
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

УДК 538.958:544.032.4

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГРАФЕНОМ И УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

И. Н. ПАРХОМЕНКО¹⁾, Л. А. ВЛАСУКОВА¹⁾,
И. Д. ПАРФИМОВИЧ²⁾, А. С. КАМЫШАН²⁾, М. Н. ЖУКОВА²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Аннотация. После термоциклирования в условиях, эквивалентных 16 ч нахождения на околоземной орбите, изучены спектры поглощения полимерных эпоксидных композитов с наполнителями «Графен» и «Таунит-МД», содержащими графеновые нанопластины и многостенные углеродные нанотрубки соответственно. Для синтезированных полимеров определены коэффициент поглощения солнечного излучения (α_s) и коэффициент излучения (ϵ) в тепловом ИК-диапазоне. Показано, что добавление 1 мас. % углеродного наполнителя в эпоксидную матрицу приводит к возрастанию коэффициента α_s с 0,88 до 0,94–0,95 и коэффициента ϵ с 0,93 до 0,95–0,96. Обнаружено, что термоциклические нагрузки в вакуумной камере, имитирующей условия ближнего космоса, обуславливали увеличение коэффициента α_s образца с графеновыми нанопластинами на 0,5 %, тогда как для образца с углеродными нанотрубками данный показатель уменьшался на 0,4 %. Коэффициент поглощения солнечного излучения немодифицированного эпоксидного полимера после термических нагрузок снижался примерно на 2 %. Коэффициент излучения по окончании термоциклирования возрастал на величину $\Delta\epsilon = 0,006$ (0,6 %) для немодифицированной эпоксидной смолы и на величину $\Delta\epsilon = 0,002$ (0,2 %) для образцов с наполнителями. На основе данных оптической спектроскопии и ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье проанализированы физические процессы, происходящие в нанокompозитах при термоциклировании в сочетании с УФ-облучением.

Образец цитирования:

Пархоменко И.Н., Власукова Л.А., Парфимович И.Д., Камышан А.С., Жукова М.Н. Влияние термоциклирования на оптические свойства нанокompозитов на основе эпоксидной смолы, модифицированной графеном и углеродными нанотрубками. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2025;1:29–37.
EDN: JLRVUK

For citation:

Parkhomenko IN, Vlasukova LA, Parfimovich ID, Kamyshan AS, Zhukova MN. Effect of thermal cycles on optical properties of epoxy resin reinforced with graphene and carbon nanotubes. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2025;1:29–37. Russian.
EDN: JLRVUK

Сведения об авторах см. на с. 37.

Information about the authors see p. 37.



Ключевые слова: термоциклы; эпоксидная смола; графен; углеродные нанотрубки; поглощение солнечного излучения.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Конвергенция-2025» (задание 3.07.1.2, № гос. регистрации 20211910, и задание 3.07.1, № гос. регистрации 20211235).

EFFECT OF THERMAL CYCLES ON OPTICAL PROPERTIES OF EPOXY RESIN REINFORCED WITH GRAPHENE AND CARBON NANOTUBES

I. N. PARKHOMENKO^a, L. A. VLASUKOVA^a,
I. D. PARFIMOVICH^b, A. S. KAMYSHAN^b, M. N. ZHUKOVA^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bA. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,
7 Kurchatava Street, Minsk 220045, Belarus

Corresponding author: L. A. Vlasukova (vlasukova@bsu.by)

Abstract. The effect of thermal cycling under conditions equivalent to 16 h in near-earth orbit on the optical absorption of pristine epoxy resin and epoxy-based polymers with the addition of graphene nanoplatelets and multi-walled carbon nanotubes has been studied. The coefficient of absorption of solar radiation (α_s) and the emissivity (ϵ) in the thermal IR range of the synthesised polymers were determined. It was shown that the addition of 1 wt. % of carbon filler leads to an increase in α_s from 0.88 to 0.94–0.95 and ϵ from 0.93 to 0.95–0.96. It was found that thermal cycling results in an increase in α_s of the sample with graphene nanoplatelets by 0.5 %. In the case of the sample with carbon nanotubes α_s decreased by 0.4 %. The coefficient of absorption of solar radiation of the unmodified epoxy resin decreased by about 2 % after thermal cycling. The emissivity increased by $\Delta\epsilon = 0.006$ (0.6 %) for unmodified epoxy resin and by $\Delta\epsilon = 0.002$ (0.2 %) for the samples with carbon fillers after thermal cycling. Based on the optical and Fourier transform IR spectroscopy data, the physical processes occurring in composites during thermal cycling combined with UV radiation are discussed.

Keywords: thermal cycles; epoxy resin; graphene; carbon nanotubes; absorption of solar radiation.

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of the state programme of scientific research «Convergence-2025» (assignment 3.07.1.2, state registration No. 20211910, and assignment 3.07.1, state registration No. 20211235).

