06

Антиотражающие полимерные композиты с углеродными наноматериалами, модифицированные кислородной плазмой

© М.Н. Жукова,[1] Ф.Ф. Комаров,[1] И.Д. Парфимович,[1] И.В. Чижов,[1] В.Н. Черник,[2] Л.С. Новиков,[2] Д.В. Жигулин[3]

[1] Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета,
220045 Минск, Беларусь
[2] Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина, Московский государственный университет,
119234 Москва, Россия
[3] ОАО „Интеграл“,
220108 Минск, Беларусь
e-mail: maryliss.lab@gmail.com

Поступило в Редакцию 13 октября 2025 г.
В окончательной редакции 15 декабря 2025 г.
Принято к публикации 3 февраля 2026 г.

Исследованы свойства эпоксидной смолы, армированной углеродными наноматериалами (графеном и многостенными углеродными нанотрубками „Таунит М“ и „Таунит МД“), с акцентом на их структурные и оптические характеристики, а также на влияние воздействия атомарного кислорода (АК), что важно для применения таких композитов в условиях околоземного космического пространства. Воздействие АК на низких околоземных орбитах со средней энергией $\sim 5\,\mathrm{eV}$ приводит к эрозии поверхности композитов, что выражается в заметной потере массы. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что средний выход эрозии составляет $1.07 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{g/atom}$ для композита с наполнителем из „Таунит М“, $1.21 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{g/atom}$ для „Таунит МД“ и $8.56 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g/atom}$ для наполнителя из графена. Этот эффект обусловлен тем, что углеродные наполнители подвергаются окислению и химическому распылению под действием АК, что характерно для материалов, используемых в условиях космического пространства. После облучения АК с флюенсом $1.7-30 \cdot 10^{20}\,\mathrm{cm}^{-2}$ наблюдается значительное снижение коэффициентов отражения (как зеркального, так и диффузного) в широком спектральном диапазоне ($0.2-25\,\mu\mathrm{m}$). Зеркальное отражение уменьшилось для чистой эпоксидной смолы в 1.4 раза и в 9.9, 15.8 и 13.6 раза для образцов с наполнителями графен, „Таунит М“, „Таунит МД“ соответственно. Диффузное отражение от чистой эпоксидной смолы уменьшилось в 1.2 раза и в 5.3, 16.7 и 9.0 раз для образцов с наполнителями графен, „Таунит М“, „Таунит МД“ соответственно. Это указывает на то, что модификация эпоксидной смолы углеродными наноматериалами и последующее облучение приводят к формированию поверхностного слоя с высокими антиотражающими свойствами.

Ключевые слова: эпоксидная смола, углеродные нанотрубки, графен, кислородная плазма, антиотражающие покрытия.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.62999.204-25

Введение

В условиях активного развития космических полетов и исследований актуальным вопросом является подготовка летательных аппаратов — их корпуса и всей внутренней электроники к агрессивной среде околоземного космического пространства. Высота полета спутника на околоземной орбите определяется его техническими задачами. Так, на низких околоземных орбитах ($200-600\,\mathrm{km}$ над поверхностью Земли) функционируют аппараты дистанционного зондирования земли (Landsat), научные спутники, а также размещается МКС. Во время работы большинство материалов космических аппаратов подвергаются воздействию высокого вакуума, микрогравитации, солнечной радиации постоянного термоциклования, микрометеоритов, космического мусора, радиации и т.д. [1–3]. На такой высоте все еще присутствуют следы атмосферы, в частности атомарный кислород (АК). АК образуется в верхних слоях атмосферы при фотодиссоциации молекулярного кислорода с концентрацией $10^6-10^9\,\mathrm{cm}^{-3}$ [3]. Благодаря своей высокой химической активности и достаточно высокой кинетической энергии ($\sim 5\,\mathrm{eV}$) АК разрушает многие полимерные и композитные материалы, подвергающиеся воздействию космической среды. Учитывая тот факт, что скорость движения спутников на этих орбитах порядка $28\,000\,\mathrm{km/h}$, именно набегающий поток АК создает наибольшие повреждения многих функциональных материалов, что обусловливает изменения таких характеристик, как коэффициенты отражения солнечного излучения, коэффициенты черноты, коэффициенты отражения микроволнового излучения и электропроводность [2]. Поэтому актуальным является решение задачи корректной и бесперебойной работы всех систем

космического аппарата, защищенных от повреждающих внешних и внутренних факторов среды. При этом важным пунктом остается и время эксплуатации аппаратов без ремонта и замены каких-либо его элементов, так как в условиях космоса это часто не представляется возможным. Средний срок службы спутников на низкой околоземной орбите равняется примерно десяти годам. Больший срок эксплуатации не востребован в связи с большим процентом выходящих из строя узлов аппаратов и систем или значительным снижением их эффективности из-за быстрого износа и банальным устареванием космических технологий.

Ускоренные испытания, проведенные с учетом критериев, приближенных к условиям околоземного пространства, позволяют значительно сократить финансовые затраты и время при разработке экспериментальных образцов защитных покрытий [4–7]. При этом результативность исследований значительно повышается, позволяя учитывать все условия этой среды и получать образцы с необходимыми заданными характеристиками. Изменения характеристик материалов в потоках кислородной плазмы (КП) оценивают на земле в имитационных лабораторных условиях [1]. Источники КП способны создавать эффективный флюенс частиц до $3 \cdot 10^{21}\,\mathrm{cm}^{-2}$, что соответствует десяти годам работы космического аппарата на низкой околоземной орбите. Результаты предыдущих исследований демонстрируют, что самой высокой стойкостью к воздействию КП обладают углеродосодержащие полимерные материалы, такие как углепластик [8].

Первой полимерной матрицей, модифицированной углеродными нанотрубками (УНТ), стала эпоксидная смола, которая до сих пор широко используется благодаря хорошей адгезии к большинству наполнителей, низкой усадке, слабой склонности к выделению летучих органических соединений при затвердевании и высокой химической стойкости. Было показано, что добавление углеродных наночастиц в эпоксидную смолу приводит к повышению коррозионной стойкости [9], снижению коэффициента диффузии воды [10]. Кроме того, добавление углеродных наполнителей в определенной концентрации позволяет улучшить механические свойства покрытий на основе эпоксидной смолы (прочность, жесткость) [11,12], а также снизить коэффициент трения и скорость износа [13] и повысить теплостойкость [14]. Согласно работам [15,16], углеродные наночастицы являются хорошими УФ-стабилизаторами, способными поглощать УФ-излучение и защищать покрытия на основе эпоксидных смол, заполняя ими микротрещины. Добавление углеродных наполнителей в эпоксидную смолу приводит к улучшению электропроводности, увеличению поглощения в широком спектральном диапазоне от УФ до GHz–THz [9,17–20]. Это определяет широкое применение модифицированных эпоксидных композитов в качестве покрытий для электронных схем [21,22], нагревательных приборов [14], в качестве проводящих покрытий для контроля рассеивания статического электричества в пластиковых конструкциях [23,24], а также в качестве покрытий, защищающих от электромагнитного излучения [25,26].

Исследования настоящей работы направлены на создание эффективного эпоксидного покрытия, наполненного углеродными наноматериалами двух типов, для применения в системах, эксплуатируемых в условиях околоземного космического пространства (ОКП). Поэтому важно оценить устойчивости таких нанокомпозитов к воздействию АК (степень эрозии, потерю массы), морфологию поверхности, оптические свойства и степень температурного воздействия солнечного излучения в ОКП. В настоящей работе мы приводим результаты исследования нанокомпозитов на основе эпоксидной смолы с коммерчески доступными наполнителями из многостенных УНТ (МУНТ) и графена. Кроме того, использовалось два типа УНТ, различающиеся аспектным числом (отношение длины к диаметру трубок). Вышеперечисленные свойства были рассмотрены для двух типов МУНТ.

Полученные типы композитного материала на основе эпоксидного полимера с добавлением двух типов УНТ и графена, модифицированные воздействием КП, могут быть использованы в качестве эффективных антибликовых покрытий для оптических и оптоэлектронных систем, для защиты систем космической электроники от перегрева солнечной радиацией, а также для решения различных задач оптической и оптоэлектронной аппаратуры наземного применения.

1. Основная часть

1.1. Методика эксперимента

В качестве объектов исследования выступали образцы композитных материалов на основе эпоксидной полимерной матрицы ЭД-20 (эпоксидная смола). Этот синтетический полимер продукт поликонденсации бисфенола-А и эпихлоргидрина, отверждаемый аминным отвердителем Этал-45 М, который представляет собой смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированных себациновой кислотой. Соотношение смолы и отвердителя составляло 2:1 по массе. Смешивание компонентов проводили при комнатной температуре благодаря низкой вязкости отвердителя, что облегчает смешивание с эпоксидной смолой.

