

Оригинальная статья

УДК 546.26:620.22
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.619-631>

Влияние элементного состава малослойного графена на прочностные свойства эпоксидной смолы

Н.Д. Подложнюк¹, А.А. Возняковский¹✉, А.П. Возняковский², С.В. Кидалов¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ alexey_inform@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрено влияние малослойного графена (МГ) различного состава на прочность, износостойкость и теплопроводность эпоксидной смолы. В качестве прекурсоров при синтезе использованы нитрат аммония и нитрат калия, что позволило варьировать состав МГ. Установлено, что добавление МГ увеличивает прочность на сжатие и износостойкость эпоксидной смолы. Показано, что повышенное число гетероатомов в структуре МГ практически не влияет на изменение прочности на сжатие. Однако износостойкость эпоксидной смолы увеличивается с ростом содержания гетероатомов в структуре МГ.

Ключевые слова: графен, малослойный графен, эпоксидная смола, полимерные композиты.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10254, <https://rscf.ru/project/23-79-10254/>).

Для цитирования: Подложнюк Н.Д., Возняковский А.А., Возняковский А.П., Кидалов С.В. Влияние элементного состава малослойного графена на прочностные свойства эпоксидной смолы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 4. С. 619–631. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.619-631>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.619-631>

Influence of the elemental composition of few-layer graphene on the strength properties of epoxy resin

N.D. Podlozhnyuk¹, A.A. Vozniakovskii¹✉, A.P. Voznyakovskii², S.V. Kidalov¹

¹Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

²Scientific Research Institute of Synthetic Rubber named after Academician S.V. Lebedev, St. Petersburg, Russia

✉alexey_inform@mail.ru

Abstract

This article examines the effect of few-layer graphene (FLG) at different compositions on the strength, wear resistance, and thermal conductivity of epoxy resin. The FLG composition was varied using ammonium nitrate and potassium nitrate as synthesis precursors. The incorporation of FLG enhanced the compressive strength and wear resistance of epoxy resin. Increasing the number of heteroatoms in the FLG structure had little influence on the compressive strength of epoxy resin but improved its wear resistance.

Keywords: graphene, few-layer graphene, epoxy resin, polymer composites

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-79-10254, <https://rsrf.ru/project/23-79-10254/>).

For citation: Podlozhnyuk N.D., Vozniakovskii A.A., Voznyakovskii A.P., Kidalov S.V. Influence of the elemental composition of few-layer graphene on the strength properties of epoxy resin. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 4, pp. 619–631. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.619-631>. (In Russian)

Введение

Эпоксидная смола является одним из наиболее популярных материалов, который нашел широкое применение в промышленности: от клеевых составов до напольных покрытий и авиастроения [1]. Одним из наиболее перспективных способов улучшения свойств изделий из эпоксидной смолы является создание композиционных материалов. При таком подходе удается сочетать свойства исходной матрицы (в том числе эпоксидной смолы) и наполнителя, что позволяет получать материалы с новыми свойствами [2]. Одними из наиболее перспективных наполнителей при создании композитов на основе эпоксидной смолы являются графеновые наноструктуры (ГНС), интерес к которым обусловлен их характеристиками. Рассматривая свойства однослойного графена, следует отметить его теплопроводность (5000 Вт/(м×К)) [3], модуль Юнга (1 ТПа) [4], удельную поверхность (2630 м²/г) [5].

Использование 0.5 % (масс.) графеновых нанопластин позволяет получить 31 %-ный рост прочности на трехточечный изгиб по сравнению с исходной смолой [6]. Применение

в качестве добавки 0.3 % (масс.) аминированного оксида графена обеспечивает увеличение прочности на растяжение на 67 %, прочности на изгиб на 51 % и ударной вязкости на 152 %, а также незначительное повышение температуры стеклования и термостойкости образцов [7]. В работе [8] показано, что введение в эпоксидную смолу до 2 % (об.) графеновых нанопластин, модифицированных длинноцепочечными поверхностно-активными веществами, приводит к повышению модуля упругости, прочности на разрыв и теплопроводности эпоксидной смолы на 889 %, 163 % и 105 % соответственно. В обзорных статьях [9, 10] также отмечается, что различные типы ГНС являются эффективными добавками при создании полимерных композитов на основе эпоксидных смол.

Однако введение ГНС в состав композитов не позволяет достичь теоретически предсказанных результатов. Среди основных причин несовпадения теоретических ожиданий с экспериментальными данными выделяют дефектность используемых ГНС, а также их склонность к агрегации [11]. Тем не менее ГНС с химически модифицированной поверхностью часто показывают большую эффективность, чем исходные ГНС, хотя подобная модификация может считаться увеличением дефектности ГНС. Кроме того, используемые ГНС имеют слишком высокую себестоимость вследствие несовершенства методик их синтеза по стратегиям «снизу-вверх» и «сверху-вниз» [12]. Поэтому применение ГНС является экономически нерентабельным.

Цель работы состоит в оценке влияния малослойного графена (МГ, не более 5 слоев), синтезированного в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, на свойства эпоксидной смолы. Рассмотрен эффект концентрации МГ и наличия атомов азота в МГ на регистрируемые характеристики композита. Поскольку показана эффективность добавления МГ, содержащего в своей структуре атомы азота, при создании композитов на основе эпоксидной смолы [13], то, исходя из того, что эффективность применения ГНС обратно пропорциональна их дефектности, можно предполагать, что МГ, не содержащий в структуре атомы азота, позволит превзойти ранее полученные результаты.