Введение

Современные материалы, используемые в аэрокосмической отрасли, должны отвечать требованиям высокой прочности, легкости и устойчивости к негативным факторам на околоземной орбите – радиации, температурным колебаниям, вакууму, УФ-излучению, воздействию атомарного кислорода и др. В этом контексте полимерные композиции на основе эпоксидной смолы, модифицированной такими наноматериалами, как графен и углеродные нанотрубки, представляют собой перспективные решения благодаря уникальным механическим, электрическим и оптическим свойствам [1–5].

В данной работе приведены результаты эксперимента по имитации термоциклирования в условиях ближнего космоса. При воздействии термических нагрузок в вакууме в сочетании с УФ-облучением может происходить деградация эпоксидного полимера с потерей прочностных и оптических характеристик и изменением вязкости, а также газовыделение [6]. Процессы деструкции полимера приводят к образованию летучих веществ, которые, высвобождаясь, ухудшают адгезию между компонентами нанокомпозита [7]. Модификация смолы графеном и углеродными нанотрубками может не только улучшить механические свойства, но и оптимизировать коэффициент поглощения солнечного излучения, что позволяет более эффективно управлять тепловыми процессами в космических условиях. Кроме того, углеродные наночастицы являются УФ-стабилизаторами, способными поглощать УФ-излучение и защищать покрытия на эпоксидной основе [8].

Одним из ключевых аспектов при разработке подобных композиций является процесс диспергирования наноматериалов в эпоксидной матрице. Графен ввиду своей двумерной структуры требует более

сложных методов диспергирования для достижения однородности, поскольку его плоскостные нанопластины склонны к агрегации. В то же время углеродные нанотрубки, обладающие линейной формой, как правило, лучше распределяются в матрице, но их ориентация и взаимодействие с полимером также влияют на свойства конечного материала.

Целью данной работы является изучение влияния термоциклирования в сочетании с УФ-облучением на поглощательные характеристики эпоксидной смолы, содержащей графеновые нанопластины и многостенные углеродные нанотрубки, а также анализ взаимодействия этих двух наполнителей с эпоксидной матрицей методом оптической спектроскопии.

Материалы и методы исследования

Полимерные композиционные материалы изготавливались на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 и отвердителя «Этал-45М» при соотношении смолы и отвердителя 2 : 1 с добавлением наполнителей, содержащих графеновые нанопластины (наполнитель «Графен») и многостенные углеродные нанотрубки (наполнитель «Таунит-МД»), производства компании ООО «НаноТехЦентр» (Тамбов, Россия). Концентрация наполнителя в составе полимера была равна 1 мас. %.

Графеновые нанопластины в наполнителе «Графен» состоят из 15–25 графеновых слоев и имеют толщину 6–8 нм, их содержание достигает 4–7 мас. %. Средний диаметр многостенных углеродных нанотрубок в наполнителе «Таунит-МД» составляет 10–20 нм, а их длина – более 20 мкм.

Углеродные наноструктуры предварительно диспергировались в 100 ммоль/л растворе неионогенных поверхностно-активных веществ типа ОП-7 ($\text{O}(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_7\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$) в ацетоне с помощью ультразвукового диспергатора UP400St (*Hielscher*, Германия) при частоте 27 кГц в течение 30 мин с плавным повышением мощности до 80 Вт. По окончании процедуры диспергирования полученная суспензия помещалась в сушильный шкаф при температуре 40 °С для выпаривания ацетона до пастообразного состояния смеси. Затем пастообразная смесь вводилась в состав эпоксидного полимера посредством механического перемешивания в течение 10–15 мин при скорости вращения пропеллера 100–200 об/мин. После завершения диспергирования и перемешивания жидкий композит переливался в требуемую форму для последующей полимеризации. Внешний вид изготовленных образцов показан на рис. 1.

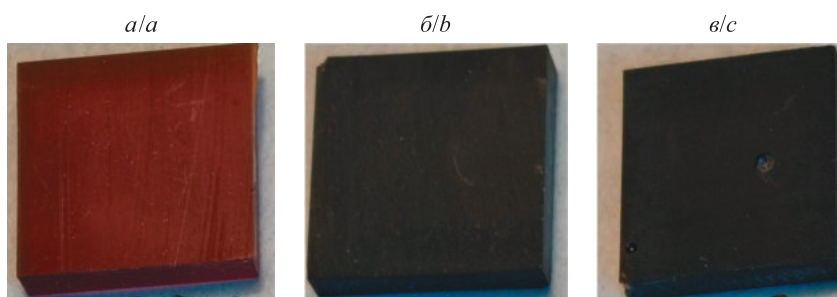


Рис. 1. Внешний вид образцов на основе эпоксидной смолы без наполнителей (а) и с углеродными наполнителями «Графен» (б) и «Таунит-МД» (в)

Fig. 1. The samples based on epoxy resin without fillers (a) and with carbon fillers «Graphene» (b) and «Taunit-MD» (c)

Для каждого образца было проведено четыре цикла нагрева и охлаждения. Нагрев осуществлялся излучением кварцевой ртутной лампы мощностью 160 Вт, помещенной в вакуумную камеру вместе с образцом при давлении $1 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Площадь равномерного облучения составляла 2×1 см². Плотность потока энергии на образце была равна 0,44 Вт/см². Стоит отметить, что 1 ч УФ-облучения при таких параметрах эквивалентен 9 ч нахождения на орбите в условиях ближнего космоса. Суммарное время облучения образца составило 1,8 ч. Использовался следующий режим нагрева и охлаждения: нагрев от 15 до 150 °С в течение 20 мин, потом охлаждение при отключенном источнике излучения до температуры 140 °С на протяжении 3 мин, далее снова нагрев до 160 °С в течение 7 мин, затем охлаждение до комнатной температуры на протяжении около 90 мин. Суммарное время нахождения образца при температуре 140–160 °С составило 1,3 ч.