Опытные образцы были изготовлены с использованием наполнителей: графена и МУНТ серии „Таунит М“ и „Таунит МД“ производства компании ООО „НаноТехЦентр“(г. Тамбов, Россия). Концентрация углеродного компонента составляла 1 wt.%. Отличие наполнителя МУНТ в материале с коммерческим названием „Таунит МД“ заключается только в бóльших длинах трубок ($\geq 20\,\mu$m), чем у наполнителя „Таунит М“ ($\geq 2\,\mu$m). При этом они обладают практически идентичными

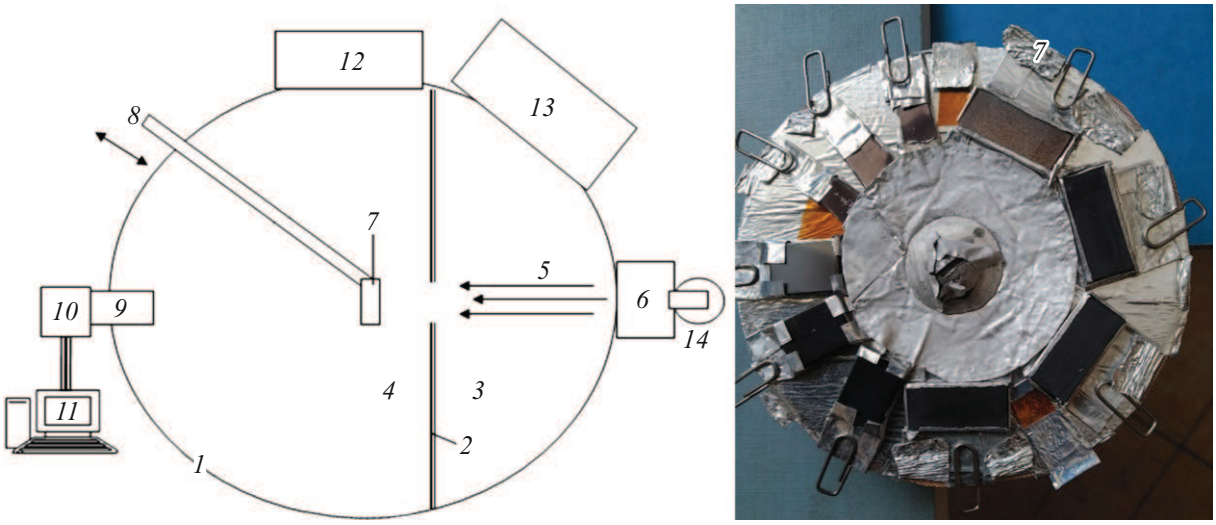


Рис. 1. Схема плазменно-пучкового стенда НИИЯФ МГУ: *1* — камера, *2* — разделительная стенка, *3* — ускорительная секция, *4* — секция образцов, *5* — поток плазмы АК, *6* — плазменный ускоритель, *7* — держатель образцов, *8* — манипулятор образцов, *9* — масс-спектрометр, *10* — цифровой электронный блок измерения, *11* — ПК, *12–14* — крионасосы.

внешними диаметрами с небольшими колебаниями значений в пределах 10–20 nm.

Процесс формирования композиционного материала состоял из двух этапов: предварительной обработки углеродных наноструктурных наполнителей и их введение/диспергирование в полимерной матрице. Для первого этапа углеродный наполнитель обрабатывался в 100 mM растворе неионогенных ПАВ в ацетоне при ультразвуковом воздействии в течение 15–30 min на частоте 24 kHz с постепенным увеличением мощности до 80 W. Для создания идентичных условий изготовления ацетон добавлялся и в исходный образец без включения углеродного наполнителя. После первого этапа процесса диспергирования углеродных наноматериалов в растворе ПАВов смесь помещали в сушильный шкаф при температуре 40 °C на одни сутки (24 h) для выпаривания ацетона и придания смеси пастообразной консистенции. На втором этапе полученная паста добавлялась в эпоксидную полимерную матрицу и распределялась в ней методом ультразвуковой обработки на частоте 24 kHz и мощности импульса 80 W в течение 1–2 min с постепенным изменением амплитуды от 20 % до 80 %. Последующая процедура перемешивания полного состава компонентов композита происходила в течение 3–5 min с помощью устройства механического перемешивания при скорости вращения 100–200 rpm. По окончании двух этапов диспергирования и перемешивания жидкий композит заливается в формы для последующего процесса полимеризации, который занимает более одного дня. После застывания заготовки резались на образцы удобного для обработки размера — 20×10^{-2} mm.

Облучение атомарным кислородом проводилось в Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ. Формирование низкоэнергетических потоков КП осуществлялось с помощью магнитоплазмодинамического ускорителя, модифицированного для работы в окислительной плазме с внешним магнитным полем (рис. 1) [4].

Перед облучением образцы проходили процесс дегазации путем выдерживания их при 20 °C в вакууме 10^{-4} Pa в течение 24 h. Далее образцы облучались пучком КП, формируемой в плазменном ускорителе установки, имитирующей условия на низкой околоземной орбите. Конструкция ускорителя позволила снизить содержание продуктов эрозии электродов в пучке. Для получения одинаковой экспозиции образцы крепились по окружности на вращающемся диске, ориентированном по нормали к потоку плазмы, как показано на рис. 1.

Компонентами пучка являются атомы, молекулы и ионы кислорода с преобладанием атомарных ионов. Энергия ионов в потоке варьируется в диапазоне 20–40 eV, а эффективный флюенс для образцов составляет $(1.7 - 30) \cdot 10^{20}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Для его определения использовался стандартный метод эквивалентного флюенса [5] — по потерям массы образца-свидетеля из эталонного материала — полиамида (Kapton H, DuPont) с известным коэффициентом эрозии $4.3 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g \cdot cm}^{-2}$ при 5 eV — АК (Kapton equivalent method) [5,6]. Методика испытаний предполагает, что закон увеличения эрозии инвариантен при изменении энергии АК в диапазоне энергий от 5 до 20–30 eV и при изменении зарядового состояния АК для некоторых классов полимеров [1]. Это позволяет прогнозировать изменение свойств конструктивного элемента известных и новых материалов при высоких флюенсах кислорода по свойствам полиимида, хорошо изученного для 5 eV — АК, и по результатам ускоренных сравнительных испытаний при более высоких энергиях.

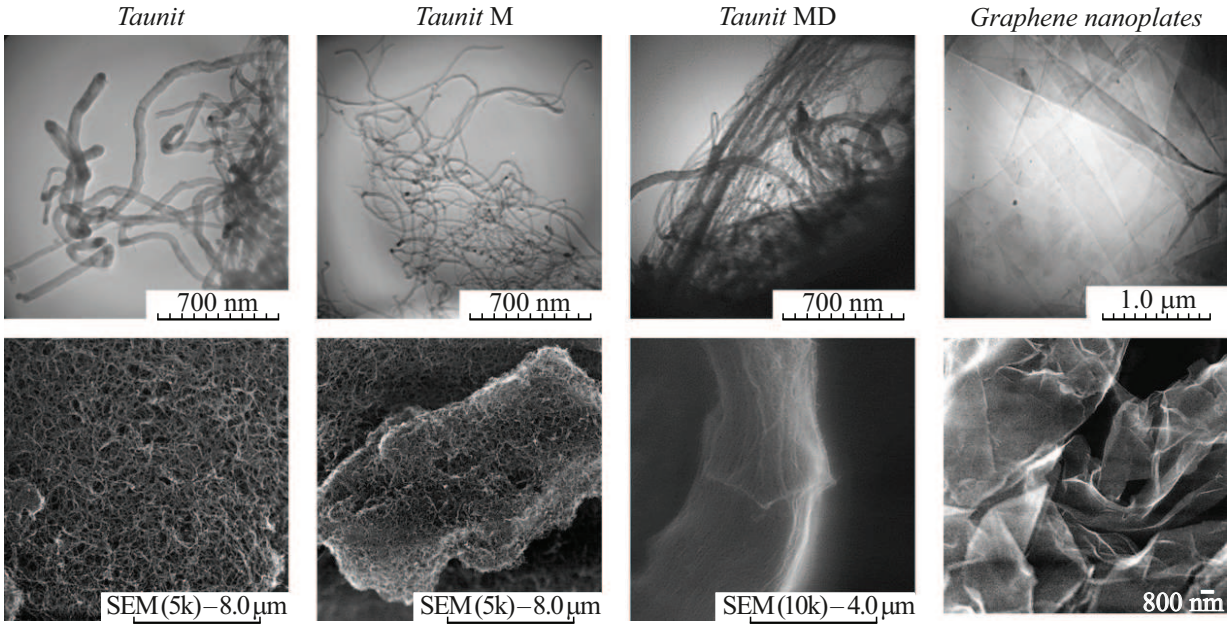


Рис. 2. Образцы углеродных наноструктур.

