

ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ

© 2010 В.И. Павленко¹, А.И. Акишин², О.Д. Едаменко¹, Р.Н. Ястребинский¹,
Д.Г. Тарасов¹, Н.И. Черкашина¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
² Отдел ядерных и космических исследований НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ,
г. Москва

Поступила в редакцию 15.11.2010

В работе представлены результаты теоретических расчетов пробега быстрых протонов в полимерных композитах (ПК), оценка защитных характеристик, экспериментальные результаты по оценке мощности дозы протонного излучения в слоях ПК с объемным электрическим зарядом и глубины проникновения протонов, а также рассмотрены явления электризации ПК под действием протонного облучения. Установлено, что в результате электризации материала ПК под действием пучка протонов высоких энергий в приповерхностных слоях композита формируются две разноименно заряженные зоны, обусловленные первичной ионизацией быстрыми протонами и вторичной ионизацией δ -электронами, что в области их контакта приводит к формированию единого поля проводимости, являющегося генератором разряда.

Ключевые слова: *электризация, полимерные композиты, пробег протонов, ионизация, электроны, электрический пробой*

Одним из важнейших факторов, воздействующих на космические аппараты, являются заряженные частицы средних и высоких энергий ($0,1-10^5$ МэВ), входящие в состав радиационных поясов Земли, солнечных и галактических лучей. Первичные космические лучи состоят главным образом из протонов ($\sim 90\%$), α -частиц и более тяжелых ядер. Основная доля первичных космических лучей имеет энергию 10^9-10^{10} эВ, но встречаются также частицы со значительно большей энергией (до 10^{19} эВ). Частицы с энергиями менее 10^9 эВ отклоняются магнитным полем Земли и не попадают на нее. Поток протонной компоненты с энергией выше $2 \cdot 10^9$ эВ составляет примерно один протон на $1 \text{ см}^2/\text{с}$ [1].

В данной работе представлены результаты теоретических расчетов пробега быстрых протонов в полимерных композитах (ПК), оценка защитных характеристик, экспериментальные

результаты по оценке мощности дозы протонного излучения в слоях ПК с объемным электрическим зарядом и глубины проникновения протонов, а так же рассмотрены явления электризации ПК под действием протонного облучения. Источником ускоренных протонов в экспериментальной установке являлся циклотрон НИИЯФ МГУ, имеющий максимальный диаметр орбиты 120 см и максимальную энергию ускоренных частиц 7,5 МэВ/нуклон. Пучок протонов, выведенный из циклотрона по вакуумному ионопроводу, фокусировался магнитными квадрупольными линзами и отклонялся магнитом на угол 15° . Образцы ПК, изготовленные в форме дисков диаметром 50 мм и толщиной 1-20 мм, устанавливали на пути протонного пучка, перпендикулярно падающего на плоскую поверхность диска. За облучаемым образцом вплотную к его внешней поверхности закрепляли кремниевый полупроводниковый детектор диффузионно-дрейфового типа с толщиной рабочего слоя 2 мм и напряжением смещения около 100 В. Для того чтобы исключить возможность попадания на детектор частиц, образующихся при взаимодействии пучка протонов с деталями камеры (фоновое излучение), перед детектором располагался коллиматор. Частицы попадали на детектор через коллиматор, образованный двумя щелями.

Исследованиям подвергались высоконаполненные ПК с введенным в структуру матрицы наполнителем, химически связанным прямым полупроводником PbS. Данный ПК яв-

Павленко Вячеслав Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры неорганической химии. E-mail: kafnx@intbel.ru

Акишин Анатолий Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник. E-mail: akishin@hep.sinp.msu.ru

Едаменко Олег Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры неорганической химии. E-mail: kafnx@intbel.ru

Ястребинский Роман Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры неорганической химии. E-mail: yrnndo@mail.ru

Тарасов Дмитрий Геннадьевич, аспирант
Черкашина Наталья Игоревна, аспирантка

ляется высококонструкционным диэлектрическим радиационно-защитным композиционным материалом с высоким удельным сопротивлением, способностью эффективно удерживать внедренный радиационный заряд, термостабильностью до 600°C, термоциклированием от 75 до 298 К и электрической прочностью 25 кВ/мм при энергии электронного излучения 10 МэВ и поглощенной дозе 2 МГр и может быть использован в качестве конструкционного материала при проектировании аппаратов авиационно-космического назначения.

