

УДК 669-1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ КОРПУСКУЛЯРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Турова А.А., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: yrndo@mail.ru

В статье рассмотрено понятие космическое излучение. Описаны основные виды ионизирующего излучения в космосе, а также методы и материалы для защиты от них. Определены виды излучений, входящих в понятие корпускулярное излучение. Рассмотрена возможность использования оксида висмута для синтеза радиационно-защитных материалов используемых в условиях космоса. В качестве полимерной матрицы в работе был использован фторопласт-4. В качестве наполнителя использован оксид висмута (III) (модификация $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$). Изучена плотность композита с различным содержанием наполнителя. Установлено, что плотность композита линейно увеличивается при увеличении содержания наполнителя. Построена кривая значений модуля упругости композита от содержания наполнителя и на основании этой зависимости выбран оптимальный состав композита. Выбран оптимальный состав материала, который содержит в себе 50% наполнителя – оксида висмута и 50% матрицы – фторопласта. В качестве корпускулярного излучения в работе рассматривали облучение протонами. Энергия протонов варьировалась от 1 до 4,2 МэВ. Глубина проникновения протонов в композит во всем рассматриваемом энергетическом диапазоне не превышает 0,2 мм, что говорит о высоких радиационно-защитных свойствах разработанного композита.

Ключевые слова: композит, протонное излучение, радиационная защита, наполнитель, фторопластовая матрица, корпускулярное излучение

USE OF HEAVY METALS IN THE DEVELOPMENT OF MATERIALS FOR PROTECTION CORPUSCULAR RADIATION

Turova A.A., Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: yrndo@mail.ru

The article deals with the concept of cosmic radiation. The basic types of ionizing radiation in space, as well as the methods and materials to protect against them. The kinds of radiation included in the concept of corpuscular radiation. The possibility of using bismuth oxide for the synthesis of radiation-shielding materials used in space. The polymer matrix was used in the fluoroplastic-4. The filler used bismuth oxide (III) (a modification of $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$). Studied the density of the composite with different filler content. It is found that the density of the composite increases linearly with increasing filler content. The curve of values of the elastic modulus of the composite by the filler content and based on this the optimal composition is selected depending on the composite. The optimum material composition, which contains 50% filler – bismuth oxide and 50% matrix – fluoroplastic. As corpuscular radiation in the considered proton irradiation. The proton energy was varied from 1 to 4.2 MeV. The penetration depth of the protons in the composite throughout the considered energy range does not exceed 0.2 mm, indicating a high radiation-protective properties of the developed composite.

Keywords: composite proton radiation, radiation protection, filler, PTFE matrix, corpuscular radiation

Космическое излучение оказывает огромное воздействие на космонавтов и на оборудование космических аппаратов. В космосе действуют различные виды излучения, от которых необходима защита. Такой защитой могут стать материалы, которые либо полностью поглощают ионизирующее излучение, либо значительно снижают их интенсивность [1, 2, 5, 9, 11].

Одним из видов космического излучения является вакуумный ультрафиолет (ВУФ). Он отличается от обычного ультрафиолета тем, что его длина волны очень мала от 10 до 200 нм. Также он интенсивно поглощается атмосферой, и распространяется только в вакуумированных камерах. Воздействию ВУФ почти не подвержены металлы, однако на полимеры он оказывает огромное негативное воздействие. Вследствие воздействия ВУФ на полимеры происходит

фотохимические реакции на их поверхности, что разрушает поверхность материала и приводит к потере первоначальных свойств [3, 4, 26]. Для защиты от вакуумного ультрафиолета в полимеры вводят фотостойкие наполнители, получая тем самым полимерные композиты [16-18].