1. Материалы и методы

1.1. Синтез МГ. МГ получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [14]. Для получения МГ, содержащего азот ((N)МГ), использовали смесь глюкозы и нитрата аммония в массовом соотношении 1 : 1, а для получения не содержащего азот МГ использовали смесь глюкозы и нитрата калия в массовом соотношении 17 : 3. Затем порошки МГ измельчали в барабанной мельнице в течение 20 мин при соотношении массы мелящих тел к массе загрузки, равном 30, скорости вращения мельницы 200 об/мин и диаметре мелящих тел 14 мм. Насыпная плотность образцов МГ и (N)МГ составила 0.08 ± 0.02 г/см³.

1.2. Синтез композитов. Для получения композитов на основе эпоксидной смолы, модифицированной МГ, использовали смолу марки Keg 828 («Kumho P&B Chemicals», Южная Корея) с массовой долей эпоксидных групп 0.53 моль/г, которую смешивали с порошком МГ при температуре 45 °C в течение 30 мин с помощью верхнеприводной мешалки при 50 об/мин. Затем добавляли отвердитель триэтилентетрамин в соотношении 1 : 10 (к эпоксидной смоле), перемешивали смесь еще 5 мин, а после дегазировали с использованием вакуума. Полученную смесь разливали по формам, в которых проходило отверждение композита в течение 24 ч. Затем образцы нагревали в муфельной печи при 110 °C в течение 1 ч до полного отверждения эпоксидной смолы.

1.3. Исследование структуры МГ. Образцы МГ и (N)МГ были охарактеризованы методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием сканирующего электронного микроскопа Mira-3M (TESCAN, Чехия). Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab 3 (Rigaku, Япония) (CuK_α , $\lambda = 0.154051$ нм). ИК-спектры МГ получены с использованием спектрометра Инфраплюм ФТ-08 (ООО «Люмэкс-маркетинг», Россия). Спектры комбинационного рассеяния регистрировали на спектрометре Confotec NR500 (SOL Instruments, Республика Беларусь) при длине волны лазера 532 нм. Размеры частиц МГ установлены методом лазерной дифракции на анализаторе Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Ltd, Великобритания). Для этого 50 мг образца МГ дисперсировали в 50 мл деионированной воды путем взбалтывания в течение 1 мин. Измерение ζ -потенциала проводили с помощью анализатора Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd, Великобритания).

1.4. Исследование свойств композитов. Прочности на изгиб [15], разрыв [16] и сжатие [17] измеряли на универсальной испытательной машине HSL-UT-50PC (Dongguan Hongjin Test Instrument Co., КНР). Скорость нагружения составляла 10 мм/мин. Теплопроводность определяли методом горячей нити на приборе Tempos (METER Group, Inc., США при температуре 25 °C).

Для оценки износостойкости и коэффициента трения (сталь/полимер) использована универсальная машина трения УМТ-200 (НПЦ ООО «КОНВЕРС-РЕСУРС», Россия) согласно схеме трения диск–цилиндр [13]. Верхнее тело вращения прижимается к нижнему телу (испытуемый образец), которое жестко установлено на основании. При вращении верхнего тела начинает вращаться нижнее тело и основание, которое давит на тензодатчик. Из его показаний рассчитывают момент силы M , а затем коэффициент трения согласно уравнению 1

$$\mu = \frac{M}{F} \times \frac{R_1}{R_2}, \quad (1)$$

где M – момент силы, F – сила прижатия верхнего тела к нижнему, R_1 – радиус образца, R_2 – радиус отпечатка трения, оставленного верхним телом вращения. Износостойкость определяли как момент времени, при котором происходит разрушение поверхности образца в ходе трения, сопровождающееся резким скачком значения коэффициента трения. Сила прижатия верхнего тела вращения равна 45 Н, диаметр пятна контакта трения – 10 мм, скорость вращения – 500 об/мин.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Структура МГ. В синтезированных порошках МГ методом СЭМ удается обнаружить полупрозрачные пластинки МГ и (N)МГ (рис. 1, *a* и *б* соответственно). Помимо пластин присутствуют и более крупные агрегаты частиц неправильной формы. С помощью ЭДС анализа установлен состав образцов (% (ат.)): 85% С и 15 % О для МГ, и 76 % С, 12 % О и 12 % N для (N)МГ. Различия в элементном составе образцов, а именно наличие или отсутствие азота связано с выбором окислителя. Нитрат аммония при нагревании может выделять аммиак, азот и оксиды азота [18], а нитрат калия разлагается с выделением нитрита калия и кислорода [19]. В процессе экзотермической реакции синтеза (N)МГ температуры может быть достаточно для присоединения выделяющихся азота и аммиака.

С помощью рентгенофазового анализа (рис. 1, в и г) установлены межплоскостные расстояния в образцах, составившие 0.42 и 0.37 нм для МГ и (N)МГ соответственно. По формуле Шеррера [20] (уравнение 2) были рассчитаны размеры кристаллитов (d):

$$d = \frac{K \times \lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (2)$$

где K – постоянная Шеррера, равная 0.9, λ – длина волны излучения (нм), β – ширина пика на полувысоте (рад), θ – угол дифракции (рад). Размеры кристаллитов МГ и (N)МГ равны 1.13 и 0.99 нм соответственно. Разделив эти значения на соответствующие межплоскостные расстояния, можно заключить, что количество слоев в образцах МГ с учетом всех возможных допущений и погрешностей измерений, не превышает трех.

