

06

Защитные свойства многокомпонентного материала при облучении электронами с энергией 5 MeV и гамма-излучением с энергией от 0.570 до 1.252 MeV

© В.И. Павленко, Р.В. Сидельников, В.В. Кашибадзе, Д.С. Романюк, А.Ю. Ручий, С.Н. Домарев

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012 Белгород, Россия
e-mail: roman.sidelnikov@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 февраля 2024 г.
В окончательной редакции 11 марта 2024 г.
Принято к публикации 18 марта 2024 г.

Представлен синтез многокомпонентного материала, предназначенного для использования в качестве защиты космонавтов и оборудования космических аппаратов от космической радиации. В качестве связующего для многокомпонентного материала выбран фторопласт-4. В качестве наполнителей в матрицу вводились следующие компоненты: оксид висмута, карбид вольфрама, дробь гидрида титана и карбид бора. Синтез материала производился за счет твердофазного компактирования с последующим охлаждением до комнатной температуры, выпрессовкой с дальнейшим спеканием. Исследованы его физико-механические свойства: значение эрозионного износа, микротвердость по Виккерсу, модуль упругости. Проведено экспериментальное облучение многокомпонентного материала гамма-излучением. Вычислены значения линейного коэффициента ослабления гамма-излучения и массового коэффициента ослабления гамма-излучения. Проведено облучение многокомпонентного материала быстрыми электронами в вакууме. Установлено, что при поглощенной дозе электронов 5 MGy наблюдается двукратное снижение прочности многокомпонентного материала на изгиб.

Ключевые слова: многокомпонентный материал, воздействие электронов, γ -излучение, линейный коэффициент ослабления.

DOI: 10.61011/JTF.2024.05.57815.30-24

Введение

С развитием общества и технологий космос становится одним из основных сфер интересов человечества, но главной причиной сдерживания для его полноценного исследования являются негативные факторы космического пространства. Самый опасный из них — это космическая радиация, ведь человечество на данный момент не способно полностью защитить космонавтов от ее воздействия. Воздействие радиации приводит к необратимым последствиям для человеческого организма, например, к развитию рака, сердечно-сосудистых заболеваний, острой лучевой болезни, когнитивным и кроветворным нарушениям [1–4]. Космическая радиация бывает первичной, состоящей из галактического космического излучения, явлений солнечных частиц и частиц, захваченной магнитосферой Земли, и вторичной, которая образуется при взаимодействии первичной с конструкциями космических аппаратов за счет ядерной фрагментации [5]. Первичное излучение состоит в основном из протонов, электронов, альфа-частиц, дейтронов, ^3He и частиц с атомным номером больше 2, а вторичное излучение состоит из протонов, нейтронов, гамма-лучей, электронов, мезонов, мюонов и ядер от He до Ni [6–11]. Главным фактором, воздействующим на организм человека, является именно вторичное излучение [12], поэтому в настоящий момент необходимо разрабатывать материалы для защиты космонавтов от космического

излучения с упором на защиту от протонов, нейтронов, гамма-лучей и электронов, поскольку используемый на данный момент для защиты космических аппаратов алюминий не обеспечивает достаточного снижения дозы радиации [13].

В настоящее время существует множество материалов, в том числе композитных, для защиты в космосе от протонов и нейтронов, реже — от электронов, и широко изучена их возможность экранировать данные излучения [14–18]. Для защиты от нейтронов особый интерес представляют полимерные композиты, заполненные поглотителями нейтронов, что обусловлено высоким содержанием водорода в полимерах, с помощью которого эффективно замедляются быстрые нейтроны благодаря упругому рассеиванию. Кроме того, полимерные композиты будут иметь легкий вес и низкую стоимость. Для защиты от определенного типа излучения в полимеры вводят соответствующий наполнитель [19,20]. В качестве поглотителей нейтронов широко используются соединения бора, кадмия, самария из-за высокого поперечного сечения поглощения тепловых нейтронов [21–25]. Известна работа [26], в которой сравнивают нейтронно-защитные характеристики CdO, V_4C , BN с помощью метода моделирования MCNP. Показано, что для защиты от нейтронов BN с плотностью 3.487 g/cm^3 имеет лучшие показатели по снижению эквивалентной дозы и достигает около $2\text{ }\mu\text{Sv/h}$ (снижение на 52%).

