

СТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ КОСМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Л.С. Новиков¹, Е.Н. Воронина¹, В.А. Демидов¹, М.С. Самохина¹, В.Н. Черник¹, Н.П. Чирская¹, А.Ю. Алентьев², К.Б. Вернигоров², Г.Г. Бондаренко³, А.И. Гайдар³, А.А. Ерискин³

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ

Ленинские Горы, д.1, стр. 2, 119991, Москва, e-mail: novikov@sinp.msu.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, химический факультет

Ленинские Горы, д.1, стр. 1, 119991, Москва, e-mail: konstantin.verni@mail.ru

³Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет), Б. Трехсвятительский пер., д. 3/12, 109028, Москва, e-mail: bondarenko_gg@rambler.ru

В работе экспериментальными и расчетно-теоретическими методами исследована стойкость полимерных наноконкомпозитов, рассматриваемых в настоящее время в качестве перспективных материалов космической техники, к воздействию потока атомарного кислорода и частиц космической радиации. Показано, что уровень стойкости наноконкомпозитов достаточен для применения их в составе конструкции космических аппаратов и систем радиационной защиты.

Введение

Полимерные наноконкомпозиты относят к числу перспективных материалов для применения в космической технике. Возможность создания легких полимерных наноконкомпозитов, обладающих высокой прочностью и термостойкостью, а также необходимыми электрическими, оптическими и другими характеристиками, делает их пригодными для применения в качестве как конструкционных, так и функциональных материалов космических аппаратов (КА) [1]. Одним из главных требований, предъявляемых к материалам КА, является сохранение ими исходных параметров при длительной эксплуатации в условиях космического пространства.

В полете КА подвергается воздействию обширного комплекса факторов космического пространства: потоков электронов и ионов высокой энергии, плазмы, солнечного электромагнитного излучения, метеорных частиц и т. д. В результате такого воздействия в материалах и элементах оборудования КА протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров [2].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований воздействия на полимерные наноконкомпозиты потока атомарного кислорода (АК), являющегося основным повреждающим фактором для материалов поверхности низкоорбитальных КА, и заряженных частиц высокой энергии, входящих в состав космического излучения.

Воздействие атомарного кислорода на полимерные наноконкомпозиты

Атомарный кислород является основным компонентом верхней атмосферы Земли в интервале высот ~ 200 – 800 км, где осуществляются, в частности, пилотируемые полеты на орбитальных станциях (350–400 км) и космических кораблях, а также функционируют многие КА прикладного назначения. Температура верхней атмосферы на указанных высотах близка к 10^3 К, ей соответствует средняя энергия теплового движения частиц ~ 0,1 эВ. Однако по отношению к КА, движущемуся со скоростью около $8 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$, кинетическая

энергия атомов набегающего потока кислорода составляет около 5 эВ. Высокая окислительная способность АК, усиленная указанной дополнительной энергией, является причиной его интенсивного разрушающего воздействия на полимерные материалы, находящиеся на внешней поверхности КА. Для них уменьшение толщины слоя после года эксплуатации в указанных условиях может достигать нескольких десятков и даже сотен микрон [3]. В этой связи уделяется большое внимание повышению стойкости полимеров, что может достигаться путем введения в приповерхностные слои наноразмерных частиц, и созданию специальных полимерных наноконкомпозитов, устойчивых к воздействию АК и других факторов космического пространства.

В настоящей работе проводилось экспериментальное исследование стойкости некоторых полимерных наноконкомпозитов к воздействию потока АК, который создавался магнитоплазменным ускорителем, разработанным в НИИЯФ МГУ [3]. Схема ускорителя показана на рис. 1.

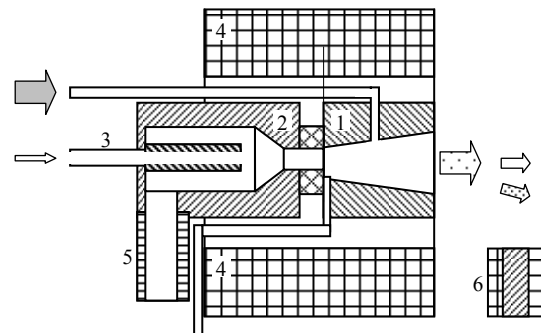


Рис. 1. Схема ускорителя кислородной плазмы НИИЯФ МГУ: 1 – анод; 2 – ферромагнитный промежуточный электрод; 3 – полая термокатод; 4 – соленоид; 5 – патрубок дополнительной вакуумной откачки; 6 – отклоняющий электромагнит

Кислородная плазма, образующаяся в разрядном промежутке, ускоряется при истечении в вакуум электрическим полем, возникающим в расходящемся магнитном поле соленоида. Средняя энергия ионов в потоке регулируется в диапазоне 20–80 эВ путем изменения режимов