Спектры диффузного отражения ($R(\lambda)$) в диапазоне 0,2–2,5 мкм регистрировались на установке Lambda-1050 UV/Vis (*PerkinElmer*, США) с помощью приставки «Интегрирующая сфера». С использованием спектров диффузного отражения и международного стандарта ASTM E-490 AM0 энергетического спектра солнечного излучения за пределами атмосферы ($I_s(\lambda)$) был рассчитан коэффициент поглощения солнечного излучения (α_s) по формуле

$$\alpha_s = \frac{\int_{0,2}^{2,5} I_s(\lambda) [1 - R(\lambda)] d\lambda}{\int_{0,2}^{2,5} I_s(\lambda) d\lambda},$$

где λ – длина волны излучения, мкм.

В работе анализировались спектры поглощения образцов, полученные путем пересчета спектров диффузного отражения с применением функции Кубелки – Мунка

$$F(\lambda) = \frac{(1 - R(\lambda))^2}{2R(\lambda)}.$$

Спектры отражения в среднем ИК-диапазоне (2,5–25,0 мкм) регистрировались на ИК-спектрометре с преобразованием Фурье Spectrum-3 Optica (*PerkinElmer*) с помощью приставки 10Срес (*Pike Technologies*, США). С использованием спектров отражения в ИК-области оценена интегральная излучательная способность ($\varepsilon(T)$) по формуле

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{2,5}^{25,0} b(\lambda, T) \varepsilon(\lambda, T) d\lambda}{\int_{2,5}^{25,0} b(\lambda, T) d\lambda},$$

где $b(\lambda, T)$ – спектральная плотность излучения абсолютно черного тела (формула Планка); $\varepsilon(\lambda, T)$ – спектр поглощения (излучения); T – температура (при расчетах была принята равной 80 °С).

Результаты и их обсуждение

При проведении первого термоцикла (нагрева) наблюдается заметное падение вакуума в рабочей камере для всех образцов, причем его степень меняется от образца к образцу. Так, для образца немодифицированной эпоксидной смолы вакуум падает в 7–8 раз, для образца с графеновыми нанопластинами – в 10 раз, для образца с многостенными углеродными нанотрубками – в 20 раз. Таким образом, для полимера с углеродными нанотрубками зафиксировано максимальное газовыделение. При проведении второго и последующих термоциклов газовыделение было незначительным. Стоит отметить, что вакуум падал именно при работающей галогенной лампе. В отсутствие УФ-облучения заметного газовыделения не происходило. Внешний вид образцов после термической нагрузки не изменился.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента поглощения солнечного излучения (α_s) и коэффициента излучения (ε) в тепловом ИК-диапазоне на основе спектров отражения.

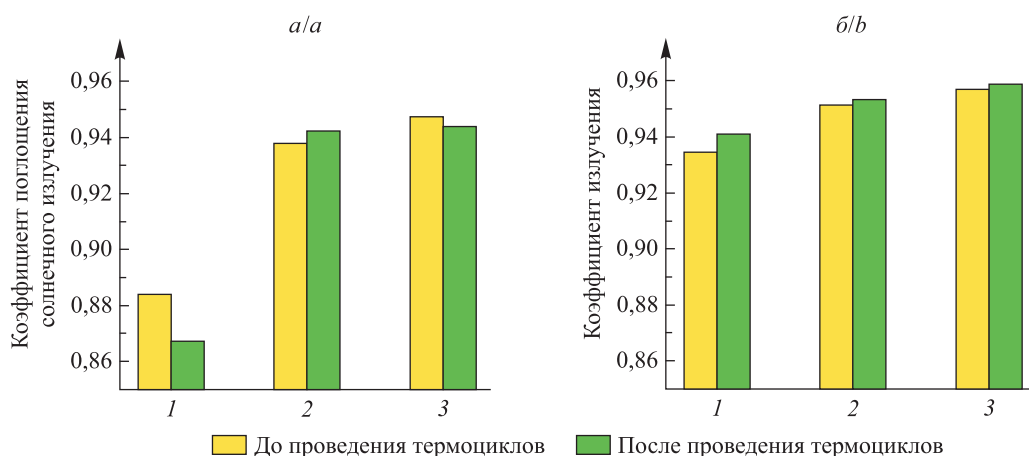


Рис. 2. Действие термической нагрузки на коэффициент поглощения солнечного излучения (а) и коэффициент излучения (б) образцов на основе эпоксидной смолы без наполнителей (1) и с углеродными наполнителями «Графен» (2) и «Таунит-МД» (3)

