

УДК 661.718.5

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЙ ПОЛИМЕР

Ястребинский Р.Н., Соколенко И.В., Иваницкий Д.А., Матюхин П.В.

*ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: natalipv13@mail.ru*

В статье представлены способы применения полимеров и материалов на их основе. Рассмотрены агрессивные факторы космического пространства, влияющие на работу полимеров. Работа посвящена анализу воздействия электронного облучения в космосе на полимеры на примере ударопрочного полистирола. В работе исследуются процессы прохождения быстрых электронов через исследуемый материал. Математически смоделирован процесс прохождения электронного излучения через материал. Смоделированы и исследованы коэффициенты пропускания по числу частиц в полимере, в зависимости от угла падения к нормали композита и начальной энергии падающих электронов. Анализ полученных данных показывает, что при увеличении угла между нормалью к поверхности и электронным пучком коэффициент пропускания числа электронов значительно снижается. Установлено, что эффективный пробег электронов в материале не зависит от угла падения между нормалью к поверхности и электронным пучком. Показана высокая стойкость разработанного композита по отношению к потоку быстрых электронов в общем случае их падения под разными углами к нормали поверхности мишени.

Ключевые слова: электронное облучение, коэффициент пропускания, эффективные пробег, полимерные материалы

EFFECTS OF RADIATION ON ELECTRONIC THERMOPLASTIC POLYMER

Yastrebinsky R.N., Sokolenko I.V., Ivanitsky D.A., Matyuhin P.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: natalipv13@mail.ru

The article presents applications of polymers and materials based on them. Considered aggressive factors of space, affecting the work of the polymers. The paper analyzes the effects of electron irradiation on polymers in space in the example of high impact polystyrene. This paper investigates the processes of the passage of fast electrons through the material under study. Mathematically model the passage of electron radiation through the material. Modeled and analyzed transmittances by the number of particles in the polymer, depending on the angle of incidence to the normal of the composite, and the initial energy of the incident electrons. Analysis of the data shows that increasing the angle between the normal to the surface and an electron beam transmittance of the electrons is much reduced. It is found that the effective path of electrons in the material does not depend on the angle between the normal to the surface and an electron beam. The high resistance of the composite developed relative to the flow of fast electrons in the general case of different angles of incidence to the normal of the target surface.

Keywords: electron beam irradiation, the transmittance, the effective running, polymeric materials

В последнее время полимеры и композиты на их основе нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Благодаря своим уникальным свойствам полимеры используют в медицине, строительстве, машиностроении, в атомной энергетике и даже в космической отрасли. Полимеры обладают хорошей электроизоляцией и конструкционными свойствами, благодаря чему их используют для производства кабелей, проводов, конденсаторов, применяемых в космическом пространстве.

Однако в космическом пространстве действуют другие климатические и радиационные условия, нежели чем на Земле. Под воздействием вакуума происходит сильное газовыделение полимеров, осаждающиеся частицы которых затем попадают на элементы космического аппарата, тем самым ухудшая их функциональные свойства. Под воздействием вакуумного ультрафиолета (ВУФ) в полимерах происходят обратимые и необратимые радиационные эффекты [1, 3, 4,

17, 16, 18, 26]. К наиболее опасным из них относят фотодеструкция, деструкция макромолекул, радиационная сшивка. Также атомарный кислород, который присутствует в космосе на высоте от 200 до 800 км от уровня моря, сильно разрушает полимеры. При воздействии атомарного кислорода с полимером происходит унос массы с его поверхности, что значительно разрушает его морфологию и физико-механические свойства [12, 16, 29]. Также нельзя забывать о радиационных поясах Земли, благодаря которым на полимеры воздействует электронное и протонное излучение. Под действием электронного и протонного излучения происходят пробои в полимерах, которые нарушают работоспособность всего элемента в целом [7, 10, 15, 28, 30].

Существуют различные способы повышения радиационной стойкости полимеров к агрессивным условиям космоса. Наиболее эффективным является синтез композитов, путем добавления радиационно-стойкого

или радиационно-защитного наполнителя в полимерную матрицу [2, 5, 6, 9, 13, 20, 21, 22, 31]. Очень часто необходимо создать совместимость полимерной матрицы и наполнителя, из-за их разной полярности. В этом случае вначале необходимо модифицировать наполнитель, а затем уже вводить его в матрицу. Очень часто полимеры модифицируют органосилоксановыми структурами [8, 11, 23, 24, 25, 27, 32].

Ударопрочный полистирол является одним из самых радиационно-стойких полимеров после полиимидов. Известны работы, в которых описано моделирование воздействия различных факторов космоса на материалы на основе полистирола [19, 28]. В данной работе проведено исследование воздействия электронного излучения на ударопрочный полистирол, построены коэффициенты пропускания электронов, зависящие от толщины материала.

Цель исследования

Изучить влияние электронного излучения на ударопрочный полистирол. Разработать математическую модель зависимости коэффициента пропускания числа электронов от толщины исследуемого материала при разных углах падения.

Материал и методы исследования

В качестве исследуемого материала использовали ударопрочный полистирол. Элементный химический состав представлен в таблице.

Элементный химический состав ударопрочного полистирола

Содержание в материале, % мас.		Плотность, г/см ³
H	C	
7,69	92,31	1,056

Коэффициенты пропускания по числу частиц и по энергии электронов падающих на исследуемый полимерный композиционный материал под некоторым углом ϕ к нормали его поверхности и прошедших слой вещества находятся по формуле (1) и (2) соответственно:

$$T_N(x) = \frac{N(x)}{N_0}, \quad (1)$$

$$T_{E_k}(x) = \frac{E(x)}{N_0 E_0} \quad (2)$$

где N_0 и E_0 – число падающих электронов и их кинетическая энергия.