Корпускулярное ионизирующее излучение в космосе представлено альфа-излучением, электронным, протонным и нейтронным излучением. Для защиты от электронов в космосе применяют металлы с малой атомной массой, так как металлы с большой атомной массой создают тормозное гамма излучение. Используя программный комплекс Geant4, было смоделировано воздействие электронов на элементы с разной атомной массой [19]. Доказано, что легкие металлы и полимеры почти не подвержены образованию тормозного гамма-излу-

чения по сравнению с металлами большой атомной массой [10, 14, 15, 28]. Поэтому перспективно направление по созданию полимерных композитов для защиты от электронного излучения в космосе.

Для защиты от нейтронного излучения лучше использовать материалы содержащие элементы с малой атомной массой, например водород, бор и др. Доказано, что введение гидридов металлов в композиты значительно повышает стойкость материалов для защиты от нейтронного излучения [6-8, 24, 27, 30].

Кроме ионизирующего излучения в космосе действуют и другие негативные факторы, которые дестабилизируют работу всего космического аппарата. Резкий перепад температуры от -150°C до $+150^{\circ}\text{C}$, набегающий поток атомарных и молекулярных частиц – все это также нарушает функциональные свойства материалов. Самой распространенной частицей в космосе является атомарный кислород (около 90%). Больше всего атомарный кислород оказывает негативное воздействие на полимеры: происходит унос материала с поверхности, причем в год до нескольких сотен мкм [12]. Для защиты полимеров от атомарного кислорода в космосе в них добавляют кремнийсодержащие структуры, которые создают прочную пленку на поверхности, тем самым защищая дальнейшую деградацию материала [20, 29].

Существуют различные приемы для синтеза радиационно-защитных и радиационно-стойких композитов [13, 21-23, 25, 31-32]. В данной работе рассмотрена возможность использования висмута и его оксидов для синтеза радиационно-защитных материалов, для использования в условиях космоса.

Цель исследования

Изучить влияние содержания оксида висмута на повышение радиационно-защитных свойств полимерного композита с целью создания новых материалов для космической отрасли.

Материал и методы исследования

В качестве полимерной матрицы в работе был использован фторопласт-4 (политет-рафторэтилен) ГОСТ 10007-80. Средняя плотность фторопласта 2200 кг/м^3 ; предел прочности при сжатии 12 МПа, коэффициент теплопроводности: $0,25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;

В качестве наполнителя использован оксид висмута (III) (модификация $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$). Данный оксид висмута является полупроводником р-типа при температурах до $550\text{-}650^{\circ}\text{C}$ с плотностью 8900 кг/м^3 . В отличие от свинца и его соединений, оксид висмута не токсичен. Также атомы висмута обладают малым эффективным радиусом захвата тепловых нейтронов, за счет чего не поглощают их, и материал не приобретает радиоактивные свойства.

В качестве корпускулярного излучения в работе рассматривали облучение протонами. Источником протонов являлся циклотрон в НИИЯФ МГУ (г. Москва). Энергия пучка протонов в испытаниях составляла до 4,2 МэВ, температура поверхности образцов при этом не превышала 20°C , а флюенс составлял $-4 \cdot 10^{14} \text{ протон/см}^2$.

Результаты исследования и их обсуждение

Авторами разработаны составы полимерных композитов, содержащие от 50 до 80% наполнителя по массе. Плотность композитов с различным содержанием наполнителя представлена в табл. 1.

Таблица 1

Плотность композитов с различным содержанием наполнителя

№ Состав	Содержание наполнителя, % по массе	Плотность композита, кг/м^3
1	50	3400
2	60	4050
3	70	4440
4	80	4750

Анализ таблицы показывает, что плотность композита линейно увеличивается при увеличении содержания наполнителя, так как наполнитель имеет значительно большую плотность (8900 кг/м^3) по сравнению с фторопластовой матрицей (2200 кг/м^3). При создании радиационно-защитных композитов увеличение плотности упаковки ведет к повышению защитных характеристик готовых изделий.