Энергетические потери протона в неупругих (возбуждение и ионизация) и упругих столкновениях с атомами относятся к ионизационным потерям. Они характеризуются удельной ионизацией, равной числу ионных пар (электрон, ион), возникающих на единицы пути протона. Удельные ионизационные потери представляют собой отношение энергии ΔE протона, теряемой на ионизацию среды при прохождении отрезка Δx, к длине этого отрезка. Удельные потери энергии возрастают с уменьшением энергии протона и особенно резко перед его остановкой в веществе (пик Брэгга). В результате взаимодействия со всеми электронами протон теряет кинетическую энергию

$$dE = \frac{4\pi n_e z^2 e^2}{m_e v^2} \frac{dr}{r} dx \quad (1)$$

где n_e – плотность электронов.

Если пролетающий через вещество протон имеет энергию большую, чем энергия связи электрона в атоме, удельные ионизационные потери энергии описываются формулой Бете-Блоха:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_A Z z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2 A} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (2)$$

где N_A – число Авогадро, Z и A – атомный номер и массовое число вещества, I – его средний потенциал ионизации, z – заряд (в единицах e) протона, β – его скорость (в единицах скорости света c), e и m_e – заряд и масса электрона [2, 3].

Для определенной среды и одного протона величина dE/dx является функцией только кинетической энергии: $dE/dx = \varphi(E)$. Проинтегрировав это выражение по всем значениям E от 0 до E_{\max} , можно получить полный пробег протона, то есть полный путь R , который протон проходит до остановки и полной потери кинетической энергии:

$$R = \int_0^{E_{\max}} \frac{dE}{\varphi(E)} \quad (3)$$

где dE/dx – удельные потери энергии в веществе; в случае α -распада $E_{\max} = E_0$ – начальной энергии α -частицы.

Тормозная способность сложного вещества равна взвешенной сумме тормозных способностей составляющих элементов. Основная формула остается справедливой и для сложного вещества, если вместо среднего ионизационного потенциала I подставить его усредненную величину, равную

$$\ln \bar{I} = \sum f_i \ln I_i \quad (4)$$

где $f_i = n_i Z_i / \sum n_i Z_i$ (n_i – число атомов в 1 см³ каждого из элементов), и вместо величины Z/A подставить $\sum n_i Z_i / \sum n_i A_i$.

В нашем случае для расчёта пробега в химическом соединении (гомогенной смеси) можно воспользоваться формулой

$$\frac{1}{R} = \frac{\omega_1}{R_1} + \frac{\omega_2}{R_2} + \frac{\omega_3}{R_3} \dots \quad (5)$$

где R_1, R_2, R_3, \dots – пробеги в отдельных элементах, входящих в состав сложного вещества; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ – относительные доли элементов в смеси или соединении; R – пробег в сложном веществе [4].

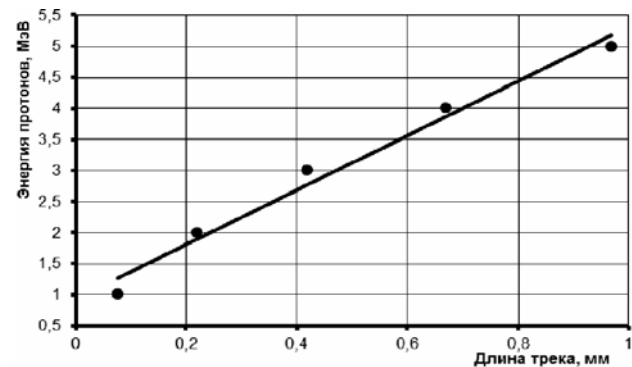


Рис. 1. Глубина проникновения протонного пучка (расчетная)

Теоретически рассчитанные на основании справочных данных по формуле (3) пробеги протонов энергии от 1 до 5 МэВ представлены на рис. 1. Как видно, длина пробега протона в ПК прямо пропорциональна его энергии. Однако измеренная глубина проникновения протонов в ПК не имеет линейной зависимости от энергии протона (рис. 2). Очевидно, это связано с электризацией приповерхностных слоёв ПК и высокой ионизацией молекул наполнителя. В результате первичной ионизации ускоренный протон непосредственно выбивает из атомов электроны [5]. Достаточно энергичные первичные электроны (кэВ- и даже МэВ-ные), называемые δ -

электронами, в свою очередь производят вторичную ионизацию. Полный пробег R_T δ -электрона в веществе, измеренный вдоль его траектории, может быть вычислен интегрированием формулы Бете-Блоха на длине $l=R_T$ и приравниванием полученного интеграла и начальной энергии.