Структура УНТ исследовалась методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Hitachi H-800, работающем с энергией пучка 200 keV. Массу образцов измеряли вне вакуумной камеры до и после воздействия АК с помощью аналитических микровесов HR-202i со значением деления 10 μg. Удельная потеря массы рассчитывалась на основе измерений изменения массы образца на площади воздействия. Морфологию поверхности и глубину эрозии эпоксидного нанокомпозита под воздействием КП изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi S-4800. Глубина эрозии поверхности оценивалась по поперечным срезам образцов. Спектры отражения регистрировали на спектрофотометре LAMBDA-1050 (200–2500 nm) и фурье-спектрометре Spectrum 3 Optica (3–25 μm), оснащенном универсальной насадкой для отражения. Спектры диффузного отражения регистрировались в спектральном диапазоне 0.2–2.5 μm на спектрофотометре LAMBDA-1050 с помощью аналитического модуля интегрирующая сфера (150 mm).

Поглощение падающего излучения, αs, определялось как доля между прошедшей и отраженной составляющей излучения и определялось по рассчитанным или экспериментально полученным данным спектрального отражения $R(\lambda)$ и прохождения $I_s(\lambda)$ в соответствии со статьей [27]:

$$\alpha_x = \frac{\int_{0.3\,\mu m}^{2.5\,\mu m} I_x(\lambda)[1 - R(\lambda)]d\lambda}{\int_{0.3\,\mu m}^{2.5\,\mu m} I_x(\lambda)d\lambda}. \qquad (1)$$

2. Результаты и их обсуждения

2.1. Структура наполнителей и композитов до и после облучения КП

На рис. 2 представлены СЭМ- и ПЭМ-изображения УНТ в наполнителях „Таунит-М“ и „Таунит-МД“ и графеновых пластинок. Диаметр УНТ в наполнителе „Таунит-М“ находится в диапазоне 10–20 nm с преобладающим средним размером 12–15 nm. Большинство УНТ имеют неправильную форму, изгибаются и склонны к скручиванию. В то же время УНТ в „Таунит-МД“ значительно длиннее и менее подвержены закручиванию по сравнению с УНТ в „Таунит-М“. Представленные малослойные графеновые нанопластинки имеют линейные размеры в пределах от 5 до 15 μm и демонстрируют выраженную слоистую кристаллическую структуру.

На рис. 3 представлены изображения полимерных образцов до и после воздействия АК. Изначально образцы имеют неоднородную шероховатую поверхность, но после обработки, как видно на рисунке, облученная поверхность как чистой эпоксидной смолы, так и образцов с наполнителями становится более темной и матовой и их характеристики поглощения значительно улучшаются (рис. 10 [28]).

Для исследования морфологии поверхности и глубины эрозии эпоксидных нанокомпозитов под действием КП использовался сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-4800. Для каждого образца сравнивалась топология поверхности после воздействия КП с флюэнсом $30 \cdot 10^{20}$ cm^{-2} и поверхности обратной стороны образца, не подвергавшейся обработке в плазме. Последняя принималась за исходную поверхность образца до

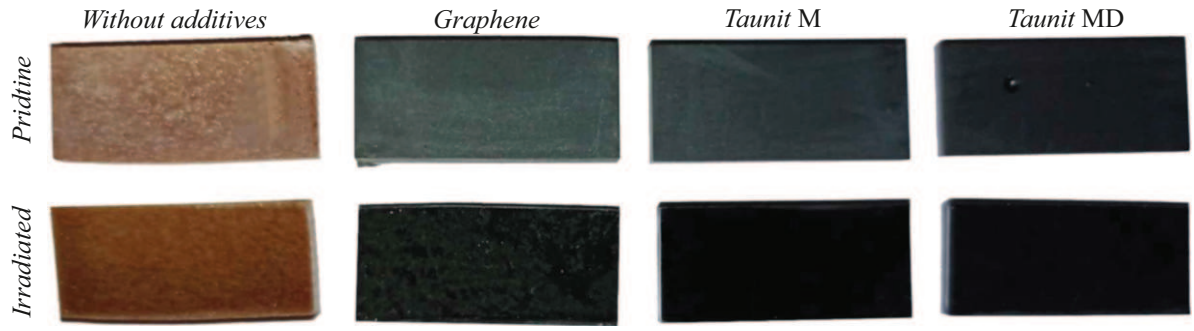


Рис. 3. Внешний вид образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями до и после облучения КП ($F = 30 \cdot 10^{20}$ atom/cm^2).

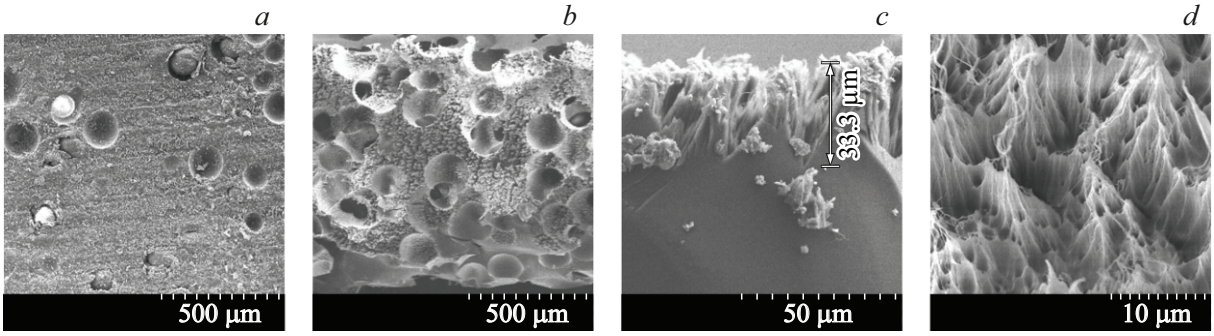


Рис. 4. СЭМ-изображения образца №0 (эпоксидной смолы без наполнителя): *a* — обратная сторона образца (исходная поверхность); *b* — поверхность после обработки в плазме; *c* — поперечное сечение образца; *d* — увеличенное изображение фрагмента поверхности после плазменной обработки.

обработки в КП. Глубина эрозии поверхности оценивалась на поперечных сечениях образцов. На рис. 4 представлены микрофотографии образца эпоксидной смолы без наполнителей.

Как на исходной поверхности, так и на поверхности после плазменной обработки (на рис. 4) наблюдаются крупные поры округлой формы. Их появление можно объяснить образованием пузырьков газа в процессе отверждения эпоксидной смолы. Также это может происходить из-за испарения во время полимеризации добавленного ацетона. Обработка АК приводит к увеличению пор за счет поверхностной реакции, сопровождающейся выделением летучих веществ. Плазменная обработка приводит к растравливанию верхнего слоя полимера и формированию развитого эрозионного микрорельефа, ориентированного навстречу потокуКП. Глубина эрозии или толщина вытравленной части составляет около $33\,\mu$m (рис. 4, *c*).

Рис. 5 иллюстрирует морфологию эпоксидной смолы, армированной графеном в концентрации 1 wt.% Заметно, что с добавлением наполнителя поверхность становится более гладкой, отсутствуют воздушные поры на поверхности материала. Воздействие АК приводит к эрозии поверхности с образованием развитого микрорельефа ориентированного в направлении воздействия КП. На рис. 5, *d* видны волокнообразные пучки с различными фрагментами как бы налипшего материала. Из-за ориентации пучки представляют собой подобие пирамид. Глубина эрозии для эпоксидной смолы с графеновым наполнителем составляет около $52\,\mu$m.

На рис. 6, 7 показана морфология эпоксидной смолы, армированной наполнителями „Таунит-М“ и „Таунит-МД“. Можно заметить, что УНТ наполнителя однородно диспергированы в эпоксидной матрице. Более того, не обработанная КП-поверхность полимеров с углеродными наполнителями более однородна, чем поверхность чистой эпоксидной смолы. Крупные поры, наблюдаемые в чистой эпоксидной смоле, не регистрируются в полимерах с наполнителями. Следует отметить, что поверхность образца с „Таунит М“ более гладкая, чем в случае с „Таунит МД“. Это может свидетельствовать о более плотном распределении УНТ в матрице полимера. Воздействие АК также приводит к эрозии поверхности с образованием развитого пространственно-ориентированного микрорельефа. Наблюдается заметное увеличение глубины эрозии для эпоксидных смол с УНТ. Так, максимальная глубина эрозии составляет около 58 и $80\,\mu$m для образцов, модифицированных „Таунит-М“ и „Таунит-МД“ соответственно.

