

спектроскопии природных объектов можно сделать следующие выводы:

1. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия является преимущественным методом прямого малодеструктивного анализа металлов и сплавов. Несмотря на то, что данный метод можно использовать для анализа неметаллических матриц, следует отметить, что спектры, получаемые в таких условиях, обладают меньшей интенсивностью по сравнению с чистыми металлами. Это связано с различиями в физических и химических свойствах материалов, влияющих на эффективность ионизации и испускание света. Также хорошо применим для поскольку позволяет проводить измерения в конкретной точке поверхности в атмосфере воздуха без предварительной химической и механической подготовки поверхности.

2. Были определены оптимальные параметры лазерного двухимпульсного лазерного атомно-эмиссионного анализа неметаллических матриц (8 мкс).

3. Переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции образцов почв приводит к увеличению относительной интенсивности спектральных линий металлических примесей в 5–7 раз, что на порядок ниже, чем при абляции образцов чистых металлов.

4. Визуально отличающиеся цветные области в фрагментах загрязненных почв имеют разную концентрацию примесей: железа, олова и меди.

Литература

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.

УДК 535.312:535.016

АНТИБЛИКОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Жукова М. Н., Парфимович И. Д., Комаров Ф. Ф., Филиппович В. Ю.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано воздействие низкоэнергетической кислородной плазмы на композиционный материал на основе эпоксидного полимера, наполненного многостенными углеродными нанотрубками, используемого в качестве антибликового. В полете космические аппараты, функционирующие в околоземном космическом пространстве, подвергаются воздействию множества факторов космического пространства: потоков высокоэнергетических электронов и ионов, кислородной плазмы, солнечного излучения, метеорных частиц. В результате такого воздействия возникают различные физико-химические процессы в материалах и элементах оборудования, что приводит к ухудшению их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, композиционные материалы, эпоксидный полимер, кислородная плазма, антибликовые покрытия.

ANTI-REFLECTIVE COMPOSITE COATINGS FOR PROTECTION OF OPTICAL AND OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF SPACECRAFTS

Zhukava M., Parfimovich I., Komarov F., Filippovich V.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The effect of low-energy oxygen plasma on a composite material based on epoxy polymer filled with multi-walled carbon nanotubes used as an anti-reflective material has been studied. In flight, spacecraft operating in near-Earth space are exposed to a variety of space factors: flows of high-energy electrons and ions, oxygen plasma, solar radiation, and meteor particles. As a result of such impact, various physical and chemical processes occur in materials and equipment elements, which leads to deterioration of their operational characteristics.

Key words: carbon nanotubes, composite materials, epoxy polymer, oxygen plasma, anti-reflective coatings.

Адрес для переписки: Жукова М. Н., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: maryliss.lab@gmail.com

Методика эксперимента. В настоящей работе рассмотрен метод структурирования поверхности материала для создания антиотражающих покрытий посредством использования кислородной плазмы.

Использование многостенных углеродных нанотрубок (УНТ) обусловлено эффективными поглощающими свойствами углеродных нано-

структур и возможностью формировать в полимере объемные поглощающие структуры [1], а также невысокой стоимостью относительно стоимости одностенных УНТ.

Композитный материал формировался на основе полимерной безусадочной эпоксидной смолы торговой марки ЭД-20. В качестве наполнителя использовались углеродные нанотрубки

производства ООО «Наноцентр» (г. Тамбов) с торговым названием «Таунит-М» [2]. Характеристики МУНТ серии «Таунит-М»: внешний диаметр 10–30 нм, внутренний диаметр 5–15 нм, длина более 2 мкм, удельная геометрическая поверхность более 160 м²/г, насыпная плотность 0,025–0,06 г/см³, термостабильность до 600 °С

Облучение атомарным кислородом полимера и композита происходило с помощью плазменно-пучковой установки со следующими параметрами: средняя энергия ионов 20–40 эВ; эффективный флюенс по каптоновому эквиваленту для образцов: $(1,7–30) \cdot 10^{20}$ ат/см² [3]. Для измерения коэффициентов зеркального и диффузного отражения в диапазоне от 0,2 до 2,5 мкм использовался двухлучевой сканирующий спектрофотометр Lambda 1050.

