

## Изменение оптических свойств эпоксидной смолы, модифицированной графеном, при воздействии кислородной плазмы и УФ облучения

И. Н. Пархоменко<sup>1)</sup>, Л. А. Власукова<sup>1)</sup>, А. С. Камышан<sup>2)</sup>, И. Д. Парфимович<sup>2)</sup>,  
В. Н. Черник<sup>3)</sup>, Л. С. Новиков<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: [parkhomenko@bsu.by](mailto:parkhomenko@bsu.by)

<sup>2)</sup> Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, e-mail: [parfimovich@bsu.by](mailto:parfimovich@bsu.by)

<sup>3)</sup> НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: [vlachernik@yandex.ru](mailto:vlachernik@yandex.ru)

Изучено изменение спектрального коэффициента диффузного отражения немодифицированной эпоксидной смолы и полимера на её основе с добавлением графена при воздействии УФ-части солнечного спектра и потока кислородной плазмы. Воздействие обоих факторов приводило к уменьшению диффузного отражения. Показано, что чистая эпоксидная смола наиболее чувствительна к воздействию УФ, тогда как для модифицированной графеном эпоксидной смолы наиболее существенным фактором деградации является атомарный кислород.

**Ключевые слова:** УФ облучение; кислородная плазма; эпоксидная смола; графен; диффузное отражение.

## Effect of oxygen plasma and UV radiation on optical properties of epoxy resin reinforced with graphene

I. N. Parkhomenko<sup>1)</sup>, L. A. Vlasukova<sup>1)</sup>, A. S. Kamyshan<sup>2)</sup>, I. D. Parfimovich<sup>2)</sup>,  
V. N. Chernik<sup>3)</sup>, L. S. Novikov<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: [parkhomenko@bsu.by](mailto:parkhomenko@bsu.by)

<sup>2)</sup> A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail [parfimovich@bsu.by](mailto:parfimovich@bsu.by)

<sup>3)</sup> Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, e-mail: [vlachernik@yandex.ru](mailto:vlachernik@yandex.ru)

The exposure effect of UV radiation and oxygen plasma on the spectral coefficient of diffuse reflectance of pristine epoxy resin and an epoxy-based polymer reinforced with graphene was studied. Both these factors result in a decrease of diffuse reflectance. It has been shown that pristine epoxy resin is more sensitive to UV exposure, while for graphene-modified epoxy resin the most significant degradation factor is atomic oxygen plasma.

**Keywords:** UV irradiation; oxygen plasma; epoxy resin; graphene; diffuse reflectance.

### Введение

Развитие космической техники выдвигает перед разработчиками всё новые задачи по обеспечению надежности агрегатов и систем при длительных сроках функционирования космических аппаратов (КА). Поэтому интенсивно ведутся исследования воздействия факторов космического пространства как на микроэлектронные приборы и схемы, так и на функциональные материалы для космических аппаратов

[1–4]. Сегодня большинство спутников запускаются на низких околоземных орбитах (от 200 до 800 км). На таких высотах критичными для наружной поверхности КА являются высокоскоростные потоки кислородной плазмы (атомарного кислорода ионосферы с энергией 5–20 эВ в разных зарядовых состояниях). Существенное воздействие на аэрокосмические материалы оказывает также излучение УФ-части солнечного спектра. В работе [5] показано, что углеродные наночастицы являются УФ-стабилизаторами, способными поглощать УФ-излучение и защищать покрытия на эпоксидной основе. Цель данной работы – оценить степень воздействия негативных факторов околоземной орбиты на полимерные композиции на основе эпоксидной смолы с добавлением графена.

## 1. Экспериментальная часть

Полимерные композитные материалы изготавливались на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя Этал-45М с добавлением графена производства компании ООО “НаноТехЦентр” (г. Тамбов, Россия). Соотношение смола/отвердитель составляло 100/50. Смешивание компонентов происходило при комнатной температуре. Концентрация графена в образце составляла 1 вес. %.

Облучение кислородной плазмой (КП), формируемой в магнитоплазгодинамическом ускорителе, проводилось на имитационной установке НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносова. Параметры потока: средняя энергия ионов 20–40 эВ; состав – нейтральные частицы и ионы атомарного и молекулярного кислорода, плазменные электроны; плотность потока атомарного кислорода по полиимидному эквиваленту  $(5-8) \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , флюенс  $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Температура образца не превышала 100 °С.