электрического и газового питания. При этом плотность потока ионов и нейтральных частиц кислорода на поверхности образца площадью 10 см^2 составляет $(1-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для формирования нейтрального пучка атомов и молекул кислорода ионы выводятся из потока плазмы вдоль силовых линий магнитного поля соленоида, искривленных отклоняющим электромагнитом 6. Энергия нейтральных частиц уменьшается до 5–10 эВ при плотности потока $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В настоящей работе было выполнено исследование возможностей повышения таким методом стойкости полиимидных пленок к воздействию АК. Для модификации полимеров использовались частицы сверхразветвленного полиэтоксисилоксана, представляющих собой ядро из частиц SiO_2 с присоединенными к нему группами $(-\text{OC}_2\text{H}_5)$, а также наночастицы некоторых оксидов и карбидов [4].

Результаты выполненных исследований показали, что при изготовлении модифицированных образцов полимерной пленки во многих случаях наблюдается эффект объединения наночастиц в округлые конгломераты диаметром $\sim 0,1-5 \text{ мкм}$, которые отчетливо видны после травления пленки потоком АК, что наглядно демонстрируется рис. 2 и рис. 3.

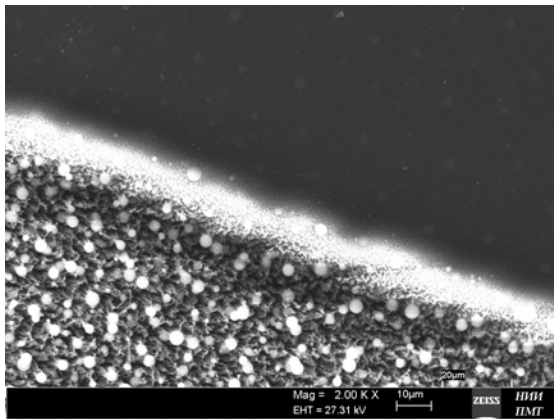


Рис. 2. Образец полиимидной пленки: слева внизу – после воздействия потока АК; справа сверху – поверхность, закрытая от воздействия АК

На рис. 3 хорошо видно, что образующиеся округлые микрочастицы защищают области полимера, находящиеся под ними, от растравливания АК. На основании полученных экспериментальных данных было найдено, что в результате такой модификации потери массы полимеров при воздействии АК снижаются в 3–4 раза при содержании частиц модификатора в образце около 5–6 вес. %.

Для обеспечения более высоких уровней защиты полимеров необходимо стремиться к равномерному распределению вводимых частиц наполнителя в полимерной матрице. Процесс диспергирования («растворимости») наночастиц в полимере определяется соотношением интенсивностей взаимодействия наночастицами между собой и наночастиц с полимерной матрицей. Например, если взаимодействие между наночасти-

цами доминирует, они стремятся объединяться в конгломераты и равномерного распределения их по объему полимера достигнуть не удастся.

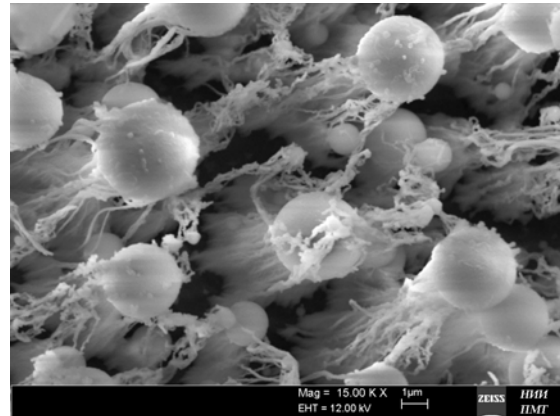


Рис. 3. Структура модифицированного полиимида после воздействия потока АК

Методом диссипативной динамики частиц (dissipative particle dynamics, DPD), в рамках которого фрагменты молекул, сами молекулы или группы молекул объединяются в так называемые «бусинки» (beads), взаимодействующие друг с другом [5], в настоящей работе было выполнено математическое моделирование распределения наночастиц наполнителя в полимерной матрице. Результаты моделирования показывают, что при определенных параметрах взаимодействия наночастицы объединяются в сферические конгломераты (рис. 4), подобные показанным на рис. 3.