Следует отметить, что облученная поверхность образцов с наполнителями „Таунит М“ и „Таунит МД“ характеризуется равномерным „ворсообразным“ рельефе-

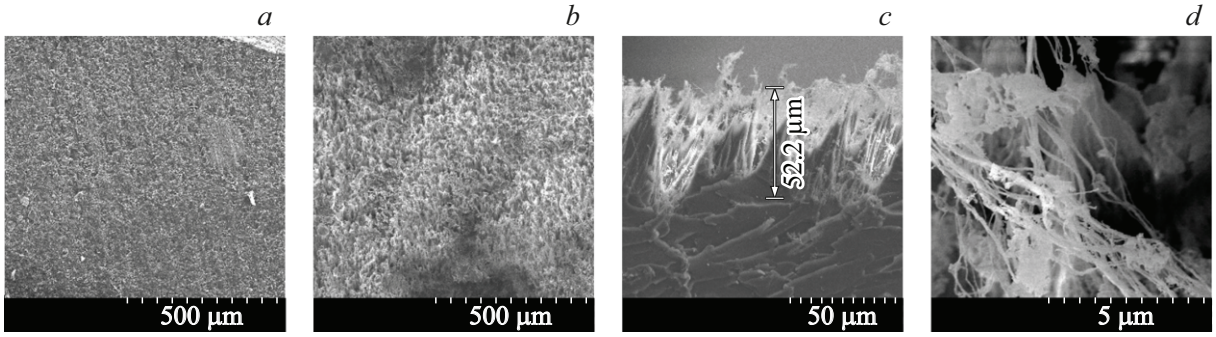


Рис. 5. СЭМ-изображения образца №1 (эпоксидного композита с 1 wt.% графена): *a* — обратная сторона образца (исходная поверхность); *b* — поверхность после обработки в плазме; *c* — поперечное сечение образца; *d* — увеличенное изображение фрагмента поверхности после плазменной обработки.

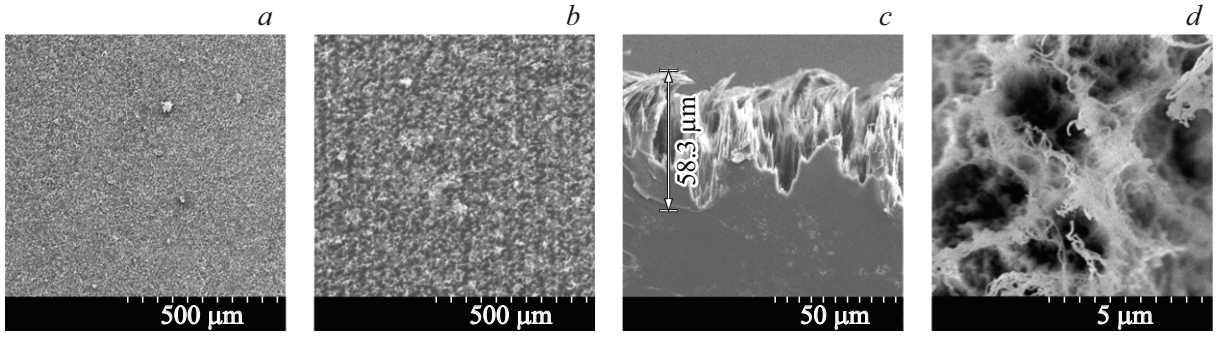


Рис. 6. СЭМ-изображения образца №2 (эпоксидного композита с 1 wt.% УНТ серии „Таунит М“): *a* — исходная поверхность; *b* — поверхность после обработки в плазме; *c* — поперечное сечение образца; *d* — увеличенное изображение фрагмента поверхности после плазменной обработки.

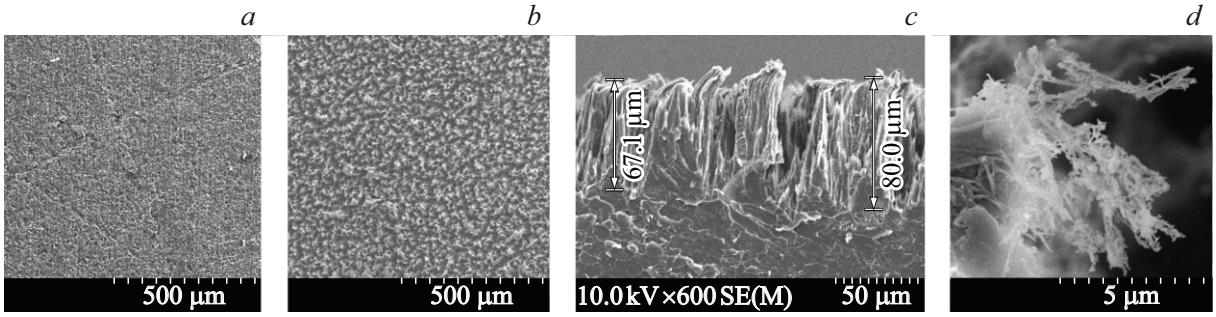


Рис. 7. СЭМ-изображения образца №3 (эпоксидного композита с 1 wt.% УНТ серии „Таунит МД“): *a* — исходная поверхность; *b* — поверхность после обработки в плазме; *c* — поперечное сечение образца; *d* — увеличенное изображение фрагмента поверхности после плазменной обработки.

фом, что свидетельствует об эрозии эпоксидной смолы под действием АК [29,30]. После облучения в кислородной плазме контрастность на снимках оптической микроскопии резко снижается, что, скорее всего, связано с увеличением шероховатости поверхности. В случае образцов с УНТ возможен также эффект их „распушивания“ (массив УНТ частично покрывается „бахромой“ из частично разрушенных трубок), что наблюдается на снимках СЭМ [31]. Эффект „распушивания“ тесно связан с известным 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 [3,31]. Следует отметить также, что добавление углеродных наполнителей увеличивает глубину эрозии поверхности, причем максимальная глубина эрозии около $80\,\mu$m наблюдается для образца №3, модифицированного УНТ серии „Таунит МД“. Трубки этой серии более однородно распределяются в полимерных композитах. По

данным [3] разрушение УНТ под воздействием КП начинается при флюенсе КП от $\sim 5 \cdot 10^{19}\,\mathrm{cm}^{-2}$. В нашем случае флюенс КП был почти на 2 порядка величины выше ($3 \cdot 10^{21}\,\mathrm{cm}^{-2}$), поэтому эффект деструкции УНТ ярко выражен.

2.2. Потеря массы как функция флюенса АК

На рис. 8 представлены зависимости потери массы образцов под воздействием АК для исходной эпоксидной смолы и композитов с углеродными наполнителями. Значения удельной потери массы композитов монотонно возрастают с увеличением флюенса АК для всех образцов. Добавление углеродных наполнителей приводит к уменьшению стойкости эпоксидной смолы к воздействию потока АК с флюенсом $30 \cdot 10^{20}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Наибольшая потеря массы и глубина эрозии в результате облучения в КП наблюдается для образцов с МУНТ.

Для всех образцов зависимость кривых нелинейная, сначала наблюдается крутой рост, затем плавное замедление. Удельные потери массы возрастают с увеличением флюенса, но динамика роста снижается при высоких значениях его. Это указывает на эффект насыщения, свободный объем композита „выгорает“, а развитая поверхность начинает эффективно поглощать падающее излучение. Отмечено, что активный рост потерь массы начинает замедляться после флюенса $\approx 10 \cdot 10^{20}\,\mathrm{cm}^{-2}$. До этого флюенса наблюдается крутая экспоненциальная зависимость, а после — рост приближается к линейному.

Образец с наполнителем „Таунит МД“ в большей степени демонстрирует локальные области чистой эпоксидной смолы, эти области в первую очередь подвержены эрозии, за счет выгорания материала, что объясняет более сильное повреждение для образца №3. Кроме того, более текстурированная поверхность композита с МУНТ „Таунит МД“ способствует более активному взаимодействию с АК.

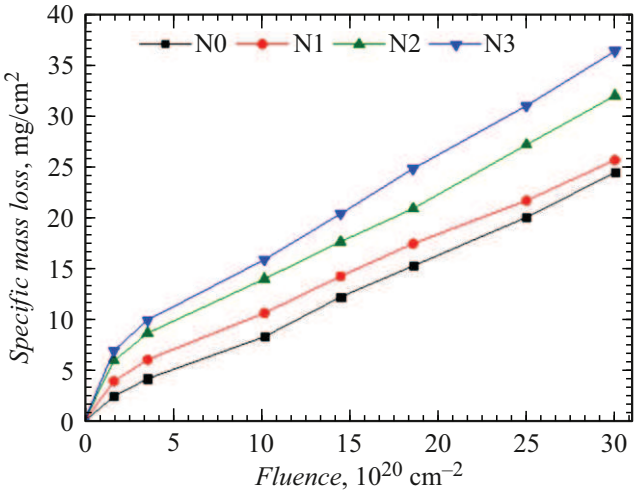


Рис. 8. Зависимости потери масс образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями (1 wt.%) от флюенса АК: N0 — чистая эпоксидная смола, N1 — с графеном, N2 — с „Таунит М“, N3 — с „Таунит МД“.