Fig. 2. Effect of thermal cycles on the coefficient of absorption of solar radiation (a) and emissivity (b) of samples based on epoxy resin without fillers (1) and with carbon fillers «Graphene» (2) and «Taunit-MD» (3)

Коэффициент поглощения солнечного излучения эпоксидной смолы возрастает с 0,88 до 0,94 и 0,95 при добавлении наполнителей «Графен» и «Таунит-МД» соответственно. После проведения термоциклов коэффициент α_s немодифицированной эпоксидной смолы уменьшается на величину $\Delta\alpha_s = 0,017$ (примерно на 2 %). Для образца с многостенными углеродными нанотрубками коэффициент α_s снижается в меньшей степени – на величину $\Delta\alpha_s = 0,004$ (0,4 %), а для образца с графеновыми нанопластинами, наоборот, возрастает на величину $\Delta\alpha_s = 0,005$ (0,5 %). Коэффициент излучения эпоксидной смолы также увеличивается при добавлении наполнителей: с 0,94 до 0,95 для образца с графеновыми нанопластинами и с 0,94 до 0,96 для образца с многостенными углеродными нанотрубками. Термоциклирование приводит к росту данного показателя на величину $\Delta\epsilon = 0,006$ (0,6 %) для немодифицированной эпоксидной смолы и на величину $\Delta\epsilon = 0,002$ (0,2 %) для образцов с наполнителями.

На рис. 3 представлены спектры поглощения образцов немодифицированной и модифицированной эпоксидной смолы до и после проведения термоциклов.

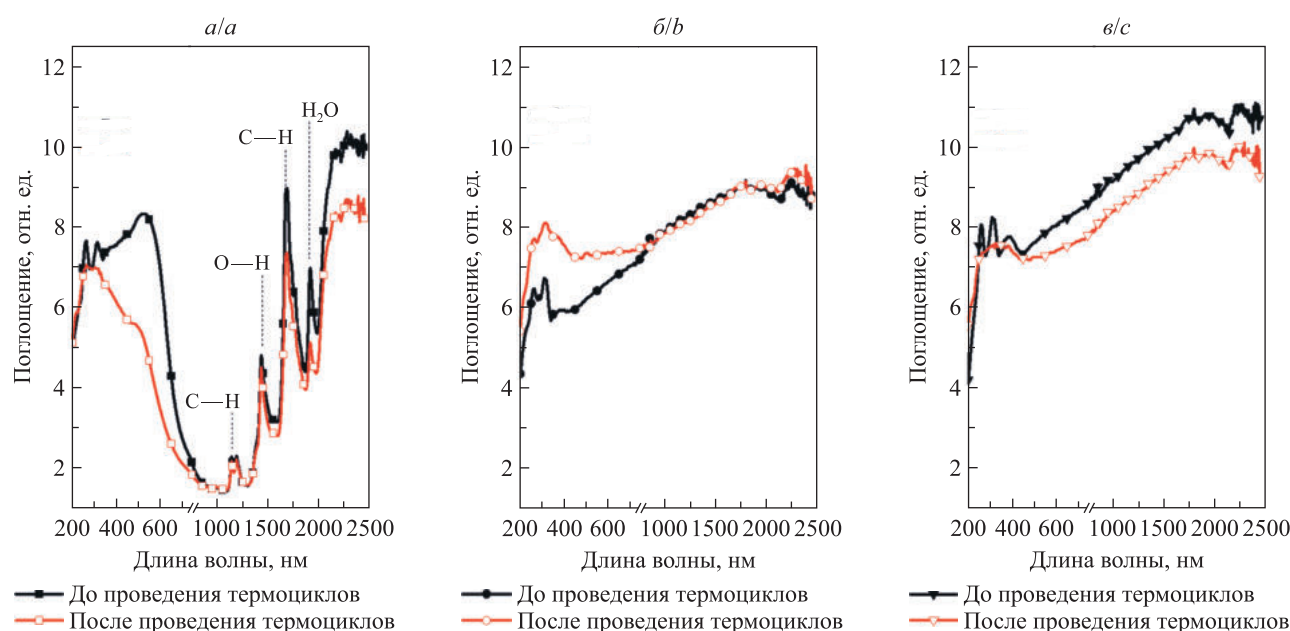


Рис. 3. Спектры поглощения образцов на основе эпоксидной смолы без наполнителей (а) и с углеродными наполнителями «Графен» (б) и «Таунит-МД» (в) до и после термической нагрузки

Fig. 3. Absorbance spectra of the samples based on epoxy resin without fillers (a) and with carbon fillers «Graphene» (b) and «Taunit-MD» (c) before and after thermal cycles