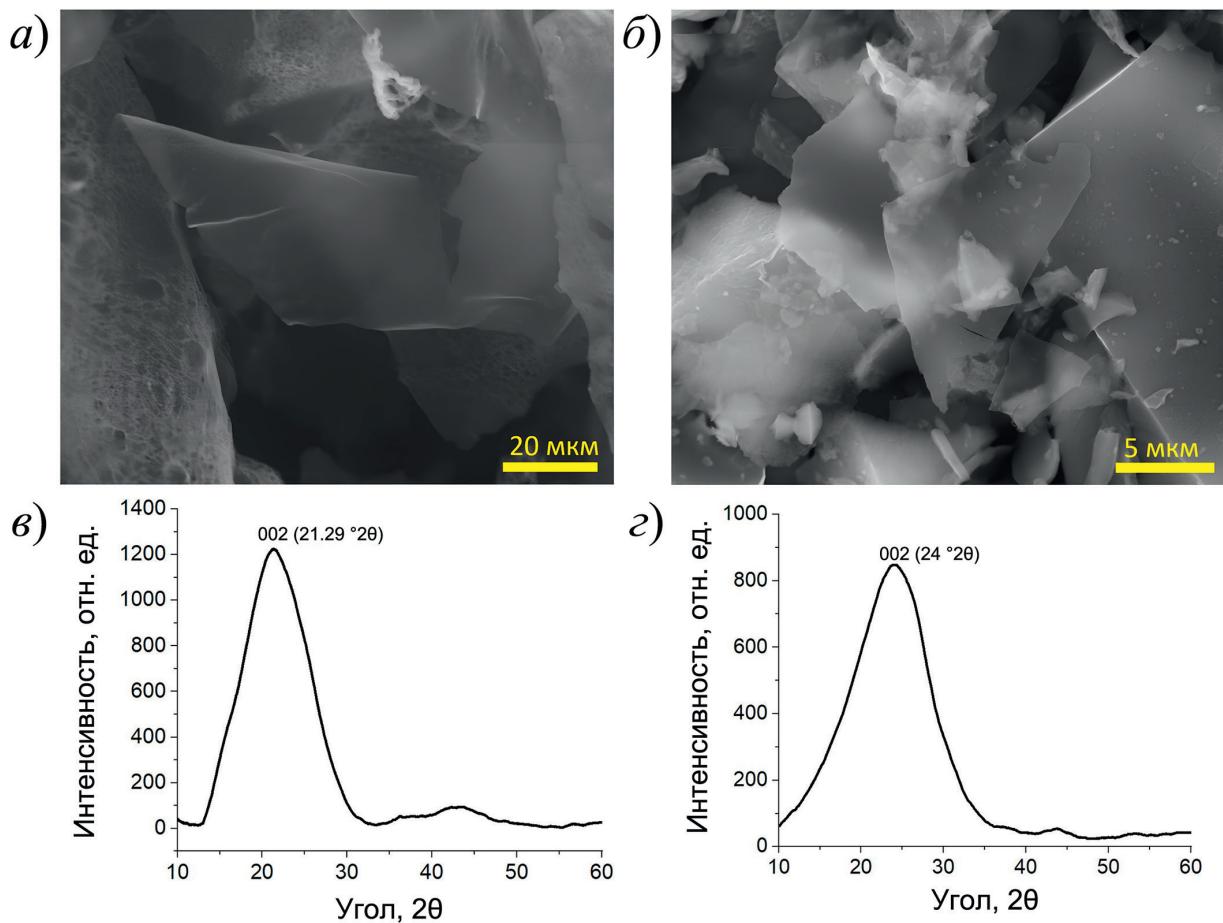


Рис. 1. СЭМ-изображения (а и б) и рентгенограммы (в и г) образцов МГ (а и в) и (N)МГ (б и г)

Fig. 1. SEM images (a and b) and X-ray diffraction patterns (c and d) of FLG (a and c) and (N)FLG (b and d) samples

Методом ИК-спектроскопии подтверждено наличие двойных связей в структуре образцов по присутствию характерных полос поглощения при 1577 см^{-1} и 1565 см^{-1} для МГ и (N)МГ соответственно (рис. 2). Также на спектрах присутствуют широкие полосы, отвечающие за колебание связи С–О, однако отнесение их к конкретным функциональным группам затруднительно. Кроме того, в (N)МГ широкая полоса смещена с 1233 см^{-1} относительно таковой в образце МГ, что, вероятно, связано с наличием азота и полос колебаний связи С–N.

Спектры комбинационного рассеяния также подтверждают наличие большого числа атомов азота и кислорода в образцах (рис. 2, *в* и *г*). Например, полосы 2D и D+D' настолько уширены, что сливаются в одну полосу при $2800\text{--}2900\text{ см}^{-1}$. Также уширены и частично перекрываются полосы D и G. В данном случае атомы азота и кислорода можно рассматривать как дефекты в ароматической структуре графена, что приводит к уширению полос [21, 22].