Существует также множество исследований, рассматривающих возможность использования полимерных композитных материалов для защиты от гамма-излучения [27–33], но большинство из них невозможно использовать в космосе из-за высокой плотности, недостаточной степени защиты от нейтронов, наличия в составе тяжелых элементов, которые при взаимодействии с первичным космическим излучением образуют вторичное излучение, а также низкого сопротивления негативным факторам космического пространства.

Особый интерес представляет работа [34]. В ней исследуется полимерный композит полиэфир/барит/борид вольфрама для защиты от гамма-излучения с помощью гамма-спектрометра и источников ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{60}Co , а также нейтронов и заряженных частиц с использованием моделирования методом Монте-Карло. Практически во всех исследованиях лучшим составом является ВаWB-50 с 50% наполнением. Например, результаты полного макроскопического сечения, средняя длина свободного пробега и число прошедших нейтронов составляют 2.0515 cm^{-1} , 4.8745 mm и 8601998 [L1] соответственно. Слой половинного ослабления гамма-излучения для данного состава составляет 2.543 cm , что в 2.74 раза меньше, чем у чистого полимера. Таким образом, по всем параметрам защиты добавление наполнителя ВаWB к полиэфирному материалу оказывает положительное влияние на характеристики защиты. Подобная работа проведена Oğul [35], который исследовал влияние добавок нанопорошков В и Sn на защиту от гамма- и нейтронного излучения. Для проверки экранирующей способности приготовленных образцов использовались энергии гамма-излучения (нейтронов) в диапазоне от 59.5 до 1332.5 keV (0.1–10 MeV). Помимо экспериментальных измерений, с использованием программ WinXCOM (GEANT4 и FLUKA) проводились теоретические (имитационные) расчеты. Измерения показали, что экранирующий эффект полимера увеличивается с добавлением В и Sn, причем максимальные значения — в составе с наибольшим содержанием Sn.

Таким образом, композиционные материалы, предназначенные для использования в космической отрасли, необходимо комплексно исследовать. Следует изучить характеристики их защиты не только от первичного космического излучения, но и от вторичного излучения. Важно также оценить фактическую возможность использования этих материалов на космических кораблях с учетом занимаемого ими объема и массы.

Ранее коллективом авторов был разработан многокомпонентный материал, который обладает высокими нейтронно-защитными характеристиками и может найти применение для защиты от нейтронного излучения в космосе [36,37]. В настоящей работе представлены результаты воздействия электронного и гамма-излучения на этот многокомпонентный материал. Изучены защитные свойства многокомпонентного материала с использованием гамма-источников с энергиями $E(^{207}\text{Bi}) = 0.570\text{ MeV}$, $E(^{137}\text{Cs}) = 0.662\text{ MeV}$,

$E(^{60}\text{Co}) = 1.252\text{ MeV}$, а также исследована радиационная стойкость при электронном облучении.

1. Материалы и методы

1.1. Синтез многокомпонентного материала

В качестве связующего для многокомпонентного материала использовали пресс-порошок фторопласт-4. Использование фторопласта в качестве связующего обусловлено исключительной стойкостью фторопластовых материалов к химическому воздействию, превосходными механическими, диэлектрическими и антифрикционными свойствами, а также низким газовыделением при вакуумировании [38].

В качестве наполнителей использовали следующие компоненты: оксид висмута ($\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$), карбид вольфрама (WC), дробь гидрида титана $\text{TiH}_{1.7}$ диаметром до 2.5 mm, карбид бора F2500 (B_4C). Оксид висмута является полупроводником p-типа с высокой плотностью 8900 kg/m^3 . В отличие от свинца оксид висмута нетоксичен и обладает высокими радиационно-защитными характеристиками по отношению к γ -излучению, практически не уступающими свинцу. Карбид бора предназначен для поглощения тепловых нейтронов, а гидрид титана — для замедления быстрых нейтронов. Карбид вольфрама необходим для увеличения износостойкости композита, что особо актуально при воздействии набегающего потока атомарного кислорода в космосе и микрометеоритных частиц [39].

Для изготовления образца многокомпонентного материала использовали вещества при следующих массовых соотношениях (mass.%): фторопласт — 38.5; оксид висмута Bi_2O_3 — 42.2; карбид вольфрама WC — 2.9, дробь гидрида титана $\text{TiH}_{1.7}$ — 15.3; карбид бора B_4C — 1.1. Ранее было установлено, что именно данный состав обладает высокими нейтронно-защитными свойствами [36,37].