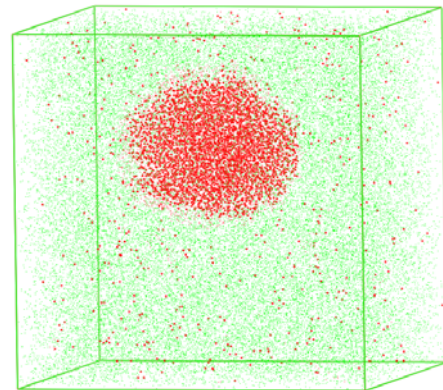


Рис. 4. Формирование в полимерной матрице сферического образования из наночастиц

Радиационные эффекты в наноструктурах

К важнейшим факторам, вызывающим ухудшение эксплуатационных характеристик материалов и элементов оборудования КА, относятся также воздействие на них потоков электронов и ионов с энергиями $\sim 10^9-10^{20}$ эВ, которые принято называть космическим ионизирующим излучением, или космической радиацией.

Радиационные эффекты, возникающие под действием ионизирующего излучения в наноструктурах и созданных на их основе материалах, имеют ряд особенностей по сравнению с анало-

гичными эффектами в объектах, размеры которых лежат в микро- и макродиапазонах.

Очевидно, что при взаимодействии электрона или иона высокой энергии, характерной для космического излучения, с наноструктурой ей передается лишь очень незначительная энергия налетающей частицы. Следовательно, в наноразмерном объекте возникает малое количество дополнительных носителей заряда или структурных дефектов.

В наноматериалах, для которых характерно наличие большего количества поверхностей раздела, действует эффективный механизм стока смещенных атомов на эти поверхности, препятствующий накоплению радиационных дефектов в объеме зерен. Вместе с тем сохраняется возможность выхода смещенных атомов на поверхность образца по границам зерен.

В настоящее время при создании наноконструктивов в качестве наполнителей широко применяются углеродные нанотрубки (УНТ) и нанотрубки из нитрида бора BN (BN-НТ). Характерные радиационные эффекты, протекающие в стенках УНТ при облучении ее пучком электронов показаны на рис. 5 [6].

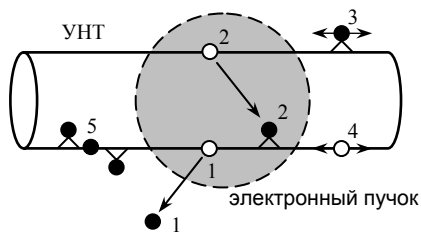


Рис. 5. Схема процессов, инициируемых воздействием электронного пучка на УНТ: 1 – образование вакансии в стенке УНТ в результате удаления атома углерода; 2 – образование вакансии с адсорбцией выбитого атома на внутренней поверхности УНТ; 3 – миграция адсорбированных атомов; 4 – миграция вакансий; 5 – перемещение адсорбированных атомов между поверхностями УНТ через обменный процесс

В данной работе было выполнено математическое моделирование процессов взаимодействия протонов, характерных для космического излучения, с УНТ. Использовался метод DFTB (density functional tight-binding), представляющий собой расширение метода теории функционала плотности (density functional theory, DFT) для возбужденных состояний, называемый также методом DFT в схеме сильной связи [7]. На рис. 6 приведен пример результатов моделирования: образование вакансий и адсорбированных атомов.

Предполагается, что на основе наноконструктивов удастся создать высокоэффективные системы радиационной защиты КА. В этой связи большой интерес представляют полимерные наноконструктивы с наполнителями в виде BN-НТ и частиц V_4C_3 , поскольку они содержат элементы с малыми значениями заряда ядра Z .

На рис. 7 приведены результаты расчета с помощью программного комплекса GEANT3 [8] ослабления различными материалами потока энергии P , переносимого падающими на исследуемый образец материала протонами с энергией

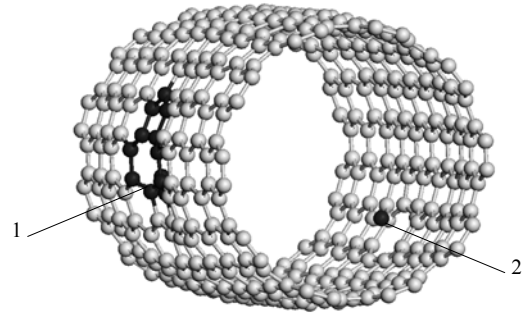


Рис. 6. Вакансия (1) и адсорбированный атом (2), образовавшиеся в результате воздействия протона

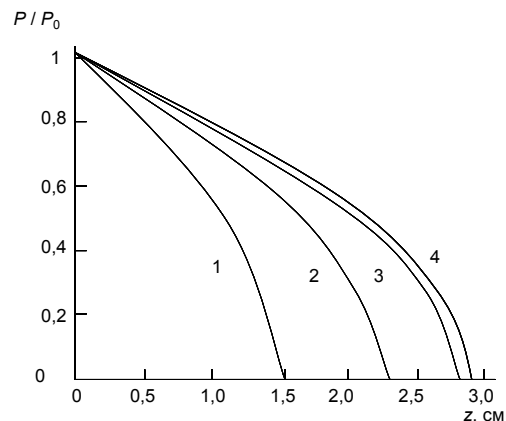


Рис. 7. Эффективность радиационной защиты в зависимости от толщины экрана: 1 – алюминий; 2 – полиэтилен с добавлением 10% объемн. V_4C_3 ; 3 – полиэтилен с добавлением 10% объемн. BN; 4 – полиэтилен

60 МэВ. Наноконструктивы с наполнителями V_4C_3 и BN позволяют создать защитные экраны, дающие выигрыш по весовым характеристикам.