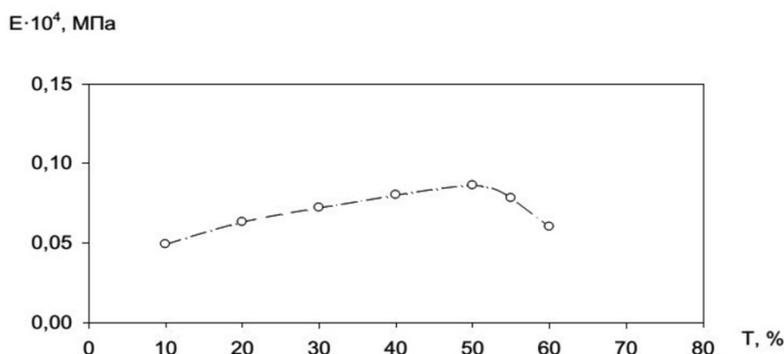
Оптимальный состав композита выбирали на основании значений модуля упругости. Модуль продольной упругости композитов рассчитывали по скорости распространения ультразвука в исследуемом материале по следующей формуле:

$$E = V_{зв}^2 \cdot \rho \quad (1)$$

где ρ – плотность, E – модуль продольной упругости (модуль Юнга), $V_{зв}$ – скорость звука при прохождении через материал.

На рисунке представлена зависимость модуля продольной упругости от содержания наполнителя в композите.

Как видно из рисунка вначале при увеличении содержания наполнителя в композите происходит увеличение модуля продольной упругости, затем оно достигает своего пика и резко начинает снижаться. Наличие пика говорит о максимально возможном наполнении композита, после которого прочность и все остальные физико-механические характеристики сильно падают. Таким образом, оптимальным является состав материала, который содержит в себе 50% наполнителя – оксида висмута и 50% матрицы – фторопласта.



Кривая зависимости модуля продольной упругости от содержания наполнителя в композите

Для исследования защитных свойств разработанного материала он был подвергнут протонному облучению. Были вырезаны образцы оптимального состава с площадью поверхности 1 см² и толщиной 2 мм. Их устанавливали на пути протонного пучка, перпендикулярно падающего на плоскую поверхность композита. Энергия протонов варьировалась от 1 до 4,2 МэВ. В табл. 2 представлены данные по глубине проникновения протонов в композите в зависимости от энергии протонного излучения.

Таблица 2
Глубина проникновения протонов в композите

№ п/п	Энергия протонов, МэВ	Глубина проникновения, мм
1	1	0,02
2	2	0,06
3	3	0,11
4	4	0,18
5	4,2	0,19

В исследуемом энергетическом интервале (от 1 до 4,2 МэВ) экспериментально полученная зависимость пробега протонов имеет линейную зависимость, где длина пробега протона в композите оптимального состава прямо пропорциональна его энергии (табл. 2).

Заключение

В работе рассмотрена возможность синтеза полимерных композитов на основе фторопластовой матрицы и оксида висмута. Представлена плотность композитов с различным содержанием наполнителя (от 50 до 80% по массе). Построена кривая значений модуля упругости композита от содержания наполнителя и на основании этой зависимости выбран оптимальный состав

композита. Оптимальным является состав материала, который содержит в себе 50% наполнителя – оксида висмута и 50% матрицы – фтороплата. Для исследования защитных свойств разработанного материала он был подвергнут протонному облучению. Энергия протонов варьировалась от 1 до 4,2 МэВ. Глубина проникновения протонов в композите во всем рассматриваемом энергетическом диапазоне не превышает 0,2 мм, что говорит о высоких радиационно-защитных свойствах разработанного композита.

Работа выполнена при поддержке проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.2034.2014/К.