Смешение компонентов (кроме дроби гидрида титана) осуществляли при помощи криогенного помола в течение не менее 15 min. Использование криогенного помола позволяет провести механоактивацию поверхности всех компонентов, что значительно улучшает физико-механические свойства конечного материала [40]. После криогенного смешения в полученную смесь добавляли дробь гидрида титана и перемешивали вручную, чтобы исключить деформацию дроби. Далее смесь загружали в пресс-форму и нагревали до 280°C с поддержанием такой температуры не менее 60 min. Для формирования готового изделия провели твердофазное компактирование под давлением не менее 195 МПа. После прессования происходило постепенное охлаждение пресс-формы под давлением до 100°C и сброс давления с дальнейшим охлаждением до комнатной температуры. Следом за выпрессовкой образец многокомпонентного материала подвергался спеканию при температуре $360\text{--}370^\circ\text{C}$ в

Таблица 1. Данные по гранулометрии наполнителей

Наполнитель	Диапазон размера частиц, μm	Модальный диаметр частиц, μm	Удельная поверхность, cm^2/cm^3
Оксид висмута Bi_2O_3	0.08–27.9	0.09	106489
Карбид вольфрама (WC)	0.09–24.7	10.31	108268
Карбид бора B_4C	0.09–120.7	57.64	2957

течение не менее 3 h, с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры непосредственно в нагревательном оборудовании.

1.2. Объекты и методы исследования

Микрофотографии материалов выполнены на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU. Микрофотографии были сделаны в режиме SE — детектор вторичных электронов типа Эверхарта–Торнли.

Гранулометрический состав порошковых материалов исследовали методом лазерной гранулометрии на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec plus.

Микротвердость образцов определяли по методу Викерса (HV) на твердомере Nexus 4504-IMP.

Плотность изучали методом гидростатического взвешивания.

Эрозионный износ образцов испытывали на установке газоструйного эрозионного износа (Air Jet Erosion Testing Machine) мод TR-471-400 (2015, Ducom Instruments, Индия). Время испытания — 1 h, расход абразивного материала 2.2 g/min, в качестве абразивного материала использовали порошок корунда (Al_2O_3) со средней фракцией 50 μm . Скорость абразивного порошка 65 m/s, угол падения абразивных частиц 90°.

Прочность на изгиб измеряли на универсальной испытательной машине РЭМ-100-А-1-1 (производитель ООО „Метротест“, Республика Башкортостан, г. Нефтекамск, с верхним диапазоном измерения нагрузки 100 kN) методом трехточечного изгиба. Образец помещали на две опоры и в центре нагружали изгибающим пуансоном.

Модуль упругости рассчитывали по формуле (1) при помощи измерителя времени распространения ультразвука ПУЛЬСАР–1.2:

$$E = \frac{\gamma V^2}{0.95} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где E — модуль упругости, [Pa], V — числовое значение скорости ультразвука, [m/s], γ — объемный вес, [g/cm³].

Краевой угол смачивания измеряли на приборе Krüss DSA 30 (KrüssGmbH, Германия).

Определение радиационно-защитных характеристик по отношению к γ -излучению проводили с использованием дозиметра-радиометра ДКС-96 с блоком де-

тектирования БДКС-966. Вначале измеряли фон, который сохраняли в памяти устройства, далее в свинцовую емкость опускали источники γ -излучения, проводили измерение экспозиционной дозы без использования защитного экрана, после чего емкость герметично закрывали образцом исследуемого многокомпонентного материала толщиной 1 cm при помощи специального паза, создавая защитный экран, и далее проводили измерение экспозиционной дозы. В качестве источников использовали: $E(^{207}\text{Bi}) = 0.570$ MeV, $E(^{137}\text{Cs}) = 0.662$ MeV, $E(^{60}\text{Co}) = 1.252$ MeV. Каждый источник выполнен в геометрии ОСГИ 4 и представляет собой диск диаметром 25 mm, в центре которого находится активное пятно диаметром 2.5 mm радионуклида, герметизированного полимерным материалом с общей толщиной 3 mm. Источники произведены в АО „Радиивый институт им. В.Г. Хлопина“, Санкт-Петербург.