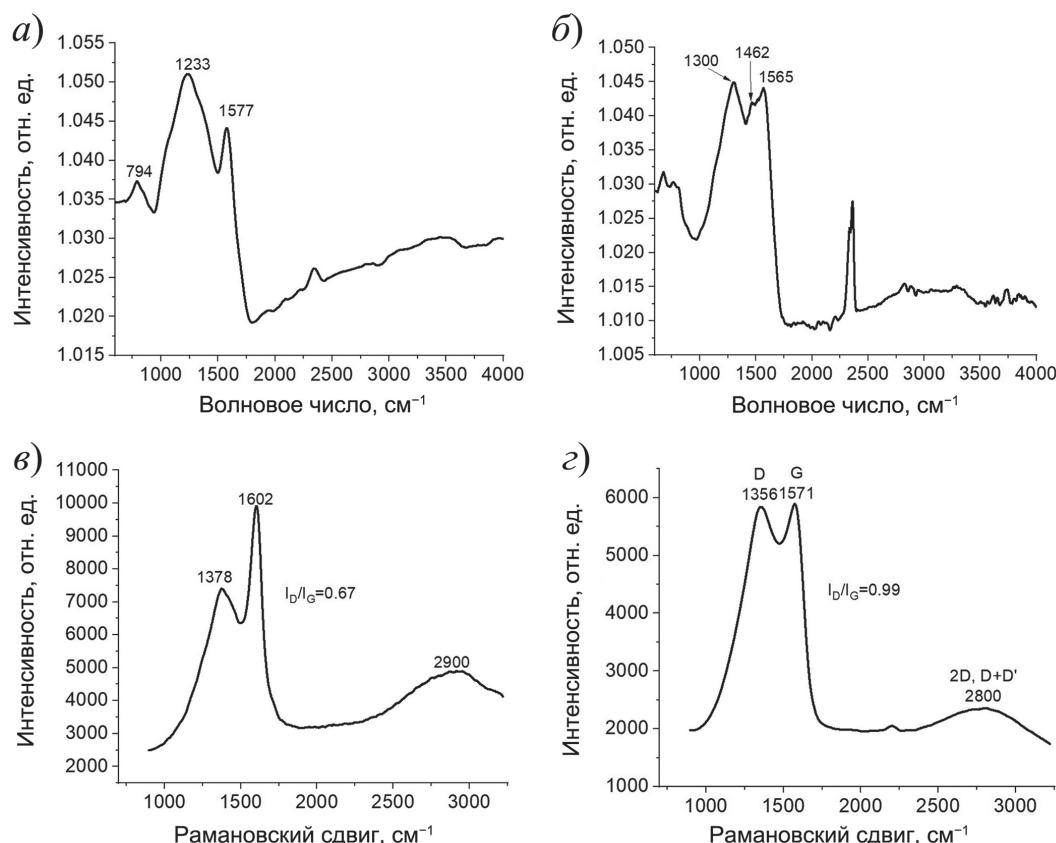


Рис. 2. ИК-спектры (*а* и *б*) и спектры комбинационного рассеяния (*в* и *г*) образцов МГ (*а* и *в*) и (N)МГ (*б* и *г*)

Fig. 2. FTIR (*a* and *b*) and Raman (*c* and *d*) spectra of FLG (*a* and *c*) and (N)FLG (*b* and *d*) samples

Порошки МГ после помола в барабанной мельнице имеют одинаковый средний размер частиц (табл. 1), поэтому влияние размера частиц на регистрируемые характеристики образцов можно не рассматривать. Большее по модулю значение ζ -потенциала демонстрирует МГ (табл. 1), что обусловлено присутствием атомов кислорода, которые имеют большую электроотрицательность по сравнению с атомами азота. Поэтому кислородсодержащие функциональные группы диссоциируют в водном растворе в большей степени. Кроме того, атомы азота в образце (N)МГ могут быть встроены в состав ароматической структуры, что может приводить к уменьшению общей степени диссоциации функциональных групп в составе (N)МГ.

Табл. 1. Средний размер частиц и ζ -потенциал образцов МГ

Table 1. Average particle size and ζ potential of FLG samples

Образец	Средний размер частиц, нм	ζ -потенциал, мВ
МГ	300 ± 25	-46 ± 2
(N)МГ	300 ± 25	-34 ± 2

2.2. Свойства композитов. Введение МГ в эпоксидную смолу приводит к уменьшению прочности на разрыв для обоих рассматриваемых образцов (рис. 3, а). Однако с учетом погрешности измерения его можно считать статистически незначимым.