Как показывает анализ спектров, для немодифицированной эпоксидной смолы поглощение уменьшается за счет изменения интенсивности отдельных полос в видимом диапазоне и ближней ИК (БИК) области, природа которых будет описана ниже. Для образца с наполнителем «Графен» поглощение увеличивается преимущественно в УФ-диапазоне и видимой области, а в БИК-диапазоне оно не изменяется. Как продемонстрировано в работах [9; 10], отдельные углеродные нанотрубки и графеновые листы более интенсивно поглощают излучение в УФ-области и видимом диапазоне, тогда как связанные углеродные нанотрубки и сложенные графеновые нанопластины не активны в данной части спектра. Исходя из этого, можно предположить, что термическая нагрузка привела к улучшению диспергирования графеновых нанопластин в эпоксидной матрице. Для образца с наполнителем «Таунит-МД», напротив, поглощение равномерно изменяется в длинноволновой области. Уменьшение поглощения может быть связано с процессами скручивания многостенных углеродных нанотрубок во время термоциклов [11]. Для немодифицированной эпоксидной смолы и образцов с наполнителями в УФ-области спектра наблюдаются две интенсивные полосы при 262 и 315 нм и более слабая полоса при 385 нм. В спектре немодифицированной эпоксидной смолы последняя полоса перекрывается более интенсивной широкой полосой с максимумом в зеленой области при 525 нм. Эти три полосы в УФ-области являются характерными полосами ароматических соединений, соответствующими $\pi \rightarrow \pi^*$ -переходам бензольного кольца с заместителями [12–16]. За широкую полосу при 525 нм, вероятно, ответственны делокализованные состояния или донорно-акцепторное взаимодействие [17].

В БИК-области спектров немодифицированной эпоксидной смолы проявился ряд полос, обусловленных обертонами и составными колебаниями связей С—Н в эпоксидной смоле, а также гидроксильных групп, включая связанные молекулы воды [18–22]. В спектрах образцов с углеродными наполнителями данные полосы поглощения отсутствуют. Возможно, за сигнал от эпоксидной матрицы в УФ-области, проявившийся в спектрах всех образцов, ответственны группы, локализованные на поверхности образца. С другой стороны, поглощение в БИК-области происходит в более толстом слое материала, а отсутствие данных полос в спектрах модифицированной смолы можно объяснить как уменьшением эффективной толщины диагностируемого слоя при добавлении наполнителей, так и меньшим количеством пузырей, в которых адсорбируется вода.

Воздействие термических нагрузок в сочетании с УФ-облучением привело к уширению и ослаблению полос в УФ-области спектров немодифицированной эпоксидной смолы. Такое уширение может свидетельствовать о формировании более сложной структуры полимера. Можно предположить, что в условиях проведенного эксперимента активируется процесс сшивания полимерных цепей в силу наличия непрореагировавших компонентов. В БИК-диапазоне также наблюдается снижение интенсивности полос, в особенности полосы воды при 1915 нм. Таким образом, дегазация немодифицированной эпоксидной смолы в определенной степени обусловлена процессом осушения полимера и, вероятно, уменьшением его пористости. Существенное снижение интенсивности полос в УФ-области также наблюдается для образца с наполнителем «Таунит-МД», тогда как для образца с наполнителем «Графен» полосы при 262 и 315 нм остаются достаточно интенсивными и после термической нагрузки. Отмеченная особенность свидетельствует о том, что наполнитель «Графен» стабилизирует эпоксидную смолу в большей степени, чем наполнитель «Таунит-МД», это согласуется с данными о количестве газовыделения. Возможно, благодаря двумерной структуре графена площадь контакта с матрицей в этом случае больше, чем для многостенных углеродных нанотрубок, что улучшает межфазную связь наполнитель – матрица, максимизирует передачу напряжения от матрицы к наполнителю [1] и в целом стабилизирует стойкость эпоксидной смолы к воздействию негативных факторов среды.

На рис. 4 представлены спектры поглощения в средней ИК-области.