Облучение многокомпонентного материала быстрыми электронами в вакууме ($P = 1.4 \cdot 10^{-4}$ Pa) с энергией 5 MeV (мощность пучка 1.5 kGy/s) проводили на ускорителе микроволновых электронов „Радуга“. Время пребывания образцов в камере составляло 1.5–2 s. Флюенс электронов составлял $3.5 \cdot 10^{15}$ electrons/(cm² · s). Разовая поглощенная доза варьировалась от 10 до 20 kGy в зависимости от времени пребывания в камере. Таким образом, максимальная поглощенная доза 6 MGy была накоплена за 2 месяца примерно за 350 кругов (циклов облучения).

Радиационную стойкость многокомпонентного материала оценивали по уменьшению в два раза прочности на изгиб образцов, подвергнутых радиационному воздействию потока быстрых электронов.

2. Результаты и обсуждения

2.1. Исследования физико-механических свойств многокомпонентного материала

Для синтеза многокомпонентного материала в качестве связующего использовали фторопласт марки Ф-4 в виде мелкодисперсного порошка. Размеры частиц фторопластового порошка находятся в диапазоне от 0.1 до 666.7 μm , при этом большая часть частиц размером от 20 до 150 μm . Модальный диаметр частиц 211.35 μm , а удельная поверхность частиц 1614 cm²/cm³.

Данные по гранулометрии наполнителей, кроме дроби гидроксида титана, представлены в табл. 1.