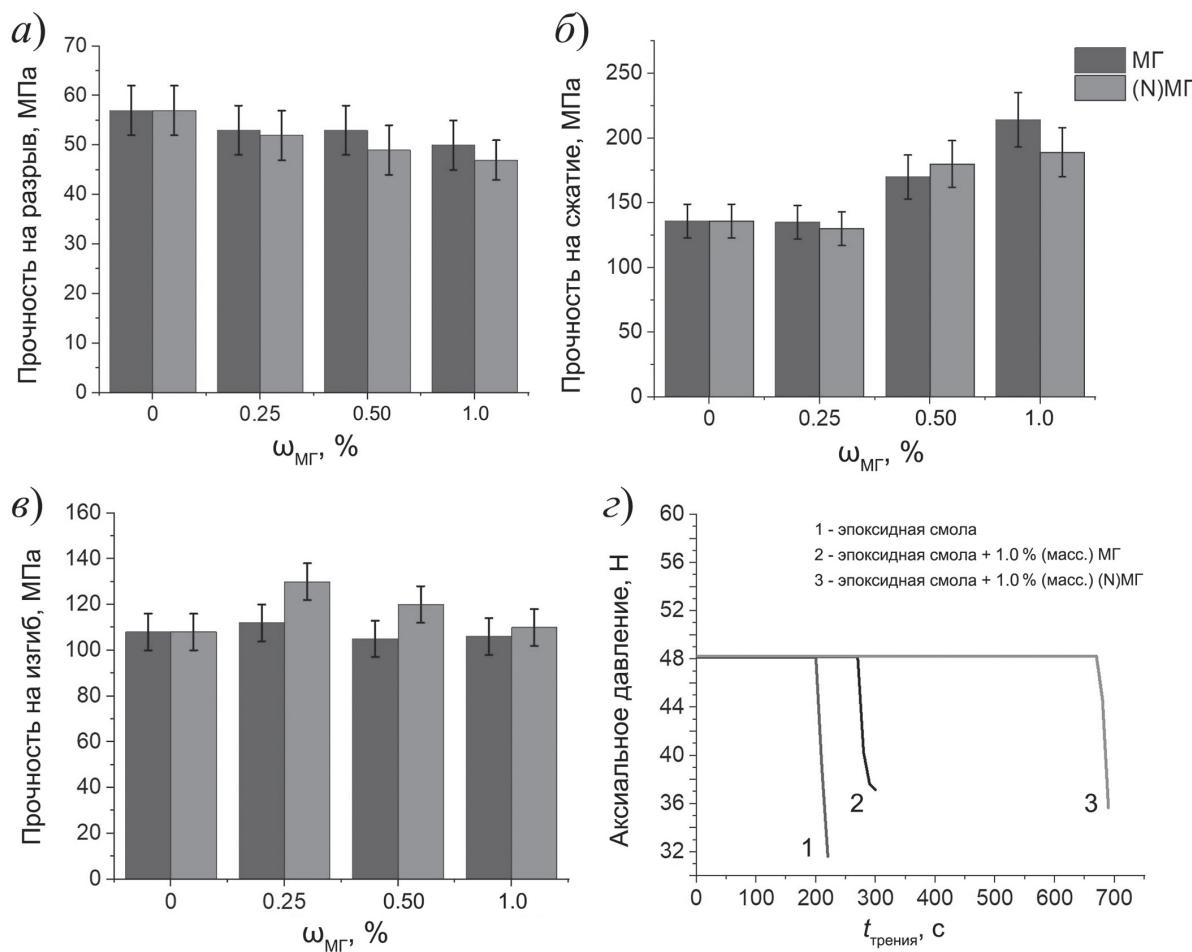


Рис. 3. Влияние содержания МГ и (N)МГ в композите на основе эпоксидной смолы на его прочность на изгиб (а), прочность на сжатие (б) и прочность на разрыв (в). Зависимость аксиального давления при трении композитов на основе эпоксидной смолы стальным цилиндром от времени трения (г)

Fig. 3. Effect of FLG and (N)FLG contents in the epoxy resin-based composite on flexural strength (a), compressive strength (b), and tensile strength (c). Dependence of axial pressure during the friction of the epoxy resin-based composites against a steel cylinder on friction time (d)

Установлено увеличение прочности на сжатие на 55 % и 40 % для композитов на основе эпоксидной смолы и 1.0 % (масс.) МГ или (N)МГ соответственно (рис. 3, б). Этот эффект можно рассмотреть с точки зрения движения дефектов в процессе пластической деформации, при которой в материале возникают дефекты (трещины) и происходит их движение и объединение по мере увеличения напряжения. По достижении определенного числа дефектов наступает разрушение материала. МГ может препятствовать перемещению дефектов и образованию трещин в материале, поэтому для разрушения образца необходимо приложить большее напряжение. Подобный механизм роста прочностных свойств полимерных материалов при добавлении ГНС описан в работе [23].

Прочность на изгиб практически не изменяется при введении МГ и только в композите с 0.25 % (масс.) (N)МГ наблюдается 20 %-ное увеличение, что можно связать с повышенным содержанием гетероатомов в (N)МГ и низкой агрегацией его частиц в этом случае.

Износостойкость композитов определена путем фиксирования разрушения поверхности образцов при трении (вращение на поверхности) стальным цилиндром по типу сверления. На рис. 3, *г* приведены кривые аксиального давления верхнего тела вращения (стального цилиндра) на поверхность образцов чистой эпоксидной смолы и эпоксидной смолы, модифицированной 1.0 % (масс.) МГ и (N)МГ. Для композитов наблюдается увеличение времени, необходимого для разрушения образцов, с 200 с до 260 и 670 с в случае МГ и (N)МГ соответственно. Такая разница в увеличении износостойкости, вероятно, связана с наличием атомов азота в структуре (N)МГ. Как показано ранее [24], наличие функционализированной поверхности важно для достижения хорошей адгезии МГ к эпоксидной смоле. Таким образом, за счет большего числа гетероатомов на поверхности (N)МГ, вероятно, имеет лучшую адгезию к эпоксидной смоле, чем МГ. Следует отметить, что при содержаниях 0.25 и 0.50 % (масс.) увеличение износостойкости не наблюдается. Процесс разрушения при вращении на поверхности можно описать следующим образом. Верхнее тело вращения (стальной цилиндр) неровностями своей поверхности проминает неровности на поверхности эпоксидной смолы, в результате чего в поверхностном слое эпоксидной смолы происходит накопление дефектов и микротрещин. Достижение определенного числа дефектов приводит к разрушению участка поверхности и, как следствие, уменьшению аксиального давления. Как и в случае с прочностными характеристиками композитов, МГ может препятствовать образованию трещин в материале, поэтому требуется большее напряжение для достижения разрушения, то есть увеличивается износостойкость композита.