Как видно, добавление углеродных наполнителей приводит к увеличению потери массы эпоксидной смолы. Более того, потеря массы больше для „Таунит МД“, чем для „Таунит М“ или наполнителя графен. Это согласуется с результатами СЭМ, описанными выше. Для оценки устойчивости обсуждаемой армированной эпоксидной смолы к воздействию АК по сравнению с другими известными материалами был рассчитан эрозионный выход (потеря массы на один падающий атом). Он равен отношению удельной потери массы $\Delta m/S$ (где S — площадь облучения образца) к флюенсу АК. Так, в нашем эксперименте коэффициент эрозии массы составил $8.2 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g/atom}$ при флюенсе $30 \cdot 10^{20}\,\mathrm{cm}^{-2}$ для чистой эпоксидной смолы. Это несколько выше, чем для эпоксидной смолы, рассмотренной в работах [32] ($2.8 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g/atom}$) и [33] ($\sim 6.0 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g/atom}$), и для ряда других известных полимеров, таких как полиимидные и полиамидноимидные пленки ($> 5 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g/atom}$) [1,34], высокоударный полистирол со сверхтонким метилполисилоксанексирогелем ($> 2 \cdot 10^{-24}\,\mathrm{g/atom}$) [29]. В случае образцов с УНТ-наполнителями эрозионный выход составляет $8.56 \cdot 10^{-24}$, $1.07 \cdot 10^{-23}$ и $1.21 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{g/atom}$ для композитов с наполнителями графен, „Таунит М“ и „Таунит МД“ соответственно. Следует отметить, что большая потеря массы для смолы, армированной „Таунит МД“, согласуется с наибольшей глубиной эрозии для нее.

Измерение массы образцов производилось вне вакуумной камеры на аналитических микровесах HR-202 I до и после облучения потоком плазмы. По изменениям массы образцов с учетом экспонированной площади вычислялись удельные потери массы.

В табл. 1 представлены данные об изменениях удельной потери массы образцов под воздействием потока АК 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 в сравнении с исходной эпоксидной смолой, как в результате хранения на воздухе, так и после облучения в кислородной плазме. Наибольшая потеря массы в результате хранения на воздухе в течение 11 дней и облучения в кислородной плазме характерна для образца с наполнителем „Таунит МД“. Значения удельных потерь массы композитов в зависимости от флюенса АК изменяются монотонно для всех образцов.

Результаты сканирующей микроскопии согласуются с данными измерений потери массы и спектрами отражения образцов после обработки в КП. Максимальная потеря массы наблюдалась для образца №3 (эпоксидный композит с 1 wt.% УНТ серии „Таунит МД“, который характеризуется максимальной глубиной эрозии поверхности. Как будет показано далее, для этого же образца

Таблица 1. Потери массы эпоксидной смолы с углеродными наполнителями в результате хранения на воздухе и облучения потоком КП с флюенсом $30 \cdot 10^{20}$ cm^{-2}

№образца	Первоначальная масса, mg	Масса спустя 11 дней хранения на воздухе, mg	Масса после облучения, mg	Удельная потеря массы для флюенса $30 \cdot 10^{20}$ cm^{-2}, mg/cm^2
N0 эпоксидная смола	397.38	397.38	348.73	24.47
N1 графен	524.39	524.10	472.06	25.69
N2 Таунит М	531.24	530.94	467.40	32
N3 Таунит МД	538.74	538.31	466.01	36.38

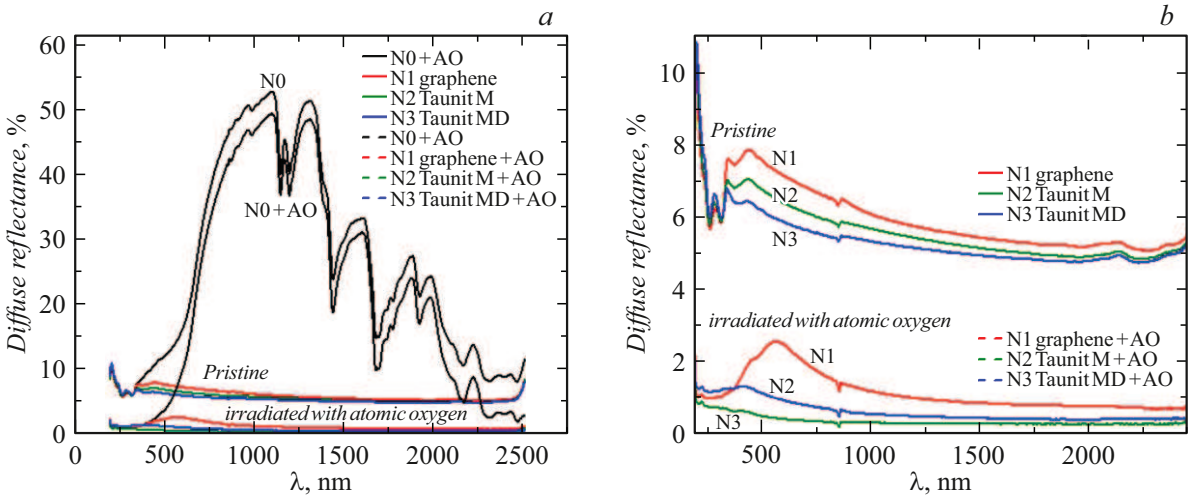


Рис. 9. Спектры диффузного отражения эпоксидной смолы, композита без и с облучением: со спектром образца чистой эпоксидной смолы (*a*) и без него (*b*).

отмечаются минимальные коэффициенты зеркального и диффузного отражения после обработки в кислородной плазме (рис. 9, 10).

2.3. Коэффициенты диффузного и зеркального отражения

На рис. 9, 10 представлены спектры диффузного D и зеркального R отражения эпоксидной смолы с углеродными наполнителями до и после облучения в кислородной плазме с флюенсом $30 \cdot 10^{20}$ cm^{-2}. Рассмотрим вначале роль углеродных наполнителей на оптические свойства исходных композитов. Для исходных необлученных образцов диффузное отражение превышает зеркальное в среднем на 25 % для чистой эпоксидной смолы и на ~ 5 % для образцов с наполнителями из УНТ из-за их меньшей пористости, что согласуется с данными СЭМ. Добавление наполнителей снижает диффузное отражение эпоксидной смолы на 19.82 % (графен), 20.18 % („Таунит М“) и на 20.42 % („Таунит МД“), и зеркальное отражение на 0.21 % (графен), 0.24 % („Таунит М“) и на 0.22 % („Таунит МД“). Анализ полученных данных свидетельствует о том, что введение углеродных наполнителей в композит на основе эпоксидной смолы приводит к снижению коэффициента зеркального отражения в 2.1–2.5 раза, а диффузного — в 4.3–4.8 раза.

Облучение в кислородной плазме с флюенсом $30 \cdot 10^{20}$ cm^{-2} приводит к уменьшению зеркального отражения чистой эпоксидной смолы в 1.4 раза, и уменьшению в 9.9, 15.8 и 13.6 раза для образцов с наполнителями графен, „Таунит М“, „Таунит МД“ соответственно. Облучение в кислородной плазме приводит также к уменьшению диффузного отражения чистой эпоксидной смолы в 1.2 раза, и уменьшению в 5.3, 16.7 и 9.0 раз для образцов с наполнителями графен, „Таунит М“, „Таунит МД“ соответственно. Таким образом, введение в эпоксидную смолу углеродных наполнителей с последующим облучением в кислородной плазме с флюенсом $30 \cdot 10^{20}$ cm^{-2} приводит к уменьшению коэффициентов отражения более чем на порядок величины. Наибольший эффект регистрируется для образца с наполнителем „Таунит М“: коэффициент зеркального отражения уменьшается в 40 раз, а коэффициент диффузного отражения в 77 раз по сравнению с необлученной эпоксидной смолой без наполнителя.

