

УДК 538.95

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОТОКОВ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ С УГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

© 2023 г. И. Д. Парфимович^а, *, Ф. Ф. Комаров^а, Л. А. Власукова^б,
И. Н. Пархоменко^б, Л. С. Новиков^с, В. Н. Черник^с, Д. В. Жигулин^д

^аНИУ “Институт прикладных физических проблем
им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета”, Минск, 220045 Беларусь

^бБелорусский государственный университет, Минск, 220045 Беларусь

^сМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

^дОАО “Интеграл”, Минск, 220108 Беларусь

*e-mail: parfimovich@bsu.by

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

После доработки 12.07.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Для оценки стойкости полимерных нанокмпозитов к воздействию атомарного кислорода на низких околоземных орбитах изучено воздействие кислородной плазмы на структурные и оптические свойства эпоксидной смолы с добавлением графена и углеродных нанотрубок серии “Таунит-М”. Показано, что добавление углеродных наполнителей в эпоксидную смолу приводит к увеличению потери массы и глубины эрозии при воздействии кислородной плазмы. Массовый коэффициент эрозии при флуенсе атомарного кислорода $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ составляет $0.82 \times 10^{-23} \text{ г/ат.}$ для чистой эпоксидной смолы и 0.86×10^{-23} и $1.06 \times 10^{-23} \text{ г/ат.}$ для образцов с графеном и “Таунитом-М” соответственно. В образце с наполнителем “Таунит-М” наблюдается бо́льшая потеря массы и глубина эрозии в результате облучения в кислородной плазме в сравнении с образцом с наполнителем “графен”. Обработка углеродных нанокмпозитов в кислородной плазме приводит к значительному снижению коэффициентов отражения в спектральной области 0.2–2.5 мкм. Наиболее низкие коэффициенты диффузного (менее 1%) и зеркального (менее 0.02%) отражения характерны для облученного полимера с наполнителем “Таунит-М”.

Ключевые слова: эпоксидная смола, графен, углеродные нанотрубки, кислородная плазма, потеря массы, диффузное и зеркальное отражение, растровая электронная микроскопия.

DOI: 10.31857/S102809602301020X, EDN: GOLOIX

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия возрос интерес к изучению полимеров, модифицированных различными углеродными наноматериалами. Первой матрицей, модифицированной углеродными нанотрубками (УНТ), стала эпоксидная смола, которая до сих пор широко используется благодаря хорошей адгезии к большинству наполнителей, низкой усадке, отсутствию летучих выделений в процессе отверждения, высокой химической стойкости. В ряде работ показано, что добавление углеродных наночастиц в эпоксидную смолу приводит к повышению ее коррозионной стойкости [1], к снижению коэффициента диффузии воды [2]. При определенной концентрации наполнителя улучшаются механические свойства эпоксидного покрытия (прочность, жесткость) [3],

уменьшаются коэффициент трения и скорость изнашивания [4], увеличивается термостойкость [5]. В [6, 7] показано, что углеродные наночастицы являются хорошими УФ-стабилизаторами, способными поглощать УФ-излучение и защищать покрытия на эпоксидной основе за счет наполнения ими микротрещин. Добавление углеродного наполнителя в эпоксидную смолу приводит к улучшению ее электропроводности, увеличению поглощательной способности от видимой области до диапазона ГГц–ТГц [1, 8–10]. Все это обуславливает широкую область применения модифицированных эпоксидных композитов в качестве покрытий электронных схем в авиационной области [11] и для изделий морского оборудования [12], в нагревательных устройствах [5], в качестве проводящих покрытий для контроля рассеи-

вания статического электричества в пластиковых деталях [13, 14], а также покрытий, защищающих от электромагнитного излучения [15]. Настоящие исследования направлены на создание эффективного покрытия на основе эпоксидной смолы с углеродным наполнителем для космических приложений.