Естественным побочным эффектом во время трения является нагревание участка трения. Разрушение при трении можно описать с точки зрения теплового разрушения – при нагревании молекулы становятся более подвижны и вероятность разрушения увеличивается. Таким образом, если эффективно отводить тепло из области трения, то время достижения температуры разрушения, то есть износостойкость, можно увеличить. Известно [25], что ГНС могут повышать теплопроводность полимерной матрицы. Однако МГ и (N)МГ практически не увеличивают теплопроводность эпоксидной смолы, так как большое число гетероатомов в составе обоих образцов значительно снижает теплопроводность частиц [26]. Рассматриваемые композиты демонстрируют более высокие значения теплопроводности по сравнению с эпоксидной смолой (табл. 2). Наблюдаемый эффект не объясняет увеличение износостойкости эпоксидной смолы.

Табл. 2. Теплопроводность эпоксидной смолы и ее композитов с МГ и (N)МГ

Table 2. Thermal conductivity of epoxy resin and its composites with FLG and (N)FLG

Образец	$\omega_{\text{МГ}}$, % (масс.)	Теплопроводность, Вт/(м×К)
Эпоксидная смола	0	0.14 ± 0.01
Композит с МГ	0.25	0.17 ± 0.01
	0.50	0.19 ± 0.01
	1.0	0.19 ± 0.01
Композит с (N)МГ	0.25	0.18 ± 0.01
	0.50	0.19 ± 0.01
	1.0	0.20 ± 0.01

Заключение

Показана возможность варьирования состава МГ (соотношение углерода, кислорода и азота в конечном образце), получаемого методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза путем использования различных окислителей. Установлено, что МГ может значительно увеличивать прочность на сжатие (до 50 %) конечных композитов на основе эпоксидной смолы, причем эффективность воздействия не зависит от химического состава МГ. В то же время триботехнические свойства композитов, содержащих МГ и (N)МГ, отличаются статистически значимо. Так, рост износстойкости для композитов, содержащих 1.0 % (масс) МГ и (N)МГ, составляет 30 и 235 % соответственно относительно износстойкости исходной эпоксидной смолы.

Анализ полученных данных позволяет высказать предположение, что рост прочностных и триботехнических свойств композитов связан с тем, что частицы МГ препятствуют образованию структурных дефектов (трещин) в образце, которые являются причиной разрушения материала при механической нагрузке.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Jin F.-L., Li X., Park S.-J. Synthesis and application of epoxy resins: A review // J. Ind. Eng. Chem. 2015. V. 29. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>.
2. Bhong M., Khan T.K.H., Devade K., Krishna B.V., Sura S., Eftikhaar H.K., Thethi H.P., Gupta N. Review of composite materials and applications // Mater. Today: Proc. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026>.
3. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene // Nano Lett. 2008. V. 8, No 3. P. 902–907. <https://doi.org/10.1021/nl0731872>.
4. Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene // Science. 2008. V. 321, No 5887. P. 385–388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>.
5. Zhu Y., Murali S., Cai W., Li X., Suk J.W., Potts J.R., Ruoff R.S. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications // Adv. Mater. 2010. V. 22, No 35. P. 3906–3924. <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>.
6. Parente J.M., Simões R., Reis P.N.B. Effect of graphene nanoparticles on suspension viscosity and mechanical properties of epoxy-based nanocomposites // Procedia Struct. Integr. 2022. V. 37. P. 820–825. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.02.014>.
7. Paraskar P., Bari P., Mishra S. Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites // Iran. Polym. J. 2020. V. 29, No 1. P. 47–55. <https://doi.org/10.1007/s13726-019-00772-w>.
8. Meng Q., Feng Y., Han S., Yang F., Demiral M., Meng F., Araby S. Developing functional epoxy/graphene composites using facile in-situ mechanochemical approach // J. Appl. Polym. Sci. 2023. V. 140, No 13. Art. e53681. <https://doi.org/10.1002/app.53681>.
9. Osman A., Elhakeem A., Kaytbay S., Ahmed A. A comprehensive review on the thermal, electrical, and mechanical properties of graphene-based multi-functional epoxy composites // Adv. Compos. Hybrid Mater. 2022. V. 5, No 2. P. 547–605. <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00423-4>.