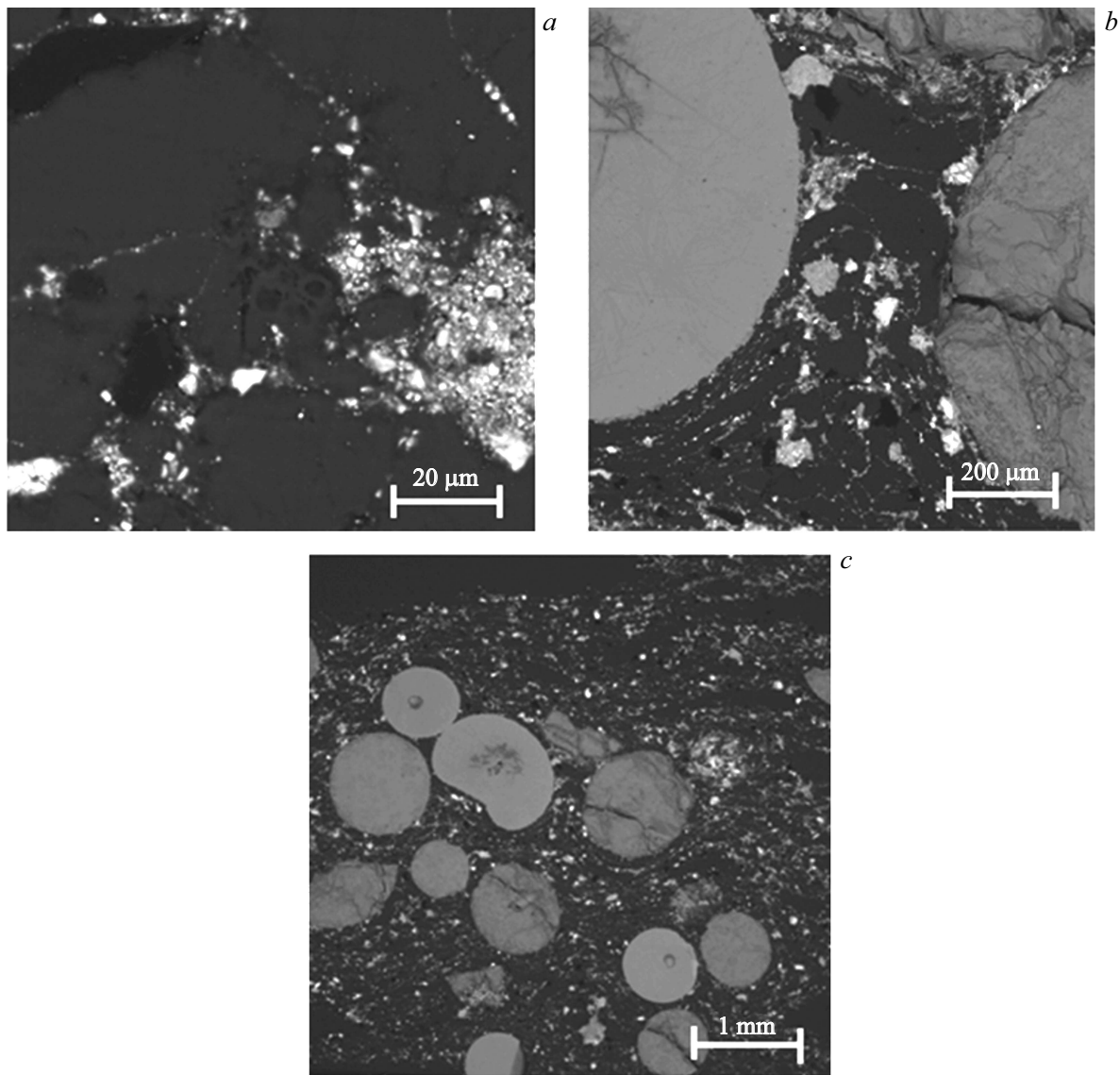


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности многокомпонентного материала.

Для оценки достигнутой связи между фторопластом и наполнителями, а также для определения равномерности распределения наполнителей в многокомпонентном материале была изучена микроструктура поверхности полученного образца (рис. 1).

Анализ микроструктуры поверхности полученного многокомпонентного материала показал, что наполнители распределены равномерно по всей поверхности композита. Отчетливо видно большое количество дроби гидроксида титана, закрывающей около 30% поверхности, что позволяет сделать предположение о высокой вероятности взаимодействия нейтронов при прохождении через полимерный композит с атомами водорода, содержащимися в дроби. Это говорит о правильности подбора процентного содержания наполнителей. Однако на поверхности дроби гидроксида титана видны трещины, заполненные другими наполнителями, что может гово-

рить о небольшом выходе водорода из объема дроби. Других дефектов на поверхности полимерного композита не обнаружено. Поверхность материала гладкая, что говорит о достигнутой связи между наполнителями и связующим. Так же для более качественного определения распределения наполнителей была сделана карта энергодисперсионного анализа (ЭДС) (рис. 2).

На поверхности материала обнаружены две области с повышенной концентрацией частиц вольфрама (рис. 2). Нужно заметить, что частицы вольфрама присутствуют только в связке с частицами висмута. Также определено несколько агломератов частиц висмута и бора. Присутствие на поверхности многокомпонентного материала частиц титана вне дроби объясняется нарушением ее целостности, происходящим во время прессования образцов. Для углубленной оценки структурной целостности полученного образца и обнаружения внутренних дефек-

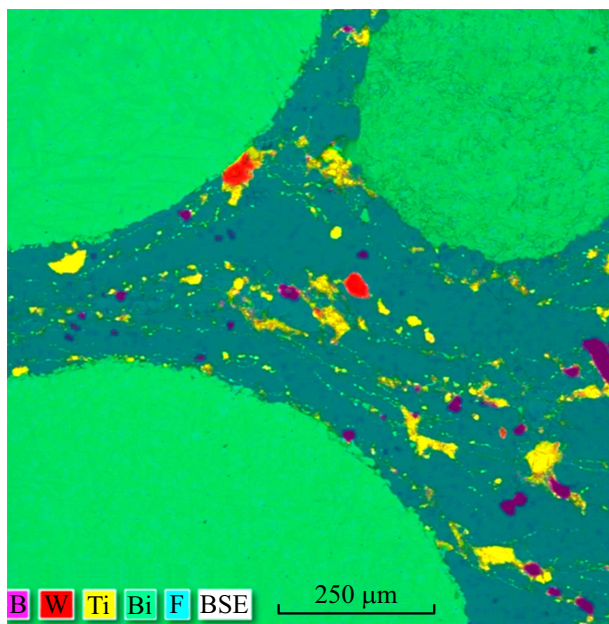


Рис. 2. Многослойная карта энергодисперсионного анализа поверхности многокомпонентного материала.

Таблица 2. Данные по модулю упругости фторопласта и многокомпонентного материала

Образец многокомпонентного материала	
$V_{med.}, m/s$	5108 ± 1
R, MPa	54.4 ± 0.5
E, GPa	97.7 ± 0.5
Плотность, g/cm^3	3.56 ± 0.03
Образец из чистого фторопласта	
$V_{med.}, m/s$	5083 ± 1
R, MPa	54 ± 0.5
E, GPa	58.4 ± 0.5
Плотность, g/cm^3	2.15 ± 0.03

тов была изучена скорость распространения ультразвуковых колебаний, на основании которой был рассчитан модуль упругости по формуле (1). Также для сравнения полученных значений аналогичные исследования проведены с образцом из чистого фторопласта, результаты представлены в табл. 2. Плотность многокомпонентного материала для расчетов составляла $3.56 g/cm^3$.