Большинство космических аппаратов перемещаются по низким околоземным орбитам, на которых к факторам космической среды относятся высокий вакуум, микрогравитация, постоянное термоциклирование, воздействие солнечного излучения, микрометеориты, космический мусор и другие факторы [16–19]. Одним из важнейших факторов, вызывающих серьезные повреждения многих полимерных материалов на космических аппаратах, является атомарный кислород – доминирующая нейтральная частица на низкой околоземной орбите, он образуется в результате фотодиссоциации молекулярного кислорода в верхних слоях атмосферы в концентрации 10^6 – 10^9 см⁻³ [19, 20]. Из-за своей высокой химической активности и большой энергии удара (~5 эВ) о поверхность материала, что связано с высокой орбитальной скоростью космических аппаратов (7–8 км/с), атомарный кислород разрушает многие полимерные материалы, непосредственно подвергаясь воздействию космической среды. Соответственно, важно оценить степень эрозии и потерю массы применяемого материала при воздействии атомарного кислорода. Наиболее дешевым методом изучения свойств материалов в таком случае являются наземные имитационные испытания [21, 22]. В настоящей работе воздействию атомарного кислорода подвергался наноккомпозит на основе эпоксидной смолы с коммерчески доступными углеродными наполнителями производства “НаноТехЦентр” (г. Тамбов, Россия): графен и углеродные трубки серии “Таунит-М”. Для оценки стойкости к эрозии под действием атомарного кислорода исследовали изменение морфологии поверхности, потерю массы и оптические свойства образцов после обработки в потоке кислородной плазмы, имитирующем набегающий поток атомарного кислорода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования были композитные материалы на основе эпоксидной полимерной матрицы ЭД-20 с добавлением графена и многослойных УНТ серии “Таунит-М” производства компании ООО “НаноТехЦентр” (г. Тамбов, Россия). Концентрация наполнителя составляла 1 мас. %. Диаметр и протяженность используемых УНТ с небольшими колебаниями значений составляют, соответственно, 10–20 нм и 2 мкм и более.

Процесс изготовления композитных материалов состоял из двух этапов – предварительной обработки углеродных наноматериалов и их ввода в полимерную матрицу. На первом этапе наноматериалы обрабатывали в растворе неионогенных поверхностно-активных веществ в ацетоне концентрации 100 мМ при ультразвуковом воздействии на частоте 24 кГц в течение 15–30 мин с плавным повышением мощности до 80 Вт.

После завершения первого этапа процесса диспергирования углеродных наноматериалов в растворах поверхностно-активных веществ смесь ставили в сушильный шкаф при температуре 40°C на 24 ч для выпаривания ацетона до придания смеси пастообразного состояния. На втором этапе пастообразную смесь добавляли к смоле эпоксидного полимера и в течение 1–2 мин проводили обработку ультразвуком на частоте 24 кГц при мощности импульсов 80 Вт с постепенным и плавным изменением амплитуды от 20 до 80%. Последующая процедура перемешивания компонентов композита происходила в течение 3–5 мин в устройстве механического перемешивания при скорости вращения пропеллера до 100–200 об./мин. После завершения диспергирования и перемешивания жидкий композит переливали в требуемую форму для последующей процедуры полимеризации.

Плазменные потоки кислорода с низкой энергией формировали с помощью магнитоплазменного ускорителя с внешним магнитным полем, модифицированным для функционирования в окислительной плазмообразующей среде [23, 24]. Конструкция ускорителя позволяет снизить содержание в пучке примесей продуктов эрозии электродов [23, 25]. Параметры потока на расстоянии 0.2 м от среза анода ускорителя в плоскости размещения образца материала: средняя энергия ионов 20–40 эВ; состав потока: нейтралы О и О₂, ионы О и О₂, плазменные электроны, эффективная плотность потока атомарного кислорода по полиимидному эквиваленту $(5\text{--}8) \times 10^{16}$ см⁻² · с⁻¹. Для получения одинаковой экспозиции образцы размещали на диске, нормальном к потоку плазмы и вращающемся относительно его оси. Температура образцов при облучении не превышала 100°C. Температуру оценивали в модельном эксперименте при облучении специального образца с помощью термистора, вклеенного между двумя листами полиимидной пленки.

Для определения интенсивности воздействия использовали метод эквивалентного (эффективного) флуенса атомарного кислорода, стандартный в мировой практике имитационных испытаний материалов космических аппаратов [26]. Этим методом реальный флуенс падающих на образец частиц приводится к некоторому флуенсу атомов О с энергией 5 эВ, вызывающему эквива-

лентные потери массы образца. Эквивалентный флуенс атомарного кислорода определяется по потерям массы образца-свидетеля из эталонного материала — полиимида (каптона) — с известным коэффициентом эрозии $4.3 \times 10^{-24} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ при 5 эВ (метод каптонового эквивалента).