10. Szeluga U., Pusz S., Kumanek B., Olszowska K., Kobylukh A., Trzebicka B. Effect of graphene filler structure on electrical, thermal, mechanical, and fire retardant properties of epoxy-graphene nanocomposites - a review // Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 2021. V. 46, No 2. P. 152–187. <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1708702>.
11. Bhatt M.D., Kim H., Kim G. Various defects in graphene: A review // RSC Adv. 2022. V. 12, No 33. P. 21520–21547. <https://doi.org/10.1039/D2RA01436J>.
12. Voznyakovskii A.P., Vozniakovskii A.A., Kidalov S.V. Few-layer graphene produced by the self-propagating high-temperature process from biopolymers: Synthesis, properties, and application (a review) // Russ. J. Inorg. Chem. 2024. V. 69, No 3. P. 334–340. <https://doi.org/10.1134/S0036023623603185>.
13. Podlozhnyuk N., Vozniakovskii A., Kidalov S., Voznyakovskii A. Performance properties of epoxy resin modified with few-layer graphene obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis // Polymers. 2025. V. 17, No 6. Art. 812. <https://doi.org/10.3390/polym17060812>.
14. Voznyakovskii A., Vozniakovskii A., Kidalov S. New way of synthesis of few-layer graphene nanosheets by the self-propagating high-temperature synthesis method from biopolymers // Nanomaterials. 2022. V. 12, No 4. Art. 657. <https://doi.org/10.3390/nano12040657>.
15. ISO 178:2019. Plastics – Determination of flexural properties. ISO TC 61/SC 2, 2019. 30 p.
16. ISO 527-2:2025. Plastics – Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. ISO TC 61/SC 2, 2025. 19 p.
17. ISO 604:2002. Plastics – Determination of compressive properties. ISO/TC 61/SC 2, 2002. 24 p.
18. Babrauskas V., Leggett D. Thermal decomposition of ammonium nitrate // Fire Mater. 2020. V. 44, No 2. P. 250–268. <https://doi.org/10.1002/fam.2797>.
19. Freeman E.S. The kinetics of the thermal decomposition of potassium nitrate and of the reaction between potassium nitrite and oxygen // J. Am. Chem. Soc. 1957. V. 79, No 4. P. 838–842. <https://doi.org/10.1021/ja01561a015>.
20. Weidenthaler C. Pitfalls in the characterization of nanoporous and nanosized materials // Nanoscale. 2011. V. 3, No 3. P. 792–810. <https://doi.org/10.1039/C0NR00561D>.
21. Ferrari A.C., Basko D.M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene // Nat. Nanotechnol. 2013. V. 8, No 4. P. 235–246. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.46>.
22. Díez-Betriu X., Álvarez-García S., Botas C., Álvarez P., Sánchez-Marcos J., Prieto C., Menéndez R., de Andrés A. Raman spectroscopy for the study of reduction mechanisms and optimization of conductivity in graphene oxide thin films // J. Mater. Chem. C. 2013. V. 1, No 41. P. 6905–6912. <https://doi.org/10.1039/C3TC31124D>.
23. Vozniakovskii A.A., Vozniakovskii A.P., Kidalov S.V., Otvalko J., Neverovskaya A.Yu. Characteristics and mechanical properties of composites based on nitrile butadiene rubber using graphene nanoplatelets // J. Compos. Mater. 2020. V. 54, No 23. P. 3351–3364. <https://doi.org/10.1177/0021998320914366>.
24. Подложнюк Н.Д., Возняковский А.А., Кидалов С.В., Возняковский А.П. Прочностные свойства эпоксидной смолы, модифицированной малослойным графеном // Журнал технической физики. 2025. Т. 95, № 2. С. 239–246. <https://doi.org/10.61011/JTF.2025.02.59714.291-24>.
25. Li A., Zhang C., Zhang Y.-F. Thermal conductivity of graphene-polymer composites: Mechanisms, properties, and applications // Polymers. 2017. V. 9, No 9. Art. 437. <https://doi.org/10.3390/polym9090437>.
26. Huang X., Zhi C., Lin Y., Bao H., Wu G., Jiang P., Mai Y.-W. Thermal conductivity of graphene-based polymer nanocomposites // Mater. Sci. Eng., R. 2020. V. 142. Art. 100577. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100577>.

References

1. Jin F.-L., Li X., Park S.-J. Synthesis and application of epoxy resins: A review. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2015, vol. 29, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>.
2. Bhong M., Khan T.K.H., Devade K., Krishna B.V., Sura S., Eftikhaar H.K., Thethi H.P., Gupta N. Review of composite materials and applications. *Mater. Today: Proc.*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026>.
3. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Lett.*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 902–907. <https://doi.org/10.1021/nl0731872>.
4. Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 2008, vol. 321, no. 5887, pp. 385–388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>.
5. Zhu Y., Murali S., Cai W., Li X., Suk J.W., Potts J.R., Ruoff R.S. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. *Adv. Mater.*, 2010, vol. 22, no. 35, pp. 3906–3924. <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>.
6. Parente J.M., Simões R., Reis P.N.B. Effect of graphene nanoparticles on suspension viscosity and mechanical properties of epoxy-based nanocomposites. *Procedia Struct. Integr.*, 2022, vol. 37, pp. 820–825. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.02.014>.
7. Paraskar P., Bari P., Mishra S. Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites. *Iran. Polym. J.*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 47–55. <https://doi.org/10.1007/s13726-019-00772-w>.
8. Meng Q., Feng Y., Han S., Yang F., Demiral M., Meng F., Araby S. Developing functional epoxy/graphene composites using facile in-situ mechanochemical approach. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2023, vol. 140, no. 13, art. e53681. <https://doi.org/10.1002/app.53681>.
9. Osman A., Elhakeem A., Kaytbay S., Ahmed A. A comprehensive review on the thermal, electrical, and mechanical properties of graphene-based multi-functional epoxy composites. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 547–605. <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00423-4>.
10. Szeluga U., Pusz S., Kumanek B., Olszowska K., Kobyliukh A., Trzebicka B. Effect of graphene filler structure on electrical, thermal, mechanical, and fire retardant properties of epoxy-graphene nanocomposites - a review. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, 2021, vol. 46, no. 2, pp. 152–187. <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1708702>.
11. Bhatt M.D., Kim H., Kim G. Various defects in graphene: A review. *RSC Adv.*, 2022, vol. 12, no. 33, pp. 21520–21547. <https://doi.org/10.1039/D2RA01436J>.
12. Voznyakovskii A.P., Vozniakovskii A.A., Kidalov S.V. Few-layer graphene produced by the self-propagating high-temperature process from biopolymers: Synthesis, properties, and application (a review). *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 334–340. <https://doi.org/10.1134/S0036023623603185>.
13. Podlozhnyuk N., Vozniakovskii A., Kidalov S., Voznyakovskii A. Performance properties of epoxy resin modified with few-layer graphene obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 6, art. 812. <https://doi.org/10.3390/polym17060812>.
14. Voznyakovskii A., Vozniakovskii A., Kidalov S. New way of synthesis of few-layer graphene nanosheets by the self-propagating high-temperature synthesis method from biopolymers. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 4, art. 657. <https://doi.org/10.3390/nano12040657>.
15. ISO 178:2019. Plastics – Determination of flexural properties. ISO TC 61/SC 2, 2019. 30 p.
16. ISO 527-2:2025. Plastics – Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. ISO TC 61/SC 2, 2025. 19 p.
17. ISO 604:2002. Plastics – Determination of compressive properties. ISO/TC 61/SC 2, 2002. 24 p.