Как видно из табл. 2, введение наполнителей в 1.67 раза увеличило значение модуля упругости, т.е. способность полученного многокомпонентного материала принимать первоначальный вид после приложения силы повысилась в 1.67 раза. Также стабильные показатели скорости распространения волн в трех разных точках по-

лученного образца свидетельствуют об отсутствии внутренних дефектов, подтверждая однородность структуры.

Для изучения деформационных и физико-механических свойств разработанного многокомпонентного материала исследован предел прочности на изгиб образцов в виде прямоугольников размером $50 \times 10 \times 7 mm$ методом трехточечного изгиба (рис. 3).

Было исследовано 5 образцов многокомпонентного материала и найдены средние значения для максимальной нагрузки $347.2 N$, максимальной деформации $1.16 mm$; предела прочности $14.6 MPa$.

Далее были изучены свойства поверхности многокомпонентного материала с помощью краевого угла смачивания (рис. 4).

Фторопласт известен низкой смачиваемостью, но при введении наполнителя более $60 mass. \%$ показатели смачиваемости могут значительно увеличиваться. Можно сделать вывод, что поверхность многокомпонентного материала для воды является несмачиваемой (рис. 4).

Значения основных физико-механических характеристик многокомпонентного материала представлены в табл. 3.

Таким образом, показано, что полимерный композит обладает достаточно высокими физико-механическими характеристиками. Далее были проведены исследования

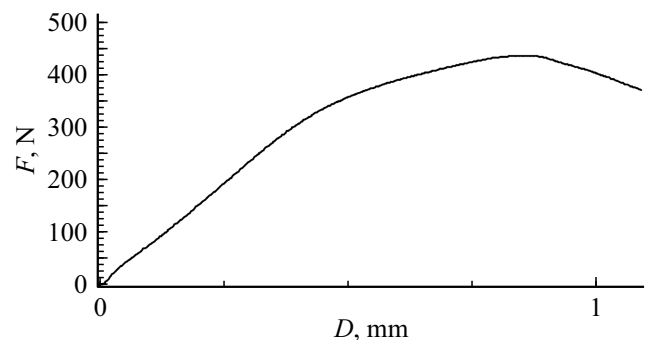


Рис. 3. Зависимость приложенной нагрузки от деформации для образца многокомпонентного материала.

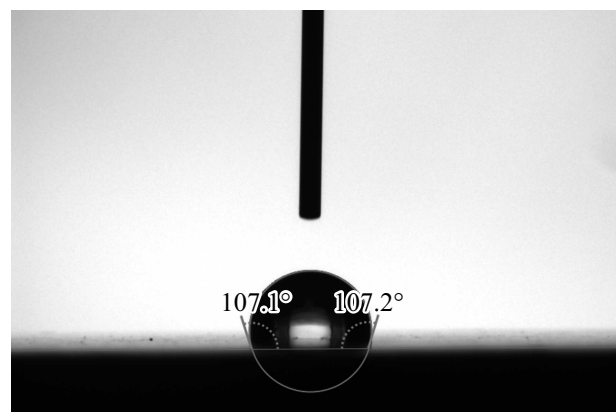


Рис. 4. Изображения лежащей капли воды на поверхности многокомпонентного материала.

Таблица 3. Значения физико-механических характеристик многокомпонентного материала

Параметр	Значение
Плотность, g/cm ³	3.56 ± 0.03
Микротвердость по Виккерсу HV/1 (нагрузка 200 g), HV	13.08 ± 0.5
Эрозионный износ, 10 ⁻³ mm ³ /g	0.052 ± 0.002
Предел прочности на изгиб, МПа	14.6 ± 0.89
Максимальная деформация, mm	1.16 ± 0.05
Модуль упругости, GPa	97.7 ± 0.5
Краевой угол смачивания водой, °	105.40 ± 2.42

защитных свойств данного композита по отношению к гамма- и электронному облучению.

2.2. Исследование защитных свойств многокомпонентного материала по отношению к гамма-излучению

На основе экспериментальных данных был рассчитан линейный коэффициент ослабления гамма-излучения, слой половинного ослабления гамма-излучения, массовый коэффициент ослабления гамма-излучения и процент ослабления гамма-излучения за образцом. Также для сравнения полученных характеристик аналогичный эксперимент и расчеты проведены для образца из чистого фторопласта и представлены в табл. 4.