Методика ускорения испытаний основана на предположении для некоторых классов полимеров об инвариантности закона увеличения эрозии с энергией в диапазоне от 5 до 20–30 эВ под воздействием атомарного кислорода и изменении зарядового состояния атомов кислорода [27, 28]. Это дает возможность по свойствам хорошо изученного при 5 эВ полиимида и результатам ускоренных сравнительных испытаний при более высокой энергии прогнозировать изменение свойств конструктивных узлов на основе известных материалов и новых материалов при высоких флуенсах, соответствующих многолетнему полету. В настоящем эксперименте эквивалентный флуенс атомарного кислорода в кислородной плазме изменялся в диапазоне $(1.7\text{--}30) \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$.

Массу образцов измеряли вне вакуумной камеры до и после облучения потоком плазмы на аналитических микровесах HR-202 I с ценой деления 10 мкг. По изменениям массы образцов с учетом экспонированной площади вычисляли удельные потери массы. Морфологию поверхности и глубину эрозии эпоксидных нанокомпозитов под действием кислородной плазмы исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием микроскопа Hitachi S-4800. Глубину эрозии поверхности оценивали на поперечных сечениях образцов. Спектры отражения регистрировали на установке LAMBDA-1050 UV–VIS на приставке зеркального отражения в диапазоне 190–2500 нм. Спектры диффузного отражения регистрировали в том же спектральном диапазоне с помощью приставки “Интегрирующая сфера”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлен внешний вид полимерных образцов до и после облучения в кислородной плазме. Облученная поверхность как эпоксидной смолы без углеродного наполнителя, так и образцов с наполнителями становится более темной и матовой. Поверхность образца с наполнителем “Таунит-М” характеризуется равномерным “ворсообразным” рельефом.

На рис. 2 представлены РЭМ-изображения поверхности эпоксидной смолы без наполнителя до и после воздействия кислородной плазмы с эквивалентным флуенсом атомарного кислорода $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$. Как на исходной поверхности, так и на поверхности после плазменной обработки наблюдаются крупные поры округлой формы.

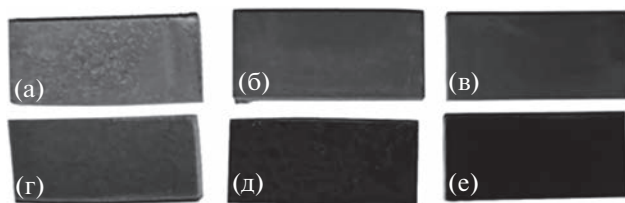


Рис. 1. Внешний вид образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями до (а, б, в) и после (г, д, е) облучения в кислородной плазме ($F = 30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$): а, г — чистая эпоксидная смола; б, д — графен; в, е — “Таунит-М”.

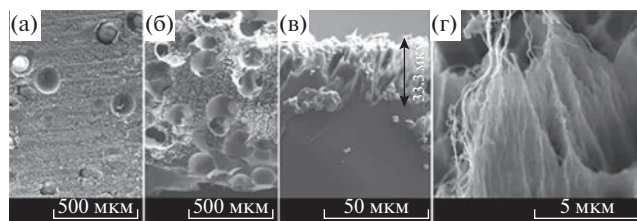


Рис. 2. РЭМ-изображения образца эпоксидной смолы без наполнителя: а — исходная поверхность; б — поверхность после обработки в кислородной плазме; в — поперечное сечение образца; г — увеличенное изображение фрагмента поверхности после обработки в кислородной плазме.

Плазменная обработка приводит к растравливанию верхнего слоя полимера и формированию развитого эрозионного микрорельефа, ориентированного навстречу потоку кислородной плазмы. Глубина эрозии составляет около 30 мкм (рис. 2в).

