

ОБЛУЧЕНИЕ АТОМАРНЫМ КИСЛОРОДОМ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ СОЗДАНИЯ АНТИБЛИКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

М.Н. Жукова¹⁾, О.В. Мильчанин¹⁾, Л.С. Новиков²⁾, В.Н. Черник²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем имени Севченко, ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь,
Maryliss.lab@gmail.com, milchanin@bsu.by

²⁾НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ, Москва 119991, Россия

Композитные материалы на основе эпоксидной смолы с добавлением наноматериалов подвергались воздействию кислородной плазмы. Таким образом, получена модель нахождения объекта, покрытого слоем защиты от ЭМИ излучений в околоземном космическом пространстве. Результаты могут быть использованы для улучшения антибликовых поглощающих покрытий спутников и электроники, используемой на космических аппаратах, так и наземных применений.

Эффективный поток кислорода воздействовавшей на образцы соответствует $3 \cdot 10^{21}$ атом(ион)/см² – что равняется 10 годам эксплуатации космического аппарата в околоземном космическом пространстве. Ускоренные испытания позволяют работать с экспериментальными образцами экономя затраты времени и средств при разработке покрытий.

Ключевые слова: эпоксидная смола; графен; углеродные нанотрубки; кислородная плазма.

ATOMIC OXYGEN IRRADIATION OF POLYMER COMPOSITES BASED ON CARBON NANOSTRUCTURES FOR CREATING ANTI-REFLECTIVE COATINGS

Mary Jhukava¹⁾, O.V. Milchanin¹⁾, L.S. Novikov²⁾, V.N. Chernik²⁾

¹⁾Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarussian State University,
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus,
Maryliss.lab@gmail.com, milchanin@bsu.by

²⁾Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

Composite materials based on epoxy resin with the addition of nanomaterials were exposed to oxygen plasma. Thus, a model of finding an object coated with an EMI shielding layer in the near-Earth space was obtained. The results can be used to improve anti-reflective coatings on satellites and electronics used on spacecraft, as well as for ground-based applications.

The effective oxygen flux on the samples corresponds to $3 \cdot 10^{21}$ atom(ion)/cm² - equivalent to 10 years of spacecraft operation in near-Earth space. The accelerated tests enable experimental specimens to be handled in a time- and cost-efficient way when developing coatings.

Keywords: epoxy; graphene; carbon nanotubes; oxygen plasma.

Введение

С развитие программ долговременных орбитальных космических полетов все большее внимание уделяется проблеме стойкости наружных поверхностей космических аппаратов к воздействию факторов космического пространства. Особое место занимают полеты на низких околоземных орбитах (200-600 км), на которых функционирует МКС и многие другие

космические аппараты. На этих высотах наибольшие повреждения многих функциональных материалов связаны с набегающим потоком атомарного кислорода (АК) [1]. Как показали результаты предыдущих исследований, низкую стойкость к воздействию кислородной плазмы проявляют полимерные и углеродсодержащие материалы. Под действием АК ухудшаются многие функциональные характери-

ки материалов, такие, как коэффициенты отражения солнечного излучения, коэффициенты черноты, коэффициенты отражения микроволнового излучения и электропроводности. Для исследования стойкости подобных материалов проводят наземные лабораторные ускоренные испытания в потоках кислородной плазмы [2].

Методика эксперимента

В данной работе представлены результаты экспериментальных образцов для ИК области. Измерения проводились в промежутке 2,5 – 25 мкм на установке Фурье-спектрофотометра с использованием приставки отражения.

Изготовлены образцы композитных материалов на основе эпоксидной полимерной матрицы ЭД-20 с добавлением графена и многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) серии «Таунит-М» и «Таунит-МД» производства компании ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов, Россия) (рис. 1). Концентрация наполнителя составляла 1 вес. %.



Рис. 1. Композитные материалы до и после облучения кислородной плазмой

Облучение в кислородной плазме происходило с использованием разработанного в лаборатории Элионики прямопоточного источника ионов, предназначенного для получения интенсивного пучка ионов с постоянной геометрией. Работоспособность источника сохраняется в диапазоне давлений атмосферного воздуха от 1 до 6 10^{-5} Па, что согласно соответствует слою ионосферы от 80 до 210 км. Диапазон давлений был ограничен возможностями конвенциональной вакуумной системы, однако во всей области ударной ионизации зависимость тока от давления была близка к линейной.

Компонентами пучка являются атомы, молекулы и ионы кислорода с преобладанием атомарных ионов. Энергия ионов в потоке преимущественно заключена в диапазоне 20 – 40 эВ.

Результаты и их обсуждение

В результате облучения внешний вид поверхности композитов сильно изменяется, особенно для образцов с наполнителями. Изначально образцы имеют неоднородную шершавую поверхность, но после обработки, как видно на рисунке 1, облученная поверхность как чистой эпоксидной смолы, так и образцов с наполнителями становится более темной и матовой, и их характеристики поглощения значительно улучшаются (рис. 2) [3].