Таким образом, видна зависимость снижения линейного коэффициента ослабления с увеличением энергии, что соответственно повышает слой половинного ослабления. Также можно увидеть, что все рассчитанные характеристики для многокомпонентного материала, кроме массового коэффициента ослабления, превосходят таковые у чистого фторопласта практически в два раза. Если для снижения гамма-излучения с энергией 0.570 MeV на 50% требуется экран из чистого фторопласта толщиной 3.65 см, то подобный показатель будет достигнут экраном из многокомпонентного материала толщиной всего 2.17 см, что на 1.48 см меньше, а при энергии 1.252 MeV — на 2.03 см меньше. Кроме того, процент ослабления гамма-излучения образцом многокомпонентного материала также превышает подобный у чистого фторопласта во всем диапазоне исследуемых энергий в 1.5 и более раз. Данный результат достигнут за счет выбора оксида висмута Bi₂O₃ в качестве основного наполнителя с процентным содержанием в материале 42.2 mass.%.

Известна работа, где исследуются нанонаполненные полимерные композиционные материалы на основе термопластов для защиты от гамма-излучения [41]. Линейный коэффициент ослабления у данного материала

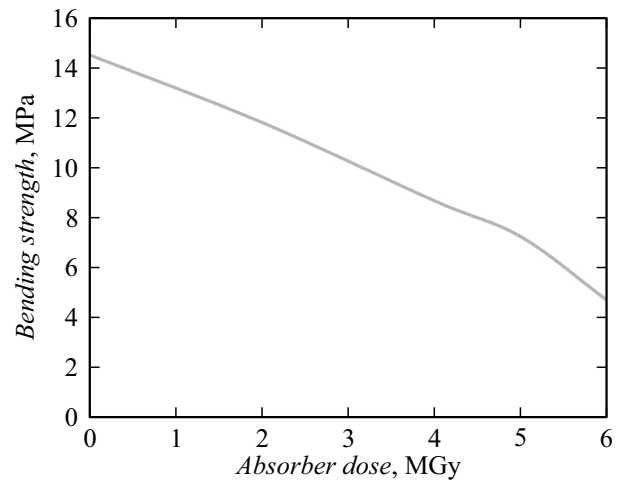


Рис. 5. Зависимость прочности на изгиб многокомпонентного материала от поглощенной дозы электронов.

при энергии 0.661 MeV и плотности 4.5 g/cm³ составляет 0.25 cm⁻¹, что на 0.05 cm⁻¹ меньше, чем у разработанного нами многокомпонентного материала при плотности 3.56 g/cm³. Также в работе [41] представлены линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения при энергии 0.661 MeV полимерных материалов: композиционного материала „Нейтронстоп СО–Pb“ („Kovo“, Чехия) — смесь полиэтилена с порошковым свинцом, плотность 3.5 g/cm³; „Light-Lead“ (США) — смесь свинца в инертном полимере, плотность 3.03 g/cm³; „Lead Blanket“ (США) — γ-защитный эластомер с высоким содержанием свинца, плотность 3.45 g/cm³. Коэффициенты ослабления составили 0.22, 0.19, 0.20 cm⁻¹ соответственно, что практически на треть меньше, чем у полученного многокомпонентного материала при практически одинаковой плотности [41].

В основном используется сравнение эффективности гамма-защитных свойств через массовый коэффициент ослабления, что представлено в табл. 5.

Таким образом, основываясь на данные табл. 5, можно сделать вывод, что полученный многокомпонентный материал превосходит современные аналоги по массовому коэффициенту ослабления гамма-излучения. Видно, что композиты на основе полиэтилена значительно проигрывают по данной характеристике.

2.3. Исследование воздействия электронного облучения на многокомпонентный материал

Результаты уменьшения прочностных характеристик многослойного композита в зависимости от поглощенной дозы представлены на рис. 5.