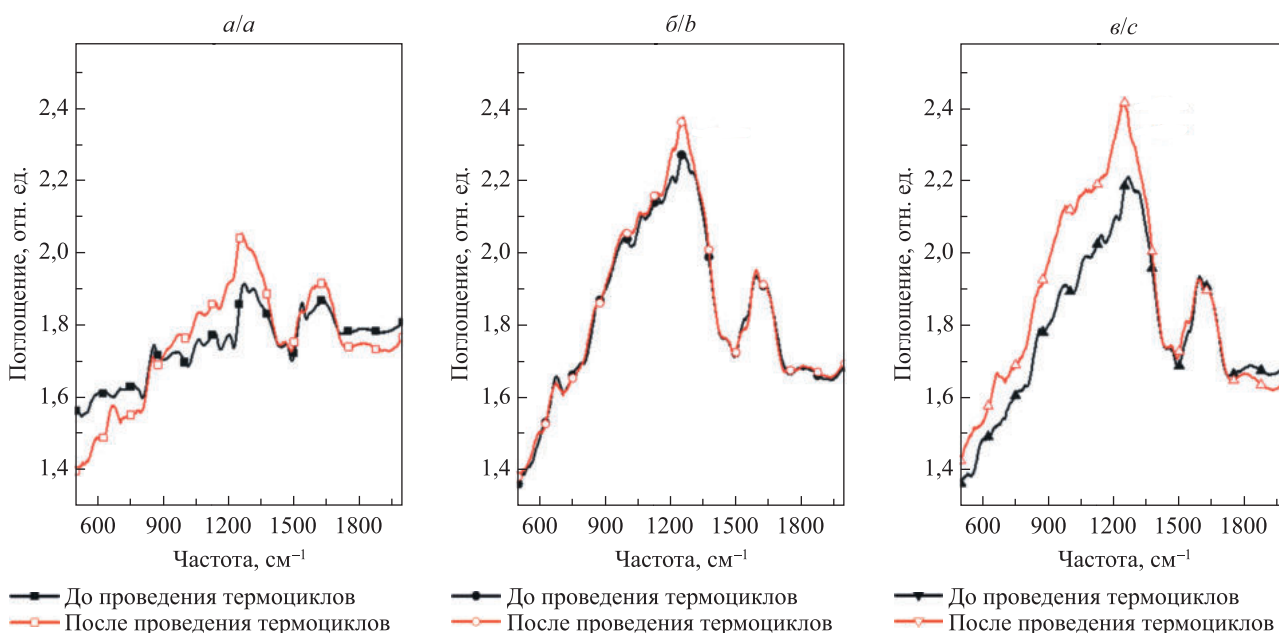


Рис. 4. Спектры поглощения в средней ИК-области образцов на основе эпоксидной смолы без наполнителей (а) и с углеродными наполнителями «Графен» (б) и «Таунит-МД» (в) до и после термической нагрузки

Fig. 4. Fourier transform IR spectra of the samples based on epoxy resin without fillers (a) and with carbon fillers «Graphene» (b) and «Taunit-MD» (c) before and after thermal cycles

В спектрах всех образцов как немодифицированной, так и модифицированной эпоксидной смолы проявилась полоса поглощения при 1590–1635 см⁻¹, обусловленная пульсационными колебаниями ароматического кольца (связи С=C) [22–24]. Как показано в работах [22; 25; 26], посвященных анализу деградации эпоксидной смолы, данная полоса ароматического кольца обладает самой высокой химической стабильностью среди различных связей внутри сетки эпоксидной смолы, что позволяет использовать ее

интенсивность для нормировки спектра. Из рис. 4 видно, что интенсивность этой полосы действительно не изменяется для всех образцов после термоциклирования. Более интенсивная полоса с максимумом при $1250\text{--}1300\text{ см}^{-1}$, вероятнее всего, обусловлена валентными колебаниями эфирных связей C—O—C (эпоксидный мостик) [22; 24; 25; 27; 28]. Также следует отметить широкую полосу поглощения в области меньших частот ($900\text{--}1200\text{ см}^{-1}$), обусловленную колебаниями связей C—C , в частности связей C—C , находящихся между двумя фенильными группами [24]. Вышеупомянутые полосы более интенсивно проявились в спектрах образцов модифицированной смолы, чем в спектрах образцов немодифицированной смолы. Это может быть вызвано увеличением количества связей в композите, густоты сшивок и уплотнением структуры модифицированной композиции в процессе ее отверждения в присутствии углеродных наполнителей [29].

По относительной интенсивности вышеупомянутых полос можно судить о пространственной структуре эпоксидного полимера. Так, в работе [28] отношение интенсивностей полос поглощения эпоксидного мостика и бензольного кольца использовалось для оценки степени отверждения эпоксидной смолы. В работе [22] показано, что уменьшение интенсивности полос в области $1000\text{--}1250\text{ см}^{-1}$ относительно интенсивности полос ароматического кольца связано с деградацией эпоксидного полимера, а именно с разрывом полимерных цепей. Как видно из рис. 4, для образцов немодифицированной смолы и смолы с многостенными углеродными нанотрубками регистрируется увеличение интенсивности полос поглощения в области $900\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ относительно интенсивности полосы поглощения бензольного кольца, тогда как для образца, модифицированного графеновыми нанопластинами, данное отношение интенсивностей изменяется незначительно. Таким образом, можно сказать, что термоциклирование в условиях проведенного эксперимента дополнительно стимулирует процесс полимеризации эпоксидной матрицы (сшивание полимерных цепей) как в образце немодифицированной эпоксидной смолы, так и в образце с наполнителем «Таунит-МД». Повышение степени сшивания влияет на механические свойства материала, в частности, оно может увеличивать жесткость полимера, а также приводить к его охрупчиванию. Для образца с наполнителем «Графен» эффект термоциклирования несуществен, вероятно, вследствие более сильного взаимодействия между матрицей и наполнителем.

Заключение

Композиты на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 с добавлением наполнителей «Графен» и «Таунит-МД», содержащих графеновые нанопластины и многостенные углеродные нанотрубки соответственно, подвергались изменению температуры при нагреве УФ-излучением в вакууме для имитации условий околоземной орбиты. Показано, что добавление углеродных наполнителей (1 мас. %) способствует увеличению коэффициента поглощения солнечного излучения эпоксидной матрицы с 0,88 до 0,94–0,95, а также коэффициента излучения с 0,94 до 0,95–0,96. Для немодифицированного полимера термоциклирование приводит к снижению коэффициента α_s примерно на 2 %, а для образца с многостенными углеродными нанотрубками – на 0,4 %. Для образца с графеновыми нанопластинами коэффициент α_s , напротив, увеличивается на 0,5 %. Коэффициент излучения после термоциклирования возрастает для всех образцов: на 0,6 % для немодифицированной эпоксидной смолы и на 0,2 % для образцов с углеродными наполнителями.