Заключение

Результаты выполненной работы показывают, что полимерные наноконструктивы по своим свойствам превосходят многие традиционные материалы космической техники. Их стойкость к воздействию атомарного кислорода в несколько раз выше по сравнению с полимерами. Равномерность распределения частиц наполнителя в матрице может нарушаться за счет обнаруженных экспериментально и исследованных расчетно-теоретическими методами процессов образования конгломератов из наноразмерных частиц. Полимерные наноконструктивы могут обладать высокой радиационной стойкостью и использоваться в системах радиационной защиты космических аппаратов.

Список литературы

- Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. – М.: Университетская книга, 2008. – 188 с.
- Новиков Л.С. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2010. – 4. – С. 25.

3. Новиков Л.С., Черник В.Н. Применение плазменных ускорителей в космическом материаловедении. – М.: Университетская книга, 2008. –90 с.
 4. Вернигоров К.Б., Алентьев А.Ю., Музафаров А.М., Новиков Л.С., Черник В.Н. // Функциональные наноматериалы для космической техники. Труды 1-й Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. – М., 2010. – С.90.

5. Espanol P., et al. // Europhys. Lett. -1995. – 30. -P. 191.
 6. Krashennnikov A.V., Nordlund K. // Journal of Applied Physics. -2010. - 107. 071301.
 7. Frauenheim Th., et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. -2002. - 14. - P. 3015.
 8. GEANT – Detector Description and Simulation Tool. Geneva, CERN, 1993. - 465 p.

SPACE RADIATION RESISTANCE OF POLYMER NANOCOMPOSITES

L.S. Novikov¹), E.N. Voronina¹), V.A. Demidov¹), M.S. Samokhina¹), V.N. Chernik¹), N.P. Chirskaya¹)
 A.Yu. Alentiev²), K.B. Vernigorov²), G.G. Bondarenko³), A.I. Gaidar³), A.A. Yeriskin³)

¹Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (MSU SINP)
 1(2), Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: novikov@sinp.msu.ru

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry 1(1), Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: konstantin_umni@mail.ru

³Moscow Institute of Electronics and Mathematics (Technical University) 3/12, B. Trekhsviatitelskii, Moscow, 109028, Russian Federation, e-mail: bondarenko_gg@rambler.ru

Polymeric nanocomposites are referred to advanced materials for applications in the space technology. Ability to create lightweight polymeric nanocomposites with high strength and thermal resistance, as well as the required electrical, optical and other characteristics, is making them suitable to be used as constructional and functional materials of the spacecraft. One of the main requirements, imposed on the spacecraft materials, is the retention of the initial parameters during the long-term operation in the space.

At the time of a space mission, the spacecraft is exposed to the space environment. As a result, various physical and chemical processes that lead to a degradation of spacecraft operating parameters occur in the materials and components of the spacecraft equipment. At the altitude ranges from 200 to 800 km, where, in particular, the manned missions on the orbital space stations (350-400 km) and space vehicles are realized, and also many application-oriented spacecraft are located, the most important damaging factor for the outer surface of the spacecraft materials is atomic oxygen, which presents in the Earth's upper atmosphere. Fluxes of electrons and ions with energies between 10^6 and 10^{20} eV are usually called the cosmic ionizing radiation, or the space radiation. This radiation fluxes represent a significant danger to the high-altitude orbit spacecraft and interplanetary spacecraft.

This paper describes the results of experimental and theoretical studies of the effects of the mentioned factors to the polymeric nanocomposites with different fillers.

It is shown that the resistance of polymeric nanocomposites to the effects of atomic oxygen is several times higher compared to polymers. The processes of dispersion of nanoscale fillers in the matrix, which influence on the structure of the nanocomposite and its properties, are studied with experimental and theoretical methods. Based on the results of mathematical modeling of ionizing radiation flux attenuation in the polymer nanocomposites with fillers from nanotubes of boron nitride and boron carbide particles the conclusion about possibilities of application of such nanocomposites for radiation protection systems of advanced spacecraft is made.