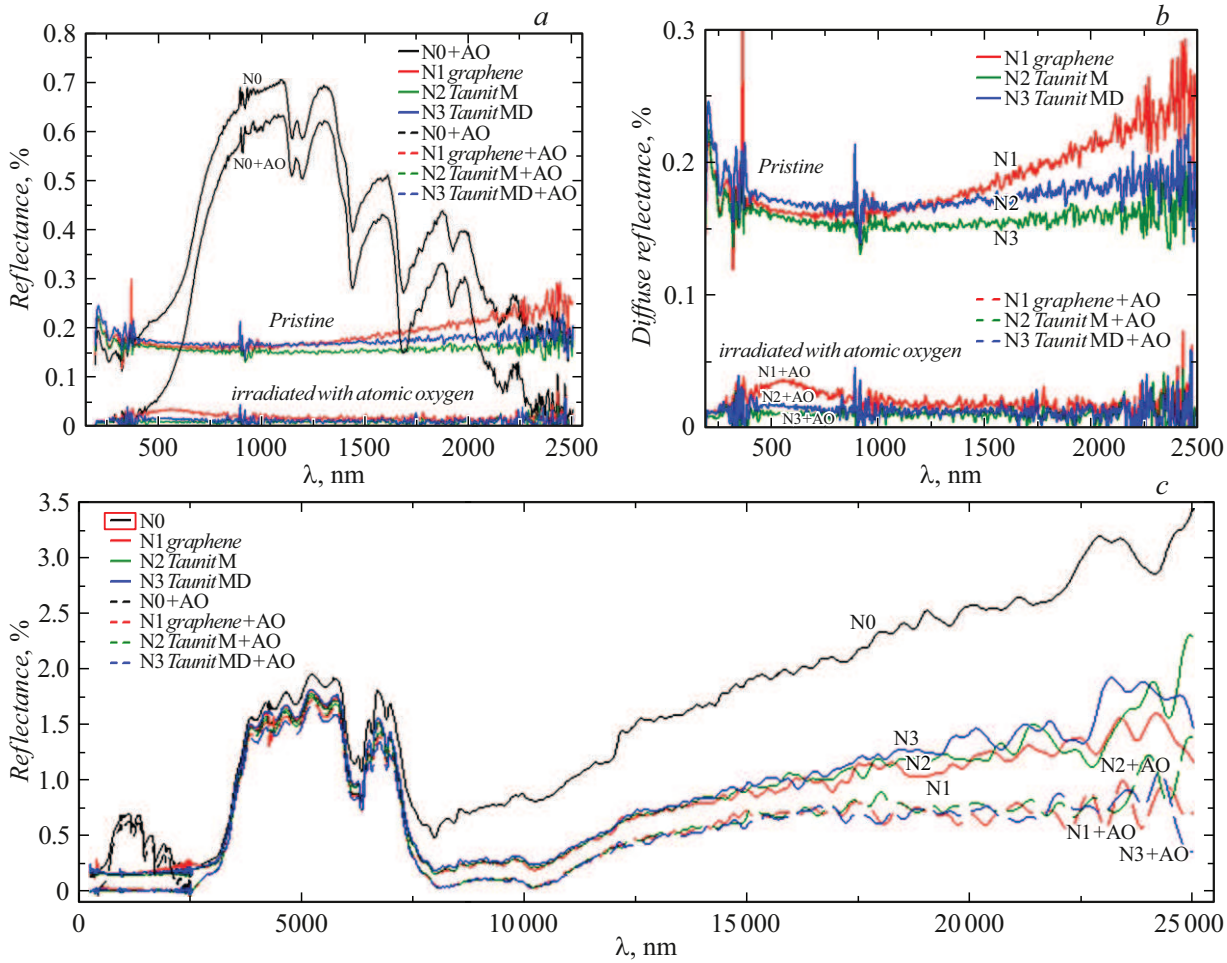


Рис. 10. Спектры зеркального отражения: со спектром образца чистой эпоксидной смолы (a) и без него (b) в диапазоне 0.2–2.5 μm; весь диапазон (c).

Коэффициент зеркального отражения становиться значительно меньшим во всей спектральной области исследования (0.2–25 μm) по сравнению с исходными образцами. Также можно отметить, что кривые до и после обработки КП остаются идентичными по своей форме.

В ИК-диапазоне наблюдается общий рост интенсивности с увеличением длины волны, что характерно для многих материалов, в этой области спектра.

Следует отметить, что в диапазоне 3–7 μm коэффициент зеркального отражения для всех образцов (рис. 10) резко возрастает, т. е. наблюдается так называемый „пьедестал“. Это повышение обусловлено в основном оптическими свойствами самой полимерной матрицы эпоксидной смолы. В этой спектральной области для матрицы характерен рост мнимой части показателя преломления (k) и, как следствие, увеличение поверхностного отражения [35]. Эффект не связан с наполнителями и является характерным оптическим свойством эпоксидной матрицы. В этом спектральном диапазоне можно выделить тонкую структуру спектра, состоящую из нескольких небольших пиков и провалов, которые могут быть связаны с колебательными модами молекул на поверхности образцов. Например, пики в области 3000–3500 nm могут быть связаны с колебаниями O–H- или C–H-связей [36], которые активно взаимодействуют с КП с образованием новых функциональных групп (например, гидроксильных или карбонильных) на поверхности образцов, которые активно поглощают ИК-излучение в этом диапазоне [37–41]. После обработки КП некоторые пики смещаются и изменяют интенсивность, что указывает на структурные изменения поверхности образцов.

В диапазоне от 3 до 7.5 μm в ИК-спектрах обычно наблюдаются полосы поглощения, связанные с колебаниями молекул воды (H–O) [36]. Основные полосы поглощения воды в этом диапазоне находятся около 3 и 6 μm. Провалы на длине волны $\sim$ 3000 nm и между 6000–6500 nm (рис. 10) — это области, где наблюдается сильное поглощение, связанное с колебаниями O–H-связей в воде. Если после обработки КП интенсивность в первой и/или второй области увеличилась, это может

Таблица 2. Средние значения коэффициентов зеркального и диффузного отражения в диапазоне (1900−2500 nm) для образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями до и после облучения в КП

Образец	Зеркальное R, %	Зеркальное R после облучения, %	Диффузное R, %	Диффузное R после облучения, %
N0 эпоксид	0.398	0.286	25.751	21.030
N1 графен	0.189	0.019	5.934	1.100
N2 Таунит М	0.158	0.010	5.568	0.333
N3 Таунит МД	0.177	0.013	5.334	0.590

указывать на появление воды или гидроксильных групп (OH) на поверхности материала.

Присутствие этих полос, указывающих на наличие кислородных и водородных связей, в том числе в исходных образцах УНТ, возникало либо из-за атмосферной влаги в исходном материале, либо из-за окисления в процессе очистки.

После обработки образцов КП форма кривых спектров отражения несколько изменяется: небольшие пики и провалы, характерные для O–H-, C=O- и C–O-связей, становятся более выраженными. Это указывает на увеличение содержания воды, гидроксильных групп и других кислородсодержащих функциональных групп на поверхности материала. Новых пиков или значительных сдвигов в положении уже существовавших не наблюдается. В условиях ОКП отмеченные небольшие флуктуации коэффициента отражения практически не будут проявляться, так как уже отмечалось, отражение в области $3-7\,\mu$m в основном обусловлено свойствами материала матрицы — эпоксидной смолы.

В целом в ИК-области исходные образцы имеют более высокий коэффициент отражения, чем после обработки КП. Это особенно заметно в области длин волн от 7000 до 25000 nm, где значения интенсивности отражения для необработанного образца значительно превышают значения для обработанного. Снижение коэффициента отражения после обработки КП наблюдается на всех длинах волн, но его величина может варьироваться.

Для ближнего и среднего ИК-диапазонов было рассчитано среднее снижение коэффициента отражения. Для этого для каждой длины волны λ вычислена разница:

$$\Delta R(\lambda) = R_{before}(\lambda) - R_{after}(\lambda). \qquad (2)$$

Сумма всех $\Delta R(\lambda)$ разделена на количество точек данных N:

$$average\ decrease = \frac{\Sigma \Delta R(\lambda)}{N}. \qquad (3)$$

Таким образом получено, что для исходного композита с графеном имеет место среднее снижение отражения около 5 %, образец с наполнителем „Таунит М“ – около 6 %, образец „Таунит МД“ – около 7 %. Обработка КП приводит к среднему снижению отражения на 5 %−7 % для всех образцов. Самое значительное снижение отражения после обработки КП наблюдается в диапазоне 3000−3500 nm для всех образцов. У образца с графеном среднее снижение отражения в диапазоне 3000−3500 nm составляет около 7 %−8 %; образец с „Таунит М“ показывает среднее снижение отражения в диапазоне 3000−3500 nm около 8 %−9 %, а образец с „Таунит МД“ около 9 %−10 %. Таким образом, коэффициент отражения снижается в 1.3−1.4 раза в этом спектральном диапазоне.

В табл. 2 приведены средние значения коэффициентов отражения в спектральном диапазоне 190−2500 nm для образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями до и после облучения в кислородной плазме.

В УФ-диапазоне (200−400 nm) до обработки АК средний коэффициент отражения для всех образцов составляет примерно 0.15−0.20, после обработки он снижается до 0.02−0.05. Таким образом, в УФ-диапазоне отражение снижается примерно на 80 %. В видимом диапазоне (400−700 nm) средний коэффициент отражения до обработки для всех образцов составляет примерно 0.20−0.25, а после обработки снижается до 0.05−0.10. Итого в видимом диапазоне отражение уменьшается примерно на 66 %. В ближнем ИК (700−2500 nm) отражение снижается на 55 %.

Таким образом, нанокомпозит с „Таунит М“ более чувствителен к воздействию КП, чем с „Таунит МД“. В работе [30] было показано, что АК-облучение эпоксидной смолы с МУНТ приводит к значительной эрозии поверхности и деструкции МУНТ, сопровождающейся увеличением уровня дефектов в УНТ. В нашем эксперименте эти факторы должны привести к увеличению абсорбционной способности композитов „эпоксидная смола — УНТ“. Ожидается, что УНТ „Таунит М“ будут реагировать с АК в большей степени, чем более агломерированные УНТ „Таунит МД“. Сравнение эволюции структуры наполнителей „Таунит М“ и „Таунит МД“ в среде АК является предметом будущих исследований.