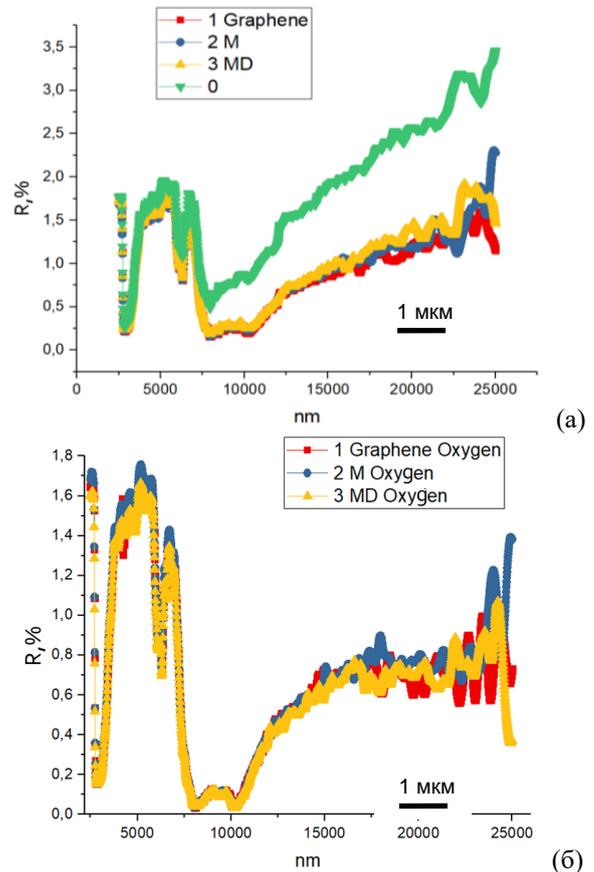


Рис. 2. Измерения спектра в ИК области – 2,5 – 25 мкм: а – исходные образцы; б – образцы после обработки кислородной плазмой

Коэффициент зеркального отражения становится значительно меньше во всей области исследования по сравнению с исходными образцами. Также можно заме-

тить, что кривые до и после обработки кислородной плазмой остаются идентичными по своей форме.

Следует отметить, что облученная поверхность образцов с наполнителями характеризуется равномерным «бархатистым» рельефом. Снимки сканирующей электронной микроскопии представлены на рисунке 3. В случае образцов с углеродными нанотрубками возможен эффект их «распушения» - массив УНТ веерообразно раскрывается на концах из-за частично разрушенных трубок, что может наблюдаться на снимках (рис. 3, справа) [4]. Плазменная обработка приводит к растравливанию верхнего слоя полимера и формированию развитого эрозионного микрорельефа, ориентированного навстречу потоку кислородной плазмы.

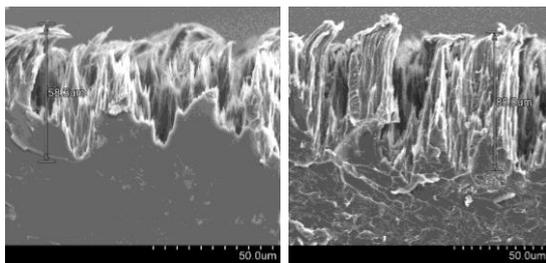


Рис. 3. СЭМ-изображения образцов № 1 - слева и № 2 - справа после обработки в кислородной плазме

В данном случае мы имеем очень нестабильное состояние образцов после обработки кислородной плазмой. Разрушенные и «распушенные» нанотрубки на поверхности осыпаются вне зависимости от внешних воздействий. Над образцами не проводилось никаких манипуляций, они хранились в индивидуальных герметичных упаковках, без воздействия света и температуры. При этом со временем поверхность начала деградировать и иметь «полинивший вид». Повторные измерения показали, что значительных изменений не произошло и их характеристики отражения стабильны.

Облучение в кислородной плазме с флюенсом $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ приводит к

уменьшению зеркального отражения чистой эпоксидной смолы и для образцов с наполнителями графен, «Таунит М», «Таунит МД» соответственно. Анализ полученных данных показывает, что введение углеродных наполнителей в композит на основе эпоксидной смолы приводит к снижению коэффициента зеркального отражения примерно в 2 раза.

Заключение

Таким образом, введение в эпоксидную смолу углеродных наполнителей с последующим облучением в кислородной плазме с флюенсом $30 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ приводит к уменьшению коэффициентов отражения более чем на порядок. Эффект регистрируется для всех образцов с наполнителями: коэффициент зеркального отражения уменьшается в 2 раза во всей исследуемой области, по сравнению с необлученной эпоксидной смолой без наполнителя. Показатели говорят о перспективности применения данных композитных материалов в качестве антибликовых поглощающих покрытий в оптических и оптоэлектронных системах как космических аппаратов, так и наземных применений.

Библиографические ссылки

1. Jiang H., Li T., Chai L., Liu X., Zhai R., Zhao X. *Protection Mater. Struct. Space Environ.* 2017: 303.
2. 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; (3): 71.
3. Парфимович И.Д., Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н., Новиков Л.С., Черник В.Н., Жигулин Д.В. Воздействие потоков кислородной плазмы на полимерные нанокомпозиты с углеродными наполнителями. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* 2023; (1): 31-36.
4. Kosynkin D.V., Higginbotham A.L., Sinitskii A., Lomeda J.R., Dimiev A., Price B.K., Tour J.M. Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons. *Nature* 2009; 458: 872–77.