На рис. 3 показана морфология образцов с углеродными наполнителями. Как видно, исходная поверхность полимеров с добавлением углеродных наполнителей более однородная — крупные поры, как в полимере без наполнителя, не наблюдаются. Обработка в кислородной плазме, как и в случае образца “чистой” эпоксидной смолы, приводит к эрозии поверхности с формированием развитого пространственно-ориентированного микрорельефа.

Следует отметить, что добавление углеродных наполнителей увеличивает глубину эрозии поверхности: максимальная глубина эрозии составляет около 52.2 и 58.3 мкм в образцах, модифицированных графеном и “Таунитом-М” соответственно. По данным [21] разрушение УНТ под воздействием кислородной плазмы начинается при эквивалентном флуенсе атомарного кислорода от $\sim 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$. В рассматриваемом случае флуенс почти на два порядка величины выше ($30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$), поэтому эффект деструкции УНТ ярко выражен. На РЭМ-изображениях компози-

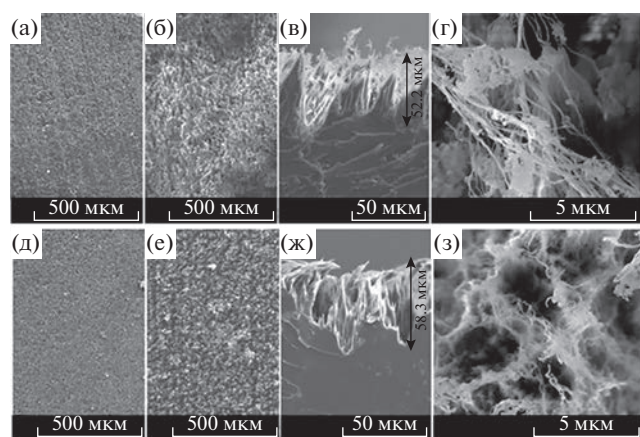


Рис. 3. РЭМ-изображения образца эпоксидной смолы с наполнителем графен (а, б, в, г) и “Таунит-М” (д, е, ж, з): а, д — исходная поверхность; б, е — поверхность после обработки в кислородной плазме; в, ж — поперечное сечение образца; г, з — увеличенное изображение фрагмента поверхности после обработки в кислородной плазме.

тов с нанотрубками видна “бахрома” из частично разрушенных трубок (рис. 3з). Появление “бахромы” связывают с явлением “расстегивания” (unzipping) УНТ, происходящего при взаимодействии налетающих атомов кислорода с О-содержащими группами (в первую очередь эфирными), возникающими на поверхности УНТ за счет адсорбции атомов кислорода [21, 29].

На рис. 4 представлены зависимости изменения удельной потери массы образцов от флуенса атомарного кислорода для исходного образца эпоксидной смолы и композитов на ее основе с углеродными наполнителями. Как видно, добавление углеродных наполнителей приводит к увеличению потери массы эпоксидного композита по сравнению с исходной эпоксидной смолой: в среднем на 25 и 65% для графена и “Таунита-М” соответственно. Удельные потери массы композитов в зависимости от эквивалентного флуенса изменяются монотонно для всех образцов. Массовый коэффициент эрозии R_m при флуенсе $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ составляет $0.82 \times 10^{-23} \text{ г/ат.}$ для чистой эпоксидной смолы и 0.86×10^{-23} и $1.06 \times 10^{-23} \text{ г/ат.}$ для образцов с наполнителями “графен” и “Таунит-М” соответственно.

Более низкие показатели глубины эрозии и потери массы для образцов с графеном по сравнению с образцами, модифицированными наполнителем “Таунит-М”, предположительно, связаны с их большой удельной площадью поверхности, повышенной адгезией наполнителя к матрице, а также с двумерной (плоской) поверхностью графеновых пластин [30].