Оценка воздействия УФ-части солнечного спектра (185 – 400 нм) проводилась на имитационной установке НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ. Источником света служила ртутная лампа с полезной мощностью ~40 Вт, помещенная в вакуумную камеру ( $5 \times 10^{-6}$  мм.рт.ст.) вместе с образцами. Площадь равномерного облучения составляла  $2 \times 2 \text{ см}^2$ , время экспозиции 6 часов. С учетом коэффициента 40 (во столько раз подводимая мощность излучения превышала мощность воздействия в ближнем космосе) это соответствовало 240 ч пребывания на орбите. Температура образца не превышала 180 °С.

Морфология поверхности и глубина эрозии эпоксидных нанокompозитов под действием кислородной плазмы исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа HitachiS-4800.

Спектры диффузного отражения в диапазоне 190 – 2500 нм регистрировались на установке LAMBDA–1050 UV-VIS на приставке «Интегрирующая сфера». С использованием спектров диффузного отражения  $R(\lambda)$  и международного стандарта ASTM E-490 AM0 энергетического спектра солнечного излучения за пределами атмосферы  $I_S(\lambda)$  был рассчитан коэффициент поглощения солнечного  $\alpha_S$  излучения по формуле:

$$\alpha_S = \frac{\int_{0.2 \text{ МКМ}}^{2.5 \text{ МКМ}} I_S(\lambda)[1 - R(\lambda)]d\lambda}{\int_{0.2 \text{ МКМ}}^{2.5 \text{ МКМ}} I_S(\lambda)d\lambda}. \quad (1)$$

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ-микрофотографии поверхности образцов эпоксидной смолы без добавления графена и с графеном до и после воздействия КП и УФ. Как видно из рисунка, плазменная обработка и УФ облучение приводит к «растравливанию» верхнего слоя как «чистого», так и модифицированного полимера и формированию развитого эрозионного микрорельефа.

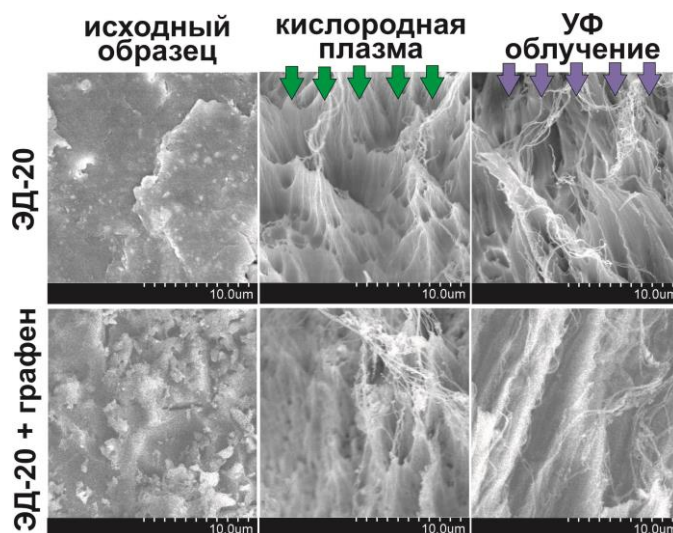


Рис. 1. СЭМ-изображения образцов эпоксидной смолы без наполнителя и модифицированной графеном до и после воздействия кислородной плазмы и УФ облучения

На рис. 2, а представлены спектры диффузного отражения «чистой» эпоксидной смолы до и после воздействия КП и УФ. Как видно из рисунка, воздействие кислородной плазмы приводит к равномерному уменьшению интенсивности диффузного отражения в исследуемом диапазоне длин волн. Интегральное уменьшение отражения составляет около  $\Delta R_{\text{диф}} = 4\%$ . Облучение УФ приводит к более существенному падению интенсивности отражения ( $\Delta R_{\text{диф}} = 11\%$ ) и изменению формы спектра. Таким образом, для немодифицированной эпоксидной смолы наиболее важным фактором, приводящим к деградации поверхностного слоя, является воздействие УФ излучения.

На рис. 2, б представлены спектры диффузного отражения модифицированной графеном эпоксидной смолы до и после воздействия КП и УФ. Добавление 1 вес.% графена в эпоксидную смолу приводит к резкому уменьшению отражения в среднем на  $\Delta R_{\text{диф}} = 17\%$ . В спектре образца с наполнителем не наблюдаются минимумы отражения, характерные для «чистой» эпоксидной смолы. Это говорит о хорошем распределении графена в эпоксидной матрице. Для модифицированной графеном эпоксидной смолы УФ облучение приводило к уменьшению отражения на  $\Delta R_{\text{диф}} = 3\%$ , тогда как воздействие кислородной плазмы – на  $\Delta R_{\text{диф}} = 5\%$ .