Результаты и обсуждения. Эпоксидная смола была наполнена многостенными углеродными нанотрубками марки «Таунит-М», диаметр которых составляет около 10–20 нм, а длина ≥ 2 мкм. Добавление наполнителей из УНТ приводит к матовой поверхности образцов, увеличению поглощения в видимом и ИК-диапазонах спектра (рисунки 1 и 2). Для оценки устойчивости нанокompозитов к воздействию атомарного кислорода были исследованы морфология поверхности, оптические свойства и структура образцов после обработки в кислородной плазме (КП). Воздействие КП приводит к потере массы и формированию «ковроподобного» рельефа поверхности (рисунок 3). Также приводит к уменьшению диффузного и зеркального отражения и соответствующему увеличению поглощения полимеров, наполненных УНТ. Этот эффект отчетливо проявляется на образцах с различной концентрацией наполнителя «Таунит-М».

Приведенные данные на рисунках 1 и 2 свидетельствуют о том, что формирование развитого эрозионного рельефа приводит к заметному снижению отражательной способности композита с углеродными наполнителями в спектральной области 0,2–2,5 мкм. Низкие коэффициенты диффузного (< 1 %) и зеркального (< 0,02 %) в диапазоне 0,2–2,5 мкм отражения характерны для облученного полимера с наполнителем «Таунит-М».

Исходя из результатов исследования следует, что путем воздействия на полимерные образцы, модифицированные наноразмерными углеродными добавками, плазменными потоками атомарного кислорода на поверхности композитов формируется развитый пространственно-ориентированный микрорельеф (рисунок 3).

Добавление УНТ в полимерную матрицу приводит уменьшению отражения падающего излучения и к сильному структурированию приповерхностной области композита при воздействии потока атомарного кислорода с флюенсом $30 \cdot 10^{20}$ ат·см⁻².

В заключении отметим, что обработка в кислородной плазме приводит к заметному снижению отражательной способности композитов с уг-

леродными наполнителями. Диффузное отражение облученных композитов с наполнителями УНТ в области 0,2–2,5 мкм не превышает 1 %. Соответствующие коэффициенты зеркального отражения меньше 0,02 %.

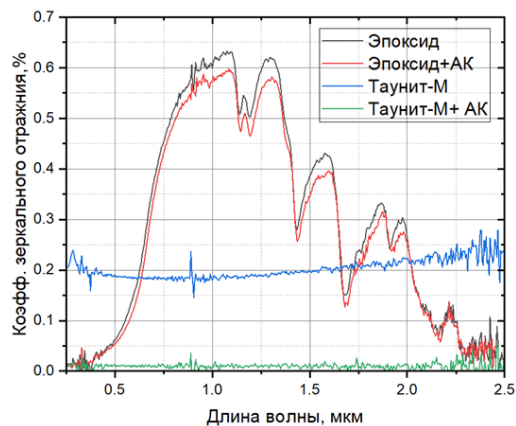


Рисунок 1 – Спектры зеркального отражения эпоксидной смолы и композита до и после облучения атомарным кислородом (АК) в диапазоне (0,2–2,5 мкм)

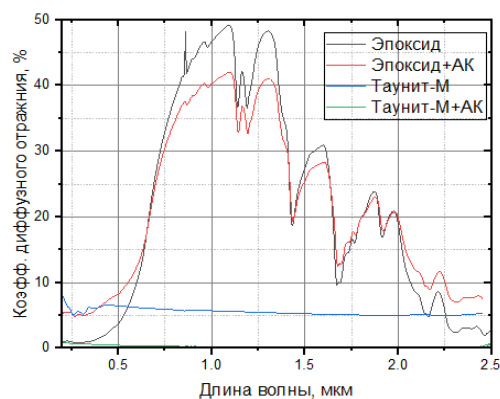


Рисунок 2 – Спектры диффузного отражения эпоксидной смолы и композита до и после облучения атомарным кислородом (АК) в диапазоне (0,2–2,5 мкм)

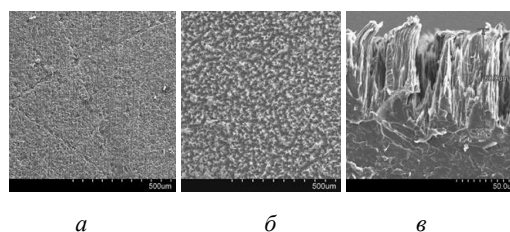


Рисунок 3 – СЭМ-изображения поверхности образца: а – исходная поверхность; б – поверхность после обработки в плазме; в – поперечное сечение образца

Приведенные результаты говорят о перспективности применения данных композитных материалов в качестве антиотражающих поглощающих покрытий в оптических и оптоэлектронных системах как космических аппаратов, так и для наземных применений.