2.4. Оценка термостойкости покрытий в условиях ОКП

Важным фактором применения обсуждаемых покрытий в аппаратах, функционирующих в ОКП, является их термостойкость к нагреву солнечным излучением. С це-

лью прогнозирования стойкости композитного покрытия к изменениям температуры ($-75\,^\circ\mathrm{C} + 200\,^\circ\mathrm{C}$) [42] из-за воздействия солнечного излучения в условиях ОКП (200–1000 km от поверхности Земли) необходимо оценить температурный интервал функционирования его на поверхности космического аппарата. Процесс вычисления температуры может быть выполнен на основании данных оптических измерений на указанных материалах определенной толщины, равной 2 mm. Все расчеты производились с использованием программы, разработанной на языке Python 3.

Спектральный коэффициент поглощения $A(\lambda)$ можно рассчитать на основе закона сохранения энергии по формуле [43,44]:

$$A(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda), \tag{4}$$

где $T(\lambda)$ — пропускание ($T(\lambda) = 0$), считаем покрытия непрозрачными во всем исследуемом спектральном диапазоне, что подтверждается результатами экспериментальных измерений; $R(\lambda)$ — коэффициент отражения, λ — длина волны падающего излучения. Так как пропускание $T(\lambda) = 0$, тогда соотношение между спектральными коэффициентами отражения $R(\lambda)$, излучения $\varepsilon(\lambda)$ и поглощения $A(\lambda)$ можно определить с помощью закона Кирхгофа [43,44]:

$$\varepsilon(\lambda) = A(\lambda) = 1 - R(\lambda). \tag{5}$$

Коэффициенты солнечного поглощения α_s и излучения ε_0 можно рассчитать по формулам [43,45]:

$$\alpha_s = \frac{\int_0^\infty A(\lambda) P_\lambda^i d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda^i d\lambda}, \tag{6}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda) P_\lambda^{bb}(T) d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda^{bb}(T) d\lambda}, \tag{7}$$

где P_λ^i — спектральная плотность мощности падающего солнечного излучения, $P_\lambda^{bb}(T)$ — спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела (АЧТ), $A(\lambda)$ — коэффициент спектрального поглощения, $\varepsilon(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения, λ — длина волны падающего излучения.

Спектральная плотность мощности излучения АЧТ рассчитывалась по формуле Планка [46]:

$$P_\lambda^{bb}(T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1}, \tag{8}$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме, k — постоянная Больцмана, T — температура АЧТ.

Равновесная температура тела в космическом пространстве определяется балансом между внутренним тепловыделением, вызванным работой бортовой электроники, и теплообменом посредством излучения в окружающее пространство. Внутренние источники тепла спутника, обусловленные функционированием электронных систем, характеризуются мощностью тепловыделения P_{inn}, которая, в свою очередь, зависит от потребляемой аппаратурой электрической мощности и выделяемой ею тепловой энергии. Однако гораздо больший вклад в тепловой баланс спутника вносит внешний нагрев солнечным излучением, что особенно актуально для нано- и микроспутников. На орбите Земли интенсивность солнечного излучения составляет около $1360\,\mathrm{W/m^2}$ [47]. Часть этого излучения поглощается поверхностью спутника, вызывая его нагрев, и количество поглощенной энергии определяется коэффициентом отражения (альбедо) спутника, а также его ориентацией относительно Солнца.

Равновесная температура T_p спутника может быть оценена из условия баланса энергии [48]:

$$P_{inn} + \alpha S A_{sun} = \varepsilon \sigma A_{rad} T_p^4, \tag{9}$$

где P_{inn} — внутреннее тепловыделение, α — коэффициент поглощения солнечного излучения, S — солнечная постоянная ($1360\,\mathrm{W/m^2}$), A_{sun} — площадь поверхности спутника, освещаемая Солнцем, ε — коэффициент излучения (степень черноты) поверхности спутника, σ — постоянная Стефана–Больцмана, A_{sun} — площадь поверхности спутника, участвующая в излучении тепла.

Как отмечалось выше, для малоразмерных (нано- и микро-) спутников, внутреннее тепловыделение P_{inn} обычно мало по сравнению с поглощенной солнечной энергией $\alpha S A_{sun}$. Поэтому при расчетах равновесной температуры внутренним тепловыделением часто пренебрегают и используют упрощенное выражение [49]:

$$\alpha S A_{sun} = \varepsilon \sigma A_{rad} T_p^4. \tag{10}$$

Это упрощение позволяет более точно и быстро оценить равновесную температуру спутника, учитывая только внешний нагрев от Солнца и излучательный теплообмен с окружающей средой. Расчет равновесной температуры T_p проводился по формуле [50,51] (без учета внутреннего нагрева):

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{S\alpha_s}{4\varepsilon_0 \sigma}}, \tag{11}$$

где σ — постоянная Стефана–Больцмана ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$), S — солнечная постоянная ($1360\,\mathrm{W/m^2}$).

Для оценки эффективности преобразования падающего излучения в тепловую энергию вычисляется коэффициент фототермического преобразования η по формуле [52]:

$$\eta = B\alpha_s - \frac{\varepsilon_0 \sigma T^4}{Q_{sun}}, \tag{12}$$

где σ — постоянная Стефана–Больцмана, $Q_{sun} = 150\,\mathrm{kW/m^2}$ — мощность солнечного излучения на единицу площади, T — температура покрытия,

Таблица 3. Коэффициент солнечного поглощения α_s, коэффициент излучения ε_0, отношение α_s/ε_0, равновесная температура T_p и эффективность фототермического преобразования η для покрытий

Образец	α_s	ε_0	α_s/ε_0	T_p, °C	η
N0 эпоксид плазма	0.9968	0.9808	1.0163	6.3	0.904
N1 графен плазма	0.9995	0.9943	1.0053	5.5	0.907
N1 графен исходный	0.9982	0.9915	1.0068	5.6	0.906
N2 Таунит М плазма	0.9997	0.993	1.0068	5.6	0.907
N2 Таунит М исходный	0.9979	0.9893	1.0087	5.7	0.905
N3 Таунит МД плазма	0.9997	0.9951	1.0046	5.4	0.907
N3 Таунит МД исходный	0.9983	0.9904	1.008	5.7	0.906

коэффициент $B = 0.91$. Потери на излучение учитываются посредством варьирования коэффициента теплового излучения ε_0.

Не менее важной особенностью расчетов коэффициента солнечного поглощения α_s является зависимость мощности солнечного излучения P^i_λ от пропускания атмосферы. Для расчетов α_s использовался спектр излучения солнца за пределами атмосферы (воздушная масса AM0 [53]). Результаты всех выполненных расчетов приведены в табл. 3.

Результаты расчета свидетельствуют о том, что термодеструкция материала покрытий на основе полимера, наполненного приведенными углеродными наноматериалами, не должна проявляться в условиях ОКП. Такие покрытия представляют интерес так же для использования в качестве колориметров и фототермальных преобразователей солнечной энергии.

Заключение

Снижение коэффициентов отражения и увеличение поглощения связано в первую очередь с изменением морфологии поверхности под действием АК. Как показано в работе, определенный вклад в увеличение поглощения вносят углеродные компоненты наполнителя. При облучении КП окисление углеродных наполнителей и образование летучих компонент приводит к формированию специфической структурированной топологии шероховатости и образованию дефектов структуры, которые способствуют эффективному многократному переотражению, рассеиванию и поглощению света. УНТ и графен благодаря своей высокой удельной поверхности и проводящим свойствам усиливают поглощение электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне.

Установлено, что обработка в КП с флюенсом $30 \cdot 10^{20}\,\mathrm{cm}^{-2}$ вызывает снижение коэффициентов отражения более чем на порядок величины. В частности, коэффициенты диффузного отражения облученных композитов с наполнителями ГНП и МУНТ не превышают 2% и 1% соответственно, а коэффициенты зеркального отражения составляют менее 0.04% и 0.02%. Эти показатели свидетельствуют о высокой эффективности данных материалов в качестве антибликовых в широком спектральном диапазоне для применения в оптических и оптоэлектронных системах, как в космических аппаратах ОКП, так и для применений в наземных условиях.

Сформированные и исследованные материалы могут быть также использованы для создания защитных покрытий, устойчивых к агрессивным условиям космической среды. Результаты приведенных расчетов и экспериментальных данных показывают, что термодеструкция исследованных материалов не будет проявляться в условиях ОКП. Такие покрытия перспективны и для использования в качестве колориметров и фототермальных преобразователей солнечной энергии. Таким образом, полученные результаты исследований демонстрируют значительный потенциал композитов на основе эпоксидной смолы с углеродными наноматериалами для применения в условиях сложных внешних воздействий.

Дальнейшие исследования целесообразно расширить на оптимизацию концентрации наполнителей, изучение долговременной стабильности свойств в условиях термоциклирования в ОКП и применение более сложных по составу наполнителей.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований „Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства“ (задание 5.1.4.3.4, №ГР 20212657).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] L.S. Novikov, E.N. Voronina, V.N. Chernik, N.P. Chirskaya, W. Zhang. Int. J. Nanosci., **19**, 1950007 (2020). https://doi.org/10.1142/S0219581X19500078

[2] B.A. Banks, K.K. de Groh, S.K. Miller. MRS Proc., **851**, (2004). https://doi.org/10.1557/PROC851-NN8.1. NN8.1

[3] L.S. Novikov, E.N. Voronina, V.N. Chernik, N.G. Chechenin, A.V. Makunin, E.A. Vorobieva. J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech., **10**, 617 (2016). https://doi.org/10.1134/S1027451016030307

[4] V.N. Chernik. *Atomic oxygen simulation by plasmadynamic accelerator with charge exchange*, in: Proc.7th Int. Symp. Mater. Sp. Environ. (Toulouse, SP-399, 1997), p. 237–241.