Коэффициент солнечного поглощения для «чистой» и модифицированной эпоксидной смолы составляет 0,73 и 0,94 соответственно. Воздействие кислородной плазмы привело к увеличению  $\alpha_s$  для всех образцов на  $\Delta\alpha = 0,04 - 0,05$ . После УФ облучения  $\alpha_s$  немодифицированной эпоксидной смолы увеличилось на  $\Delta\alpha = 0,19$ , тогда как для эпоксидной смолы с наполнителем – на  $\Delta\alpha = 0,03$ .

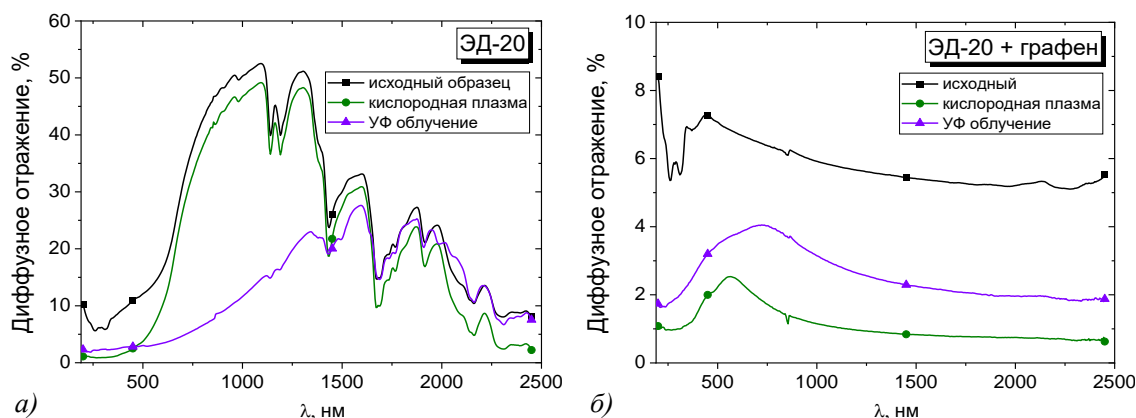


Рис. 2. Спектры диффузного отражения образцов эпоксидной смолы без наполнителя (а) и модифицированной графеном (б) до и после воздействия кислородной плазмы и УФ облучения.

Таким образом, добавление графена в эпоксидную смолу улучшает ее устойчивость к УФ облучению. Это связано с тем, что графен является эффективным поглотителем и преобразует «разрушающее» УФ излучение в тепло. В случае модифицированной эпоксидной смолы наиболее разрушающее действие оказывает кислородная плазма.

### Заключение

Исследована деградация «чистой» и модифицированной графеном эпоксидной смолы при воздействии УФ-излучения и кислородной плазмы. Показано, что наибольшее изменение диффузного отражения «чистой» эпоксидной смолы наблюдается после воздействия УФ-излучения, тогда как добавление графена приводит к увеличению её устойчивости к УФ. Для модифицированной графеном эпоксидной смолы наиболее существенным фактором деградации является кислородная плазма. Высокие значения коэффициента солнечного поглощения демонстрируют перспективность модифицированной графеном эпоксидной смолы для создания антибликовых черных покрытий.

### Библиографические ссылки

1. Дидык П. И., Жуков А. А. Радиационная стойкость м/э приборов при совместном воздействии дестабилизирующих факторов космического пространства на этапе проектирования // Космические исследования. 2023. Т. 61. С. 242–247.
2. Degradation of Epoxy-Particles Composites Exposed to UV and Gamma Radiation / M. Torres [et al.] // Chemistry. 2023. Vol. 5. P. 559–570.
3. Electrical behavior of CNT epoxy composites under in-situ simulated space environments/ B. Earp [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2021. Vol. 219. P. 108874.
4. Enhanced durability of silanized multi-walled carbon nanotube/epoxy nanocomposites under simulated low earth orbit space environment / S. B. Jin [et al.] // Composites Science and Technology. 2013. Vol. 87. P. 224–231.
5. Degradation of modified carbon black/epoxy nanocomposite coatings under ultraviolet exposure / A. Ghasemi-Kahrizsangi [et al.] // Applied Surface Science. 2015. Vol. 353. P. 530–539.