Результаты исследования и их обсуждение

Для вычисления коэффициентов пропускания числа электронов воспользуемся эмпирической формулой:

$$T_N(x) = \exp \left[-\beta \left(\frac{x}{R_{ex}} \right)^\alpha \right], \quad (3)$$

где

$$R_{ex}(E_0, Z, \phi) = \cos^2 \left(\frac{107,2 - Z}{5,442Z - 1312} + \frac{292,7 - Z}{4,163Z + 561,3} E_0 + \frac{Z - 2,797}{83,86Z + 587,5} E_0^2 \right) \frac{1}{\rho}, \quad (4)$$

R_{ex} – экстраполированный пробег электронов.

$$\alpha = 1 + \frac{5,5 - 0,1(3,4 - E_0)^2}{Z^{0,398 - 0,032 E_0}} (\cos \phi - 0,1564) + 0,0125(E_0 - 2)(50 - Z)(\cos \phi - 0,1564)^3 \quad (5)$$

для $Z < 50$, $E > 2 \text{ МэВ}$,

$$\alpha = 1 + \frac{5,5 - 0,1(3,4 - E_0)^2}{Z^{0,398 - 0,032 E_0}} (\cos \phi - 0,1564) \text{ – в остальных случаях,} \quad (6)$$

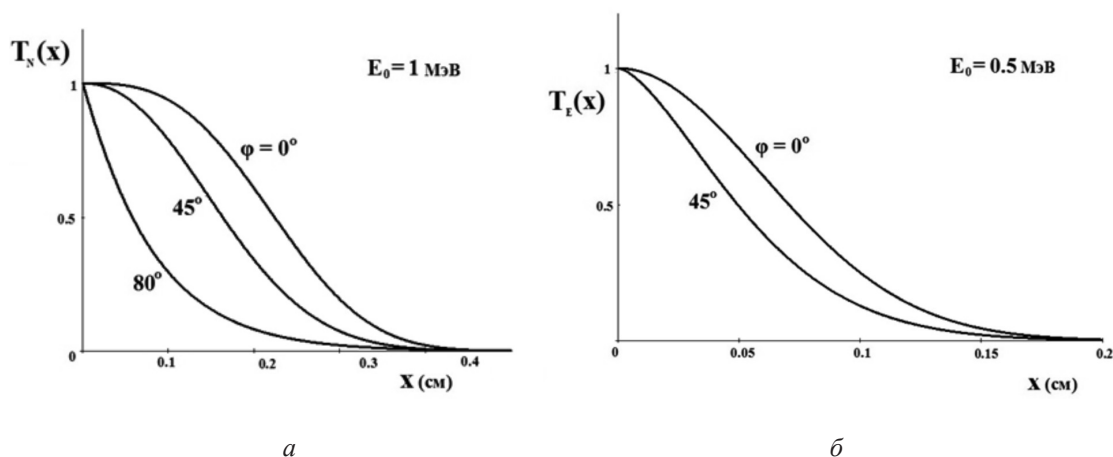
$$\beta = 2,59 - 0,0076(Z - 6), \quad (7)$$

Коэффициент пропускания по энергии имеет следующий вид

$$T_E(x) = \exp \left[-\beta_E \left(\frac{x}{R_{ex}} \right)^{\alpha_E} \right] \quad (8)$$

$$\alpha_E = 0,78 + \frac{Z + 24}{0,93Z + 13,7} (\cos \phi - 0,1564), \quad (9)$$

$$\beta_E = \frac{Z + 32,6}{0,524Z + 10,8}, \quad (10)$$



Коэффициент пропускания числа электронов при разных углах падения при энергии а – 1 МэВ, б – 0,5 МэВ

Выражения $T_N(x)$ и $T_E(x)$ можно использовать для точных расчетов при энергии электронов 0,4–6 МэВ и углов падения $0–45^\circ$, при нарушении этих условий ошибка составит 20–30%.

Ни рисунке представлены результаты математических расчетов коэффициента пропускания числа электронов при разных углах падения. Начальная энергия электронов фиксирована, на рисунке, а она составляет 1 МэВ, а на рисунке 1, б 0,5 МэВ.

Анализ данных полученных на рисунке показывает, что при увеличении угла между нормалью к поверхности и электронным пучком коэффициент пропускания числа электронов значительно снижается. При энергии электронов 0,5 МэВ для толщины материала более 0,2 см коэффициент пропускания числа электронов отсутствует. Это говорит о том, что эффективный пробег электронов данной энергии 0,2 см. А для энергии электронов в 1 МэВ эффективный пробег электронов 0,4 см. Также можно утверждать, что эффективный пробег электронов в материале не зависит от угла падения между нормалью к поверхности и электронным пучком.

Заключение

В работе исследуются процессы прохождения быстрых электронов через ударопрочный полистирол. Математически смоделирован процесс прохождения электронного излучения через материал. Смоделированы и исследованы коэффициенты пропускания по числу частиц в полимере, в зависимости от угла падения к нормали композита и начальной энергии падающих электронов. Показана высокая стойкость разработанного композита по

отношению к потоку быстрых электронов в общем случае их падения под разными углами к нормали поверхности мишени.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ, договор № НК 14-02-31050/15 от 30 апреля 2015 года.

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 гидрида 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. Прозоров, Л.Л. Лебедев, Ю.И. Слепоконь, 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 / 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 вольфрамата свинца 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 нанокompозиты // 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. Карнаузов, 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 железоксидные 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. – P. 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. – P. 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. – P. 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. – P. 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. – P. 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. – P. 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. Matyukhin, N.I. Cherkashina, O.V. Kuprieva // Middle East Journal of Scientific Research. – 2013. – Т. 18. № 10. – P. 1455–1462.