На рис. 5 представлены спектры диффузного и зеркального отражения эпоксидной смолы с уг-

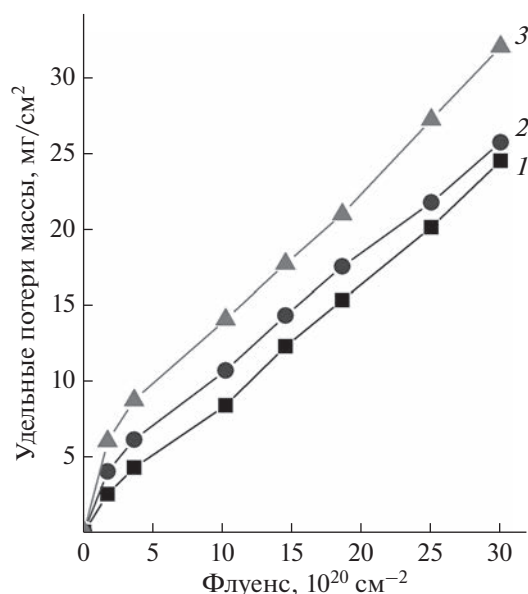


Рис. 4. Зависимость потери массы образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями от эффективного флуенса атомарного кислорода: 1 — чистая эпоксидная смола; 2 — графен; 3 — “Таунит-М”.

леродными наполнителями до и после облучения в кислородной плазме с эквивалентным флуенсом $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$. В исходных необлученных образцах диффузное отражение превышает зеркальное в среднем на 25% в случае чистой эпоксидной смолы и на ~5% в случае образцов с наполнителями, что обусловлено их меньшей пористостью. Анализ полученных данных показывает, что введение углеродных наполнителей в композит на основе эпоксидной смолы приводит к снижению коэффициента диффузного отражения в 4.3–4.8 раза, а зеркального отражения — в 2.1–2.5 раза.

Облучение в кислородной плазме с эквивалентным флуенсом $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ приводит к уменьшению диффузного и зеркального отражения чистой эпоксидной смолы в 1.2 раза и в 1.4 раза соответственно. В образцах с наполнителями снижение отражения в результате воздействия кислородной плазмы более существенно. Диффузное отражение уменьшается в 5.3 и 16.7 раз в образцах с наполнителями “графен” и с “Таунит-М” соответственно, зеркальное — в 9.9 и 15.8 раз. Другими словами, при введении в эпоксидную смолу углеродных наполнителей с последующим облучением в кислородной плазме с флуенсом $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ происходит уменьшение коэффициентов отражения более чем на порядок. Наибольший эффект наблюдается для образца с наполнителем “Таунит-М”: коэффициент зеркального отражения уменьшается в 40 раз, а коэффициент диффузного отражения — в 77 раз по сравнению с

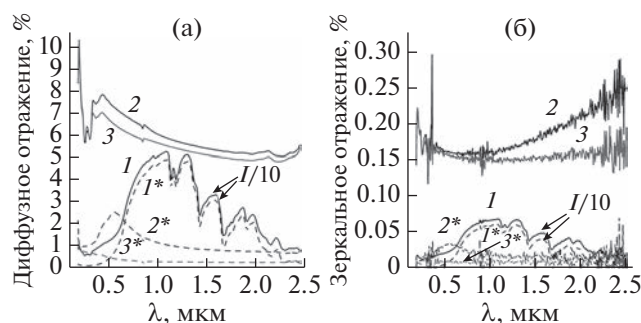


Рис. 5. Спектры диффузного (а) и зеркального (б) отражения образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями до (1, 2, 3) и после (1*, 2*, 3*) облучения в кислородной плазме ($30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$): 1, 1* – чистая эпоксидная смола; 2, 2* – графен; 3, 3* – “Таунит-М”. Интенсивность отражения для чистой эпоксидной смолы уменьшена в 10 раз.

необлученной эпоксидной смолой без наполнителя. Таким образом, путем добавления в эпоксидную смолу графена и УНТ серии “Таунит-М” с массовой долей 1% и последующей обработки в кислородной плазме удалось получить полимерные нанокомпозиты с коэффициентами абсолютного (диффузного) отражения менее 2 и 1%, соответственно, в видимой и ближней ИК-области. Соответствующие значения коэффициентов зеркального отражения не превышают 0.04 и 0.02%.