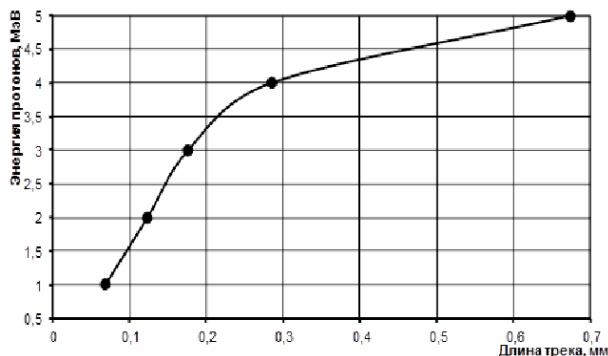


Рис. 2. Глубина проникновения протонного пучка (экспериментальная)

По мере ионизационного торможения электроны испытывают также весьма значительное угловое рассеяние, так что процесс их распространения подобен диффузии, поэтому для характеристики толщины вещества, на которую эффективно проникают электроны и которая существенно меньше полного пробега, используется практический пробег R_p . Практический пробег мало зависит от геометрии поглотителя и его состава [5, 6]. В случае исследуемого ПК практический пробег δ -электрона, вычисленный согласно указанному выше методу, не превышал $0,5R$ (R – полный пробег быстрого протона). Таким образом, в результате ионизационных процессов, обусловленных проникновением в приповерхностные слои ПК высокоэнергетических протонов, происходило образование электрически заряженных зон: зоны внедренного положительного заряда, образовавшейся в результате облучения ПК протонами с энергией от 1 до 4 МэВ на глубине от 0,05 до 0,5 мм, и зоны отрицательного заряда, возникающую в результате вторичной ионизации δ -электронами на глубине 0,5-1,0 мм. В результате электростатического взаимодействия потока быстрых протонов с положительно заряженной зоной первичной ионизации происходит увеличение потери протоном кинетической энергии движения и, одновременно, уменьшение удельных ионизационных потерь энергии из-за снижения плотности электронов. При переходе быстрого протона в зону отрицательного заряда, обусловленного вторичной ионизацией и наличием большого числа δ -электронов, удельные ионизационные потери энергии, наоборот, растут, что заставляет протон быстрее терять кинетическую энергию движения, превращаясь в релятивистскую частицу и

взаимодействуя со свободными электронами с образованием протонно-электронных пар. Основные оценочные параметры протонного облучения цилиндра из ПК представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные оценочные параметры протонного облучения цилиндра из ПК

Параметры	Величина
энергия протонов	$E_p = 1 \dots 5$ МэВ
критический флюенс протонов	$\Phi_p = 4 \cdot 10^{14}$ пр/см ²
доза облучения	$D = 1,2 \dots 1,8$ МГр
температура образцов	$T \sim 293$ К
время облучения	$\tau = 60$ мин.

При облучении образца ПК протонами с энергией 1-5 МэВ при флюенсе $4 \cdot 10^{14}$ см² возникал электрический пробой внедренного положительного заряда на облученную поверхность образца после достижения в зоне заряда напряженности электрического поля, превышающей электрическую прочность ПК ($E \sim 1,4 \cdot 10^5$ В/см).

По литературным данным зону внедренного положительного заряда, образующуюся в результате облучения протонами, можно рассматривать как внутренний виртуальный анод. Виртуальным катодом в этом случае является облученная поверхность мишени. Предпробойная разность потенциалов между анодом и катодом составляет $\sim 0,5$ МВ [7]. Напряженность электрического поля в этой системе («анод»-«катод») имеет наибольшую величину на краю зоны расположения положительного внедренного заряда («анода»), откуда по-видимому и берет начало процесс образования разрядного канала. Зона внедренного протонного заряда после пробоя состоит из сети разрядных каналов, образующих фигуру Лихтенберга в виде ветвей электрического дерева, вырастающего из основания разрядного канала, расположенного на краю этого слоя [7]. В результате высокоскоростного удара частицы о твердую мишень образуется плазмод, состоящий из частично ионизированного вещества и мишени, и наблюдается эмиссия электронов и ионов [7]. По полученным экспериментальным результатам можно сделать предположение, что инициирование электрического разряда может быть вызвано снижением электрической прочности диэлектриков под действием импульсной механической нагрузки и образованием локальной ударной волны при ударе частиц о поверхность мишени. При наличии в объеме диэлектрика сильного электрического поля ионизация на фронте ударной волны и генерация тока приводит к формированию лавины и развитию заряда.

