail@emtc.ru).

ПАПИЧ Александр — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: papicha@student.bmstu.ru).

Information about the authors

GALINOVSKIY Andrey Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

NELYUB Vladimir Alexandrovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: Vladimir_Nelub.mail@emtc.ru).

PAPICH Alexander — Postgraduate, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: papicha@student.bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Нелюб В.А., Папич А. К вопросу о свойствах композиционных материалов, модифицированных графеном. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 42–49.

Please cite this article in English as:

Galinovskiy A.L., Nelyub V.A., Papich A. The issue of composite materials modified with graphene. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 42–49.