Список литературы

1. Матюхин П.В. Жаропрочный радиационно-защитный композиционный материал конструкционного назначения / П.В. Матюхин, В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина, В.А. Дороганов, Е.И. Евтушенко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 10. – С. 32–36.
2. Матюхин П.В. Термостойкие радиационно-защитные композиционные материалы, эксплуатируемые при высоких температурах / П.В. Матюхин, В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, В.А. Дороганов, Н.И. Черкашина, Е.И. Евтушенко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 7-8. – С. 23–25.
3. Павленко В.И. Влияние вакуумного ультрафиолета на микро- и наноструктуру поверхности модифицированных полистирольных композитов / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, Н.И. Черкашина, О.Д. Едаменко // Перспективные материалы. – 2013. – № 3. – С. 14–19.
4. Павленко В.И. Влияние вакуумного ультрафиолета на поверхностные свойства высоконаполненных композитов / В.И. Павленко, В.Т. Заболотный, Н.И. Черкашина, О.Д. Едаменко // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 19–24.
5. Павленко В.И. Влияние содержания кремнийорганического наполнителя на физико-механические и поверхностные свойства полимерных композитов / В.И. Павленко, Н.И. Черкашина, В.В. Сухорослова, Ю.М. Бондаренко // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 95.
6. Павленко В.И. Дефектность кристаллов модифицированного гидроксида титана, подвергнутого термической обработке / В.И. Павленко, О.В. Куприева, Н.И. Черкашина, Р.Н. Ястребинский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. № 5. – С. 125–129.