Результаты РЭМ согласуются с данными измерений потери массы и спектрами отражения образцов после обработки в кислородной плазме. Максимальная потеря массы наблюдалась в образце эпоксидной смолы с 1 мас. % УНТ серии “Таунит-М”, который также характеризуется максимальной глубиной эрозии поверхности. Для этого же образца отмечены минимальные коэффициенты зеркального и диффузного отражения после обработки в кислородной плазме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что добавление углеродных наполнителей приводит к уменьшению стойкости эпоксидной смолы к воздействию потока атомарного кислорода. В образце с наполнителем “Таунит-М” потеря массы и глубина эрозии в результате облучения в кислородной плазме больше по сравнению с образцом с наполнителем “графен”. Обработка в кислородной плазме также приводит к заметному снижению отражательной способности композитов с углеродными наполнителями. Диффузное отражение облученных композитов с наполнителями “графен” и “Таунит-М” в области 0.2–2.5 мкм не превышает 2 и 1% соответственно. Коэффициенты зеркального отражения меньше 0.04 и 0.02%. Последние показатели гово-

рят о перспективности применения данных нанокомпозитов в качестве антибликовых поглощающих покрытий в оптических и оптоэлектронных системах как космических аппаратов, так и наземных применений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственных программ научных исследований “Конвергенция-2025” (проект № 3.07.1.2) и “Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства” (проект № 1.4.3).

Конфликт интересов: авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amorim A.A.P.O., Oliveira M.G., Mancini M.C., Sirqueira A.S. // SN. Appl. Sci. 2021. V. 3. P. 236. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04247-7>
2. Ghasemi-Kahrizsangi A., Shariatpanahi H., Neshati J., Akbarinezhad E. // Appl. Surf. Sci. 2015. V. 331. P. 115. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.038>
3. Gajny F., Wichmann M., Fiedler B., Schulte K. // Compos. Sci. Technol. 2005. V. 65. P. 2300. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.021>
4. Pan G., Guo Q., Ding J., Zhang W., Wang X. // Tribol. Int. 2010. V. 43. P. 1318. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.068>
5. El-Tantawy F., Kamada K., Ohnabe H. // Mater. Lett. 2002. V. 56. P. 112. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00401-9](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00401-9)
6. Ghasemi-Kahrizsangi A., Neshati J., Shariatpanahi H., Akbarinezhad E. // Prog. Org. Coat. 2015. V. 85. P. 199. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.04.011>
7. Ghasemi-Kahrizsangi A., Shariatpanahi H., Neshati J., Akbarinezhad E. // Appl. Surf. Sci. 2015. V. 353. P. 530. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.029>
8. Rohini R., Verma K., Bose S. // ACS Omega. 2018. V. 3. P. 3974. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00218>
9. Chakradhary V.K., Juneja S., Jaleel Akhtar M. // Mater. Today Commun. 2020. V. 25. P. 101386. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101386>
10. Mohan L., Kumar T.N., Karakkad S., Krishnan S.T. // IEEE Trans. Nanotechnol. 2021. V. 20. P. 627. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2021.3103955>
11. Bellucci S., Coderoni L., Micciulla F., Rinaldi G., Sacco I. // J. Nanosci. Nanotechnol. 2011. V. 11. P. 9110. <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.4281>
12. Pidubnyi V.K., Zin' I.M., Lavryshyn B.M., Bilyi L.M., Kolodii Y.I., Ratushna M.B. // Mater. Sci. 2005. V. 41. P. 265. <https://doi.org/10.1007/s11003-005-0160-4>
13. Soltani S., Razinobakht S.A., Asmatulu R. // J. Appl. Polym. Sci. 2020. V. 137. P. 49106. <https://doi.org/10.1002/app.49106>
14. Krieg A.S., King J.A., Jaszczak D.C., Miskoglu I., Mills O.P., Odegard G.M. // J. Compos. Mater. 2018. V. 52.