18. Babrauskas V., Leggett D. Thermal decomposition of ammonium nitrate. *Fire Mater.*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 250–268. <https://doi.org/10.1002/fam.2797>.
19. Freeman E.S. The kinetics of the thermal decomposition of potassium nitrate and of the reaction between potassium nitrite and oxygen. *J. Am. Chem. Soc.*, 1957, vol. 79, no. 4, pp. 838–842. <https://doi.org/10.1021/ja01561a015>.
20. Weidenthaler C. Pitfalls in the characterization of nanoporous and nanosized materials. *Nanoscale*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 792–810. <https://doi.org/10.1039/C0NR00561D>.
21. Ferrari A.C., Basko D.M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nat. Nanotechnol.*, 2013, vol. 8, no. 4, pp. 235–246. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.46>.
22. Diez-Betriu X., Álvarez-García S., Botas C., Álvarez P., Sánchez-Marcos J., Prieto C., Menéndez R., de Andrés A. Raman spectroscopy for the study of reduction mechanisms and optimization of conductivity in graphene oxide thin films. *J. Mater. Chem. C*, 2013, vol. 1, no. 41, pp. 6905–6912. <https://doi.org/10.1039/C3TC31124D>.
23. Vozniakovskii A.A., Vozniakovskii A.P., Kidalov S.V., Otvalko J., Neverovskaya A.Yu. Characteristics and mechanical properties of composites based on nitrile butadiene rubber using graphene nanoplatelets. *J. Compos. Mater.*, 2020, vol. 54, no. 23, pp. 3351–3364. <https://doi.org/10.1177/0021998320914366>.
24. Podlozhnyuk N.D., Vozniakovskii A.A., Kidalov S.V., Voznyakovskii A.P. Strength properties of epoxy resin modified with few-layer graphene. *Tech. Phys.*, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 221–227. <https://doi.org/10.61011/TP.2025.02.60817.291-24>.
25. Li A., Zhang C., Zhang Y.-F. Thermal conductivity of graphene-polymer composites: Mechanisms, properties, and applications. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 9, art. 437. <https://doi.org/10.3390/polym9090437>.
26. Huang X., Zhi C., Lin Y., Bao H., Wu G., Jiang P., Mai Y.-W. Thermal conductivity of graphene-based polymer nanocomposites. *Mater. Sci. Eng., R*, 2020, vol. 142, art. 100577. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100577>.

Информация об авторах

Никита Денисович Подложнюк, младший научный сотрудник лаборатории физики кластерных структур отделения твердотельной электроники, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

E-mail: podloznuknikita@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4414-6066>

Алексей Александрович Возняковский, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики кластерных структур отделения твердотельной электроники, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

E-mail: alexey_inform@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-172X>

Александр Петрович Возняковский, доктор химических наук, заведующий сектором наногетерогенных полимерных материалов, Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева

E-mail: voznap@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5979-3661>

Сергей Викторович Кидалов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики кластерных структур отделения твердотельной электроники, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

E-mail: Kidalov@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5685-9899>

Author Information

Nikita D. Podlozhnyuk, Junior Researcher, Laboratory of Physics for Cluster Structures, Department of Solid-State Electronics, Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences

E-mail: podloznuknikita@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4414-6066>

Aleksei A. Vozniakovskii, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of Physics for Cluster Structures, Department of Solid-State Electronics, Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences

E-mail: alexey_inform@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-172X>

Alexandr P. Voznyakovskii, Dr. Sci. (Chemistry), Head of Sector of Nanoheterogeneous Polymer Materials, Scientific Research Institute of Synthetic Rubber named after Academician S.V. Lebedev

E-mail: voznap@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5979-3661>

Sergey V. Kidalov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Laboratory of Physics for Cluster Structures, Department of Solid-State Electronics, Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences

E-mail: Kidalov@mail.ioffe.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5685-9899>

Поступила в редакцию 10.06.2025

Received June 10, 2025

Принята к публикации 25.07.2025

Accepted July 25, 2025