При проведении первого термоцикла (нагрева) наблюдалось падение вакуума для немодифицированной эпоксидной смолы в 7–8 раз, что в определенной степени обусловлено уменьшением концентрации связанной воды. Для образцов с наполнителями «Графен» и «Таунит-МД» вакуум падал в 10 и 20 раз соответственно. С использованием метода оптической спектроскопии показано, что графеновый наполнитель более предпочтителен, чем наполнитель с углеродными нанотрубками, с точки зрения стабилизации эпоксидного полимера. Эффект влияния термоциклирования обуславливается процессами полимеризации за счет наличия непрореагировавших молекулярных групп, а также изменением диспергирования наполнителей в эпоксидной матрице. Учитывая выявленную природу физических процессов, можно сделать вывод о том, что увеличение количества термоциклов не приведет к существенным изменениям рассматриваемых параметров. Однако при расширении температурного диапазона возможна структурная деградация, изучение которой требует проведения дальнейших исследований.

Полученные результаты об изменении оптического поглощения после термоциклирования могут быть полезны при моделировании тепловых процессов в полимерных материалах для космического проектирования. Более глубокое понимание физических причин данных изменений могло бы помочь улучшить конструкцию аэрокосмических систем и обеспечить более точное прогнозирование их производительности.

Библиографические ссылки

1. Yang S-Y, Lin W-N, Huang Y-L, Tien H-W, Wang J-Y, Ma C-CM, et al. Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites. *Carbon*. 2011;49(3):793–803. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.10.014.
2. Jin SB, Son GS, Kim YH, Kim CG. Enhanced durability of silanized multi-walled carbon nanotube / epoxy nanocomposites under simulated low earth orbit space environment. *Composites Science and Technology*. 2013;87:224–231. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.08.017.
3. Earp B, Hubbard J, Tracy A, Sakoda D, Luhrs C. Electrical behavior of CNT epoxy composites under *in situ* simulated space environments. *Composites. Part B, Engineering*. 2021;219:108874. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108874.
4. Wazalwar R, Sahu M, Raichur AM. Mechanical properties of aerospace epoxy composites reinforced with 2D nano-fillers: current status and road to industrialization. *Nanoscale Advances*. 2021;3(10):2741–2776. DOI: 10.1039/D1NA00050K.
5. Zhang W, Yi M, Shen Z, Zhao X, Zhang X, Ma S. Graphene-reinforced epoxy resin with enhanced atomic oxygen erosion resistance. *Journal of Materials Science*. 2013;48(6):2416–2423. DOI: 10.1007/s10853-012-7028-4.
6. Park SY, Choi HS, Choi WJ, Kwon H. Effect of vacuum thermal cyclic exposures on unidirectional carbon fiber / epoxy composites for low earth orbit space applications. *Composites. Part B, Engineering*. 2012;43(2):726–738. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.03.007.
7. Shin K-B, Kim C-G, Hong C-S, Lee H-H. Prediction of failure thermal cycles in graphite/epoxy composite materials under simulated low earth orbit environments. *Composites. Part B, Engineering*. 2000;31(3):223–235. DOI: 10.1016/S1359-8368(99)00073-6.
8. Ghasemi-Kahrizsangi A, Shariatpanahi H, Neshati J, Akbarinezhad E. Degradation of modified carbon black / epoxy nanocomposite coatings under ultraviolet exposure. *Applied Surface Science*. 2015;353:530–539. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.06.029.
9. Yue L, Pircheraghi G, Monemian SA, Manas-Zloczower I. Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets – dispersion and synergy effects. *Carbon*. 2014;78:268–278. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.07.003.
10. Zhang B, Chen Y, Wang J, Blau WJ, Zhuang X, He N. Multi-walled carbon nanotubes covalently functionalized with polyhedral oligomeric silsesquioxanes for optical limiting. *Carbon*. 2010;48(6):1738–1742. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.01.015.
11. Martin CA, Sandler JKW, Shaffer MSP, Schwarz M-K, Bauhofer W, Schulte K, et al. Formation of percolating networks in multi-wall carbon-nanotube – epoxy composites. *Composites Science and Technology*. 2004;64(15):2309–2316. DOI: 10.1016/j.compscitech.2004.01.025.
12. Durmus H, Safak H, Akbas HZ, Ahmetli G. Optical properties of modified epoxy resin with various oxime derivatives in the UV-VIS spectral region. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011;120(3):1490–1495. DOI: 10.1002/app.33287.
13. Jilani W, Fourati N, Zerrouki C, Faugeras P-A, Guinault A, Zerrouki R, et al. Exploring the structural properties and enhancement of opto-electrical investigations for the synthesized epoxy based polymers with local nanoscale structures. *Materials Research Express*. 2020;7:035305. DOI: 10.1088/2053-1591/ab7b2a.
14. Bouzidi A, Omri K, El Mir L, Guermazi H. Preparation, structural and optical investigations of ITO nanopowder and ITO/epoxy nanocomposites. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015;39:536–543. DOI: 10.1016/j.mssp.2015.04.051.
15. Kaya İ, Gül M, Şenol D. Synthesis and characterization of epoxy resins containing imine group and their curing processes with aromatic diamine. *Journal of Macromolecular Science. Part A, Pure and Applied Chemistry*. 2019;56(6):618–627. DOI: 10.1080/10601325.2019.1596747.