- Р. 3909.
<https://doi.org/10.1177/0021998318771460>
15. *Baskey H.B., Jaleel Akhtar M.* // 2013 IEEE Appl. Electromagn. Conf. 2013. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/AEMC.2013.7045065>
 16. *Панасюк М.И., Новиков Л.С.* Модель космоса: научно-информационное издание. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
 17. *Banks B.A., de Groh K.K., Miller S.K.* // MRS Proc. 2004. V. 851. P. 426.
<https://doi.org/10.1557/PROC-851-NN8.1>
 18. *Акишин А.И., Новиков Л.С., Черник В.Н.* // Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия. Ред. Новиков Л.С., Панасюк М.И. М.: Энцитех, 2000. С. 100.
 19. *Jiang H., Li T., Chai L., Liu X., Zhai R., Zhao X.* // Protection Mater. Struct. Space Environ. 2017. P. 303.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-19309-0_31
 20. *Voronina E.N., Novikov L.S.* // Protection Mater. Struct. Space Environ. 2017. V. 47. P. 283.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-19309-0_29
 21. *Новиков Л.С., Воронина Е.Н., Черник В.Н., Чеченин Н.Г., Макунин А.В., Воробьева Е.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. Т. 6. С. 49.
<https://doi.org/10.7868/S0207352816060147>
 22. *Серенко О.А., Андропова У.С., Сапожников Д.А., Бузин М.И., Тебенева Н.А., Черник В.Н., Новиков Л.С., Воронина Е.Н., Кононенко А.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. Т. 3. С. 71.
<https://doi.org/10.31857/S1028096020030164>
 23. А.с. 1797448 (СССР). Газоразрядный источник плазмы дугоплазматронного типа / МГУ. Черник В.Н. // Бюл. 1995. № 19. 3 с.
 24. *Chernik V.N.* // Proc. 7th Int. Symp. Mater. Sp. Environ. 1997. P. 237.
 25. *Новиков Л.С., Черник В.Н.* Применение плазменных ускорителей в космическом материаловедении. М.: Университетская книга, 2008. 89 с.
 26. Standard Practices for Ground Laboratory Atomic Oxygen Interaction Evaluation of Materials for Space Applications (2020) World Trade Organization Technical Barriers to Trade. <https://www.astm.org/e2089-15r20.html> Cited 19 May 2022.
 27. *Chernik V., Novikov L., Akishin A.* // Proc. 10th ISMSE, 8th ICPMSE, Collioure, France: Noordwijk, The Netherlands: ESA. 2006. P. 4.
 28. *Черник В.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. Т. 3. С. 44.
<https://doi.org/10.7868/S0207352814030093>
 29. *Kosynkin D.V., Higginbotham A.L., Sinitskii A., Lomeda J.R., Dimiev A., Price B.K., Tour J.M.* // Nature. 2009. V. 458. P. 872.
<https://doi.org/10.1038/nature07872>
 30. *Rafiee M.A., Rafiee J., Wang Z., Song H., Yu Z.-Z., Koratkar N.* // ACS Nano. 2009. V. 3. P. 3884.
<https://doi.org/10.1021/nn9010472>

Effect of Oxygen Plasma on Polymer Nanocomposites with Carbon Fillers

I. D. Parfimovich¹*, F. F. Komarov¹, L. A. Vlasukova², I. N. Parkhomenko², L. S. Novikov³, V. N. Chernik³, D. V. Zhigulin⁴

¹*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University, Minsk, 220045 Belarus*

²*Belarusian State University, Minsk, 220045 Belarus*

³*Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

⁴*Joint Stock Company "Integral", Minsk, 220108 Belarus*

*e-mail: parfimovich@bsu.by

The effect of oxygen plasma on the structural and optical properties of an epoxy resin with graphene and carbon nanotubes of the Taunit-M series was studied to estimate the resistance of polymer nanocomposites to atomic oxygen attack in low Earth orbits. It was shown that the addition of carbon fillers to epoxy resin resulted in an increase in mass loss and erosion depth when exposed oxygen plasma. The mass erosion coefficient at an atomic oxygen fluence of $30 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ is $0.82 \times 10^{-23} \text{ g/at.}$ for pure epoxy resin and 0.86×10^{-23} and $1.06 \times 10^{-23} \text{ g/at.}$ for samples with graphene and Taunit-M fillers, respectively. A larger weight loss and erosion depth under oxygen plasma was typical for the sample with the Taunit-M filler compared to the sample with the graphene one. Oxygen plasma exposure resulted in a significant decrease in the reflectance coefficients of carbon nanocomposites in the spectral range 0.2–2.5 μm . The lowest diffuse (less than 1%) and specular (less than 0.02%) reflectance coefficients were achieved for the exposed polymer with Taunit-M filler.

Keywords: epoxy resin, graphene, carbon nanotubes, oxygen plasma, mass loss, diffuse and specular reflectance, scanning electron microscopy.