Таким образом, возникновение разрядных каналов из зоны первичной ионизации на по-

верхность образца ПК должно приводить к разрыхлению структуры приповерхностных слоёв ПК и радиационной деструкции поверхности диэлектрика. Однако данные определения микротвёрдости поверхности образца ПК показывают лишь незначительное снижение, практически не зависящее от энергии пучка протонов (рис. 3). Кроме того, микрофотографии поверхности облучённых образцов не обнаруживают характерных следов микротрещин, зато в области облучения отчётливо видно единичное выходное отверстие разрядного канала (рис. 4).

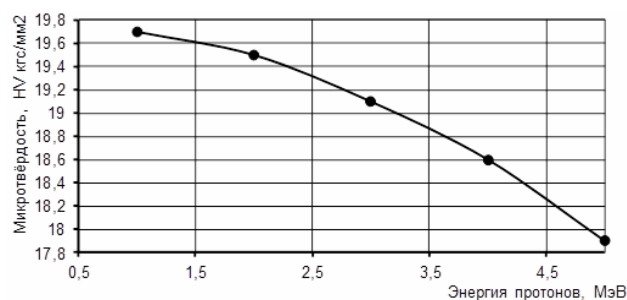


Рис. 3. Изменение микротвёрдости поверхности ПК

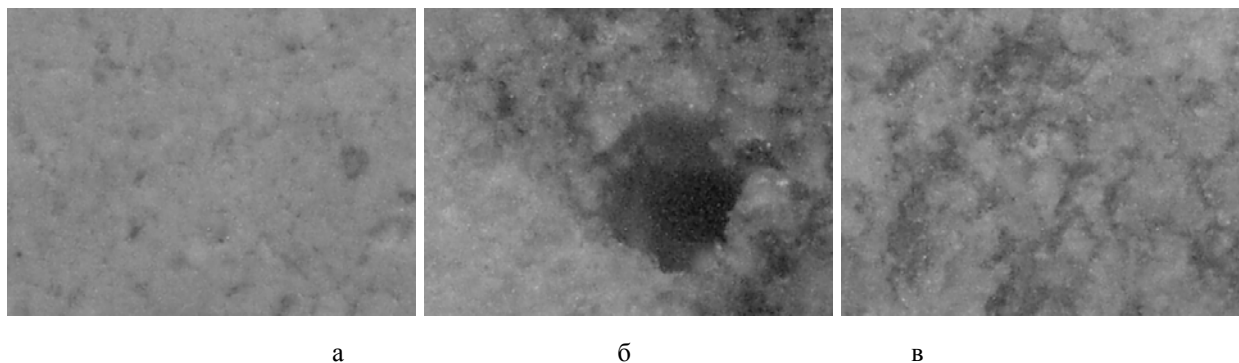


Рис. 4. Микрофотографии (x600) поверхности образца, облучённого пучком протонов с энергией 4,1 МэВ и накопленной дозой 2 МГр: а – поверхность необлучённого композита, б – выходное отверстие разрядного канала после пробоя, в – область поверхности облучённого ПК в районе выходного отверстия разрядного канала

Образование единственного разрядного канала в области облучения, по-видимому, объясняется формированием единого поля проводимости для зон электризации облучённого ПК. Основную роль в этом процессе играют имеющиеся в структуре ПК полупроводниковые зоны, сформированные в ПК за счет введения в структуру наполнителя полимерной матрицы химически связанного прямозонного полупроводника PbS. Данный полупроводник, так же как и элементарные полупроводники на основе германия и кремния обладает сравнительно узкой полосой запрещённых значений энергии между заполненной зоной и зоной проводимости. По данным исследований [8] пленки PbS обладают удельным сопротивлением 10^{-2} Ом·см, а полукристаллические образцы, полученные охлаждением расплава имеют удельное сопротивление 10^{-3} Ом·см. Причем в некоторых случаях эти образцы имеют отрицательные температурные коэффициенты сопротивления и могут обладать проводимостью как *n*-, так и *p*-типов.