16. Noreen F, Bibi A, Khalid N, Khan IU. Azomethine ether-based potential curing agent for epoxy resin (diglycidyl ether of bisphenol A): synthesis and characterization. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2021;53(4):283–295. DOI: 10.1177/0095244320928570.
17. Saravanan K, Sathiyarayanan S, Muralidharan S, Azim SS, Venkatachari G. Performance evaluation of polyaniline pigmented epoxy coating for corrosion protection of steel in concrete environment. *Progress in Organic Coatings*. 2007;59(2):160–167. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2007.03.002.
18. Xie R, Darvishzadeh R, Skidmore A, van der Meer F. Characterizing foliar phenolic compounds and their absorption features in temperate forests using leaf spectroscopy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2024;212:338–356. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.05.014.
19. Ben-Dor E, Inbar Y, Chen Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400–2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment*. 1997;61(1):1–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00120-4.
20. Watanabe A, Furukawa H, Miyamoto S, Minagawa H. Non-destructive chemical analysis of water and chlorine content in cement paste using near-infrared spectroscopy. *Construction and Building Materials*. 2019;196:95–104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.114.
21. Chabert B, Lachenal G, Vinh Tung C. Epoxy resins and epoxy blends studied by near infrared spectroscopy. *Macromolecular Symposia*. 1995;94(1):145–158. DOI: 10.1002/masy.19950940113.
22. Doblies A, Boll B, Fiedler B. Prediction of thermal exposure and mechanical behavior of epoxy resin using artificial neural networks and Fourier transform infrared spectroscopy. *Polymers*. 2019;11(2):363. DOI: 10.3390/polym11020363.
23. Cole KC, Noel D, Hechler JJ. Characterization of epoxy – graphite composites by diffuse reflectance FTIR. In: Cameron DG, Grasselli JG, editors. *1985 International conference on Fourier and computerized infrared spectroscopy; 1985 January 1–2; Ottawa, Canada*. Bellingham: SPIE; 1985. p. 114 (Proceedings of SPIE; volume 0553). DOI: 10.1117/12.970727.
24. Lin SC, Bulkin BJ, Pearce EM. Epoxy resins. III. Application of Fourier transform IR to degradation studies of epoxy systems. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*. 1979;17(10):3121–3148. DOI: 10.1002/pol.1979.170171006.
25. Jana S, Zhong W-H. FTIR study of ageing epoxy resin reinforced by reactive graphitic nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007;106(5):3555–3563. DOI: 10.1002/app.26925.
26. Allen RO, Sanderson P. Characterization of epoxy glues with FTIR. *Applied Spectroscopy Reviews*. 1988;24(3–4):175–187. DOI: 10.1080/05704928808060457.
27. Zhang Z, Wang C, Huang G, Liu H, Yang S, Zhang A. Thermal degradation behaviors and reaction mechanism of carbon fibre – epoxy composite from hydrogen tank by TG-FTIR. *Journal of Hazardous Materials*. 2018;357:73–80. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.05.057.
28. Баженов ЮМ, Король ЕА, Ерофеев ВТ, Митина ЕА. *Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности: основы теории, методы расчета и технологическое проектирование*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов; 2008. 320 с.
29. Чашкин МА, Тринеева ВВ, Вахрушина МА, Захаров АИ, Кодолов ВИ. ИК-спектроскопическое исследование структуры эпоксидной композиции, модифицированной медь-углеродным нанокомпозитом, и процессов, связанных с ее модификацией. *Химическая физика и мезоскопия*. 2012;14(2):223–230. EDN: PJLWLL.

Получена 13.11.2024 / исправлена 02.12.2024 / принята 02.12.2024.
Received 13.11.2024 / revised 02.12.2024 / accepted 02.12.2024.

Авторы:

Ирина Николаевна Пархоменко – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Людмила Александровна Власукова – кандидат физико-математических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Иван Дмитриевич Парфимович – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории элионики.

Александр Степанович Камышан – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории элионики.

Мария Николаевна Жукова – младший научный сотрудник лаборатории элионики.

Authors:

Irina N. Parkhomenko, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of materials and device structures for micro- and nanoelectronics, department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

parkhomenko@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-0982-3938>

Liudmila A. Vlasukova, PhD (physics and mathematics); head of the laboratory of materials and device structures for micro- and nanoelectronics, department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

vlasukova@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-8273-6908>

Ivan D. Parfimovich, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of elionics.

parfimovich@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-5922-6333>

Alexander S. Kamysan, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of elionics.

kamyshana@mail.ru

Maria N. Zhukova, junior researcher at the laboratory of elionics.
maryliss.lab@gmail.com