[5] *Standard Practices for Ground Laboratory Atomic Oxygen Interaction Evaluation of Materials for Space Applications* (ASTM E2089-00, 2006), 5 p.

[6] R. Verker, A. Bolker, Y. Carmiel, I. Gouzman, E. Grossman, T.K. Minton, S. Remaury. Acta Astronaut, 173, 333 (2020). https://doi.org/10.1016/j. actaastro.2020.04.065

[7] V. Chernik, L. Novikov, A. Akishin. *About adequacy of ground-based tests of polymers at higher atomic oxygen energy (20–30 ev)*, in: Proc. 10th ISMSE, 8th ICPMSE (ESA Publications Division, Collioure, France, Noordwijk, The Netherlands, 2006), p. 4.

[8] A. Vesel, G. Primc, R. Zaplotnik, M. Mozetič. Plasma Phys. Controlled Fusion, **62** (10), (2020). DOI: 10.1088/1361-6587/aba1f0

[9] A.A.P.O. Amorim, M.G. Oliveira, M.C. Mancini, A.S. Sirqueira. SN Appl. Sci., **3**, 236 (2021). https://doi.org/10.1007/s42452-021-04247-7

[10] A. Ghasemi-Kahrizsangi, H. Shariatpanahi, J. Neshati, E. Akbarinezhad. Appl. Surf. Sci., **331**, 115 (2015). https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.038

[11] F. Gojny, M. Wichmann, B. Fiedler, K. Schulte. Compos. Sci. Technol., **65**, 2300 (2005). https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.021

[12] D. Margoy, I. Gouzman, E. Grossman, A. Bolker, N. Eliaz, R. Verker. Acta Astronaut., **178**, 908 (2021). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.026

[13] G. Pan, Q. Guo, J. Ding, W. Zhang, X. Wang. Tribol. Int., **43**, 1318 (2010). https:// doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.068

[14] F. El-Tantawy, K. Kamada, H. Ohnabe. Mater. Lett., **56**, 112 (2002). https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00401-9

[15] A. Ghasemi-Kahrizsangi, J. Neshati, H. Shariatpanahi, E. Akbarinezhad. Prog. Org. Coating, **85**, 199 (2015). https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.04.011

[16] A. Ghasemi-Kahrizsangi, H. Shariatpanahi, J. Neshati, E. Akbarinezhad. Appl. Surf. Sci., **353**, 530 (2015). https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.029

[17] S. Laurenzi, M. Clausi, F. Zaccardi, U. Curt, M.G. Santonicola. Acta Astronaut., **159**, 426 (2019). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.01.043

[18] R. Rohini, K. Verma, S. Bose. ACS Omega, 3, 3974 (2018). https://doi.org/10.1021/ acsomega.8b00218

[19] V.K. Chakradhary, S. Juneja, M. Jaleel Akhtar. Mater. Today Commun., **25**, 101386 (2020). https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101386

[20] L. Mohan, T.N. Kumar, S. Karakkad, S.T. Krishnan. IEEE Trans. Nanotechnol., **20**, 627 (2021). https://doi.org/ 10.1109/TNANO.2021.3103955

[21] S. Bellucci, L. Coderoni, F. Micciulla, G. Rinaldi, I. Sacco. J. Nanosci. Nanotechnol., **11**, 9110 (2011). https://doi.org/10.1166/jnn.2011.4281

[22] V.K. Piddubnyi, I.M. Zin', B.M. Lavryshyn, L.M. Bilyi, Y.I. Kolodii, M.B. Ratushna. Mater. Sci., **41**, 265 (2005). https://doi.org/10.1007/s11003-005-0160-4

[23] S. Soltani, S.A. Razinobakht, R. Asmatulu. J. Appl. Polym. Sci., **137**, 49106 (2020). https://doi.org/10.1002/app.49106

[24] A.S. Krieg, J.A. King, D.C. Jaszczak, I. Miskoglu, O.P. Mills, G.M. Odegard. J. Compos. Mater., **52**, 3909 (2018). https://doi.org/10.1177/0021998318771460

[25] H.B. Baskey, M. Jaleel Akhtar. *Electromagnetic Design and Testing of Carbon Black and Carbon Fiber-Epoxy Composites for Defence Stealth Applications* (2013 IEEE Appl. Electromagn. Conf., IEEE, 2013), p. 1–2. https://doi.org/10.1109/ AEMC.2013.7045065

[26] D. Micheli, C. Apollo, R. Pastore, R. Bueno Morles, S. Laurenzi, M. Marchetti. Acta Astronaut., **69**, 747 (2011). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.06.004

[27] Электронный ресурс. Pv Lighthouse. Режим доступа: https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/optics/spectrum lib rary/spectrum library.aspx, 2023

[28] И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, Л.С. Новиков, В.Н. Черник, Д.В. Жигулин. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 31 (2023).

[29] V.I. Pavlenko, L.S. Novikov, G.G. Bondarenko, V.N. Chernik, A.I. Gaidar, N.I. Cherkashina, O.D. Edamenko. Inorg. Mater. Appl. Res., **4**, 169 (2013). https://doi.org/ 10.1134/S2075113313020135

[30] L. Jiao, Y. Gu, S. Wang, Z. Yang, H. Wang, Q. Li, M. Li, Z. Zhang. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., **71**, 116 (2015). https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.008

[31] D.V. Kosynkin, A.L. Higginbotham, A. Sinitskii, J.R. Lomeda, A. Dimiev, B.K. Price, J.M. Tour. Nature, **458**, 872 (2009). https://doi.org/10.1038/nature07872

[32] R.C. Tennyson. High Perform. Polym., **11**, 157 (1999). https://doi.org/10.1088/0954-0083/11/1/ 013

[33] X. Wang, X. Zhao, M. Wang, Z. Shen. Polym. Eng. Sci., **47**, 1156 (2007). https://doi.org/10.1002/pen.20659

[34] L.S. Novikov, E.N. Voronina, V.N. Chernik, L.A. Zhilyakov, N.P. Chirskaya. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms, **410**, 60 (2017). https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.08.012

[35] G. Socrates. *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts* (Wiley, 2004), p. 260.

[36] T. Steffen, L.C. Fontana, J. Nahorny, D. Becker. Polymer Composites, **40** (S2), E1162 (2018). DOI: 10.1002/pc.24921

[37] A.C. Ferrari, J. Robertson. Phys. Rev. B, (2004). DOI: 10.1103/PhysRevB.69.155416

[38] K.S. Kim, H.J. Lee. Carbon, (2010). DOI: 10.1016/j.carbon.2010.03.045

[39] R.S. Ruoff, C.N.R. Rao. Adv. Mater., (2012). DOI: 10.1002/adma.201200011

[40] M. Terrones, A.K. Geim. Nature Commun., (2015). DOI: 10.1038/ncomms8291

[41] P.K. Chu, X.F. Wang. Surf. Coatings Technol., (2018). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.045

[42] С.В. Цаплин, С.А. Болычев, А.Е. Романов. Теплообмен в космосе (Изд-во Самарского ун-та, Самара, 2013), с. 56.

[43] M. Veszelei, E. Veszelei. Thin Solid Films, **236** (1–2), 46 (1993).

[44] F. Weiquan. Astrophys. Space Sci. Proceedings — Cham, **47**, 167 (2017).
[45] V. Godinho, D. Philippon, T.C. Rojas, N.N. Novikova, V.A. Yakovlev, A. Fernández. Solar Energy, **84** (8), 1397 (2010).
[46] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, K.J. Donner. *Fundamental Astronomy* (Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2017)
[47] *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques* (London, Springer London, 2008)
[48] M. Brogren, G.L. Harding, R. Karmhag, ed. by C. Amra, H.A. Macleod. *TixAlyN coatings for temperature control of spacecraft Optical Systems Design and Production* (Berlin, Germany, 1999), p. 493–501.
[49] R. Karmhag, C.G. Ribbing. Appl. Opt., **38** (4), 674 (1999).
[50] J.T. Chen, J. Wang, F. Zhang, X.Y. Fan, Z.G. Wu, P.X. Yan. J. Alloys Compound., **472** (1–2), 91 (2009).
[51] T. Böhnke, H. Kratz, A. Hultåker, J. Köhler, M. Edoff, A. Roos, G. Thornell. Opt. Mater., **30** (9), 1410 (2008).
[52] K. Xu, M. Du, L. Hao, J. Mi, Q. Yu, S. Li. J. Materiomics, **6** (1), 167 (2020).
[53] *E21 Committee. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, E21 Committee. — ASTM International.*