Образование в приповерхностных слоях ПК в результате протонного облучения разноименно заряженных зон ионизации приводит к появлению большого количества короткозамкнутых элементов, генерирующих разряд. В результате при протонном облучении ПК в области контакта разноименно заряженных зон ионизации формируется единое поле проводимости, являющееся генератором разряда. В точке наи-

большого скопления дефектов возникает сильное электрическое поле, в котором загорается разряд. Подвод новых носителей заряда в канал пробоя происходит в результате внутренней эмиссии в дефектной структуре ПК. В момент прорастания разрядного канала генерируются ударные волны. При ударном сжатии диэлектрической матрицы ПК происходит инжекция валентных электронов в сильных электрических полях и ширина запрещенной зоны снижается в несколько раз [7]. Этот эффект может отрицательно влиять на процесс образования фигуры Лихтенберга при пробоях из зоны локализации внедренного заряда после формирования основного разрядного канала. Это объясняет единичность разрядного канала и отсутствие микротрещин на поверхности облучённого материала.

Выводы: для протонов относительно невысоких (1-5 МэВ) энергий длина пробега протона в ПК оказывается меньше расчётной, что объясняется взаимодействием потока протонов с зонами электрического заряда, образовавшимися в результате процессов первичной и вторичной ионизации материала ПК. При этом роль наполнителя в композите заключается в увеличении плотности электронов за счёт большого размера атома и развитости его электронных оболочек. В результате электризации материала ПК под действием пучка протонов высоких энергий в приповерхностных слоях композита формируются две разноименно заряженных зоны, обусловлен-

ные первичной ионизацией быстрыми протонами и вторичной ионизацией δ -электронами, что в области их контакта приводит к формированию единого поля проводимости, являющегося генератором разряда. Влияние присутствия полупроводниковых зон в материале композита заключается в том, что, в результате снижения сопротивления под действием облучения увеличивается эмиссия носителей заряда в формирующийся канал пробоя, что приводит к образованию единичного канала, не образующего микротрещины в поверхностных и приповерхностных слоях ПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. // Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия. / Под ред. Новикова Л.С., Панасюка М.И. – М.: «ЭНЦИТЕХ», 2000. – Т.16, 17.
2. Аккерман, А.Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. – М., 1991. 200 с.
3. Briesmeister, J.F. (ed.). MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. LANL Report LA-13709-M, Los Alamos, 2000. P. 126-145.
4. Курнаев, В.А. Отражение легких ионов от поверхности твердого тела / В.А. Курнаев, Е.С. Машикова, В.А. Молчанов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 234 с.
5. Матвеев, А.В. Дозиметрия и радиационная безопасность / А.В. Матвеев, В.И. Козаченко, В.П. Котов // ГУАП. – СПб., 2006. 88 с.
6. Гуцин, В.Н. Основы устройства космических аппаратов – М: «Машиностроение» 2003. С. 140-144.
7. Акишин, А.И. Методы радиационных испытаний космических материалов. – М., МГУ, 2005. 143 с.
8. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Высшая школа, 1986. 156 с.

**THE PHENOMENA OF ELECTRIZATION THE DIELECTRIC
POLYMERIC COMPOSITE UNDER ACTIVITY
OF HIGH-ENERGY PROTONS FLOW**

© 2010 V.I. Pavlenko¹, A.I. Akishin², O.D. Edamenko¹, R.N. Yastrebinskiy¹,
D.G. Tarasov¹, N.I. Cherkashina¹

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov

²Department of Nuclear and Space Researches at Scientific Research Institute of Nuclear Physics named after D.V. Skobeltsyn of Moscow State University, Moscow

In work the results of theoretical calculations of fast protons run in polymeric composites (PC), the estimation of protective characteristics, the experimental results for estimation the power of proton radiation dose in layers of PC with volumetric electrical charge and depths of protons penetration are presented, and also the phenomena of PC electrization under the activity of proton irradiation are viewed. It is established, that as a result of electrization the PC material under activity of high energy protons beam in near-surface layers of composite two unlike charged zones, caused by fast protons primary ionization and δ -electrons secondary ionization are formed, what in the field of their contact leads to formation of common conductivity field, being the discharge generator.

Key words: *electrization, polymeric composites, run of protons, ionization, electrons, electrical breakdown*

Vyacheslav Pavlenko, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Nonorganic Chemistry Department. E-mail: kafnx@intbel.ru

Anatoliy Akishin, Doctor of Technical Sciences, Main Research Fellow. E-mail: akishin@hep.sinp.msu.ru

Oleg Edamenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Nonorganic Chemistry Department. E-mail: kafnx@intbel.ru

Roman Yastrebinskiy, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Nonorganic Chemistry Department. E-mail: yrndo@mail.ru

Dmitriy Tarasov, Post-graduate Student

Nataliya Cherkashina, Post-graduate Student