7. Павленко В.И. Изучение коэффициентов ослабления фотонного и нейтронного пучков при прохождении через гидрид титана / В.И. Павленко, О.Д. Едаменко, Н.И. Черкашина, О.В. Куприева, А.В. Носков // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2015. – № 6. – С. 21.
8. Павленко В.И. Модифицирование поверхности гидрида титана боросиликатом натрия / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, О.В. Куприева, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина // *Перспективные материалы*. – 2014. – № 6. – С. 19–24.
9. Павленко В.И. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы / В.И. Павленко, О.Д. Едаменко, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2011. – № 3. – С. 113–116.
10. Павленко В.И. Расчет ионизационных и радиационных энергетических потерь быстрых электронов в полистирольном композите / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, Н.И. Черкашина // *Перспективные материалы*. – 2015. – № 8. – С. 5–11.
11. Павленко В.И. Повышение эффективности антикоррозионной обработки ядерного энергетического оборудования путем пассивации в алюминийсодержащих растворах / В.И. Павленко, В.В. Прохоров, Л.Л. Лебедев, Ю.И. Слепко, Н.И. Черкашина // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56. № 4. – С. 67–70.
12. Павленко В.И. Экспериментальное и физико-математическое моделирование воздействия набегающего потока атомарного кислорода на высоконаполненные полимерные композиты / В.И. Павленко, Л.С. Новиков, Г.Г. Бондаренко, В.Н. Черник, А.И. Гайдар, Н.И. Черкашина, О.Д. Едаменко // *Перспективные материалы*. – 2012. – № 4. – С. 92–98.
13. Павленко В.И. Эффективный способ получения термостойкого кристаллического нанопорошка вольфрама титана для жаростойких радиационно-защитных материалов / В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, В.А. Дороганов, И.В. Соколенко, Н.И. Черкашина, Е.И. Евтушенко // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2014. – № 7-8. – С. 32–36.
14. Павленко В.И. Явления электризации диэлектрического полимерного композита под действием потока высокоэнергетических протонов / В.И. Павленко, А.И. Акишин, О.Д. Едаменко, Р.Н. Ястребинский, Д.Г. Тарасов, Н.И. Черкашина // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2010. – Т. 12. № 4-3. – С. 677–681.
15. Павленко В.И. Суммарные потери энергии релятивистского электрона при прохождении через полимерный композиционный материал / Павленко В.И., Едаменко О.Д., Черкашина Н.И., Носков А.В. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2014. – № 4. – С. 101–106.
16. Черкашина Н.И. Воздействие вакуумного ультрафиолета и кислородной плазмы на структуру и устойчивость полистирольного композита с органосилоксановым наполнителем: диссертация ... кандидата технических наук. – Белгород, 2013.
17. Черкашина Н.И. Исследование влияния вакуумного ультрафиолета на морфологию поверхности нанонаполненных полимерных композиционных материалов в условиях, приближенных к условиям околоземного космического пространства / Черкашина Н.И., Павленко В.И., Едаменко А.С., Матюхин П.В. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6. – С. 130.
18. Черкашина Н.И. Воздействие вакуумного ультрафиолета на полимерные нанокомпозиты // *Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения): Материалы Межд. научно-практич. конференции*. – 2010. – С. 246–249.
19. Черкашина Н.И. Моделирование воздействия космического излучения на полимерные композиты с применением программного комплекса GEANT4 // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 3. – С. 122.
20. Черкашина Н.И. Перспективы создания радиационно-защитных полимерных композитов для космической техники в Белгородской области / Н.И. Черкашина Н.И., В.И. Павленко / Белгородская область: прошлое, настоящее, будущее. Материалы областной научно-практической конференции в 3-х частях. – 2011. – С. 192–196.
21. Черкашина Н.И. Разработка наноструктурированных вяжущих на основе местного сырья Белгородской области для штукатурных растворов // В сборнике: *Материалы I Международной научно-практической конференции «Проблемы строительного производства и управления недвижимостью»*. – Кемерово, 2010. – С. 67–70.
22. Черкашина Н.И. Синтез высокодисперсного гидрофобного наполнителя для полимерных матриц / Н.И. Черкашина, А.А. Карнаухов, А.В. Бурков, В.В. Сухорослова // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2013. – № 6. – С. 156–159.
23. Ястребинский Р.Н. Модифицированные железокислотные системы – эффективные сорбенты радионуклидов / Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, А.В. Ястребинская, Н.И. Черкашина // *Перспективные материалы*. – 2013. – № 5. – С. 39–43.
24. Ястребинский Р.Н. Структурно-фазовая характеристика боросиликатного покрытия // Р.Н. Ястребинский, О.В. Куприева, Н.И. Черкашина // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2014. – Т. 57. № 9. – С. 20–23.
25. Matyukhin P.V. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material / P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinsky, N.I. Cherkashina // *Middle East Journal of Scientific Research*. – 2013. – Т. 17. № 9. – С. 1343–1349.
26. Pavlenko V.I. Effect of vacuum ultraviolet on the surface properties of high-filled polymer composites / V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, O.D. Edamenko, V.T. Zabolotny // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2014. – Т. 5. № 3. – С. 219–223.
27. Pavlenko V.I. Modification of titanium hydride surface with sodium borosilicate / V.I. Pavlenko, O.V. Kuprieva, R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina, G.G. Bondarenko // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2014. – Т. 5. № 5. – С. 494–497.
28. Pavlenko V.I. Total energy losses of relativistic electrons passing through a polymer composite / V.I. Pavlenko, O.D. Edamenko, N.I. Cherkashina, A.V. Noskov // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2014. – Т. 8. № 2. – С. 398–403.
29. Pavlenko V.I. Using the high-dispersity [alpha]-Al₂O₃ as a filler for polymer matrices, resistant against the atomic oxygen / V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, A.V. Yastrebinskaya, P.V. Matyukhin, O.V. Kuprieva // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – Т. 25. № 12. – С. 1740–1746.
30. Pavlenko V.I. Study of the attenuation coefficients of photon and neutron beams passing through titanium hydride / V.I. Pavlenko, O.D. Edamenko, N.I. Cherkashina, O.V. Kuprieva, A.V. Noskov // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2015. – Т. 9. № 3. – С. 546–549.
31. Slyusar' O.A. Effect of additives on dispersed system structure formation / O.A. Slyusar', R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina, V.A. Doroganov, A.V. Yastrebinskaya // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2015.
32. Yastrebinsky R.N. Modifying the surface of iron-oxide minerals with organic and inorganic modifiers / R.N. Yastrebinsky, V.I. Pavlenko, P.V. Matukhin, N.I. Cherkashina, O.V. Kuprieva // *Middle East Journal of Scientific Research*. – 2013. – Т. 18. № 10. – С. 1455–1462.