Радиационная стойкость — это способность материала не разрушаться при воздействии на этот материал ионизирующего излучения, т.е. до какой поглощенной

Таблица 4. Сравнительная характеристика защитных свойств фторопласта и многокомпонентного материала от гамма-излучения

Показатель	Многокомпонентный материал			Чистый фторопласт		
	$E(^{207}\text{Bi})=0.570$ MeV	$E(^{137}\text{Cs})=0.662$ MeV	$E(^{60}\text{Co})=1.252$ MeV	$E(^{207}\text{Bi})=0.570$ MeV	$E(^{137}\text{Cs})=0.662$ MeV	$E(^{60}\text{Co})=1.252$ MeV
Линейный коэффициент ослабления, cm^{-1}	0.32 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.13 ± 0.01
Слой половинного ослабления, см	2.17 ± 0.07	2.31 ± 0.09	3.30 ± 0.17	3.85 ± 0.2	4.08 ± 0.23	5.33 ± 0.45
Массовый коэффициент ослабления, cm^2/g	0.089 ± 0.002	0.084 ± 0.003	0.058 ± 0.002	0.083 ± 0.004	0.079 ± 0.005	0.060 ± 0.005
Процент ослабления гамма-излучения образцом, %	27.38 ± 0.73	25.91 ± 0.74	18.94 ± 0.80	16.47 ± 0.83	15.63 ± 0.84	12.19 ± 0.89

Таблица 5. Сравнение массового коэффициента ослабления гамма-излучения известных материалов

Материал	Массовый коэффициент ослабления гамма-излучения, cm^2/g при энергии 0.662 MeV
Полученный многокомпонентный материал	0.084
Полиэтилен высокой плотности [42]	0.070
40% полиэтилен высокой плотности/объемный оксид цинка [42]	0.065
40% полиэтилена высокой плотности/объемные наночастицы оксида цинка [42]	0.077
Композит полиакриламид/оксид цинка 20% [43]	0.080
Полиэфирные бетоны, наполненные оксихлоридом висмута (10%) [44]	0.079
Полиметилметакрилат с содержанием наполнителя Bi_2O_3 , равным 10% [45]	0.081
30 mass.% $\text{nanoGd}_2\text{O}_3/10$ mass.% $\text{B}_4\text{C}/60$ mass.% ПЭВП [46]	0.062

дозы целостность материала не будет критически нарушена. Таким образом, ожидаемым изменением при поглощенной дозе 5 MGy будет уменьшение прочности на изгиб многокомпонентного материала в два раза. Соответственно радиационная стойкость многокомпонентного материала составляет 5 MGy.

Например, известно, что полиэтилентерефталат теряет до 30% предела прочности при дозе облучения электронами всего в 1 MGy [47], при таком же воздействии полученный многокомпонентный материал теряет 18.5% прочности. В то же время в полиэтилене уже при дозе облучения электронами в 0.3 MGy удлинение при разрыве уменьшается на 50%, а у фторопласта удлинение при разрыве уменьшается на 40% при дозе облучения электронами 0.005 MGy [48].

Заключение

Подтверждено, что перемешивание компонентов многокомпонентного материала при помощи криогенного помола, его синтез методом горячего твердофазного

компактирования под давлением 195 МПа с последующим спеканием при температуре 360–370°C придает необходимые физико-механические и эксплуатационные характеристики: плотность — 3.56 g/cm^3 , эрозионный износ — $0.052 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$, микротвердость по Виккерсу при нагрузке 200 г — 13.08 HV, предел прочности на изгиб — 14.6 МПа, модуль упругости — 97.7 GPa, максимальная деформация — 1.16 mm. По полученным значениям можно сказать, что компоненты для синтеза подобраны правильно; выбраны оптимальные параметры твердофазного компактирования.

По экспериментальным данным, полученным при воздействии гамма-источников $E(^{207}\text{Bi}) = 0.570 \text{ MeV}$, $E(^{137}\text{Cs}) = 0.662 \text{ MeV}$, $E(^{60}\text{Co}) = 1.252 \text{ MeV}$ на многокомпонентный материал, рассчитаны линейный (0.32, 0.30, 0.21 cm^{-1} соответственно) и массовый (0.089, 0.084, 0.058 cm^2/g соответственно) коэффициенты ослабления гамма-излучения, а также слой половинного ослабления (2.17, 2.31, 3.30 см соответственно). Сравнение значений массового коэффициента ослабления гамма-излучения многокомпонентного

материала с современными аналогами показывает его превосходство.

Результаты радиационной стойкости при воздействии быстрых электронов в вакууме с энергией 5 MeV показали, что при поглощенной дозе в 5 MGy прочность на изгиб полученного материала снижается на 50%.

Разработанный материал может быть использован для обеспечения защиты космонавтов и радиоэлектронной аппаратуры от воздействия негативных факторов космического пространства, главным образом от космической радиации, в том числе от вторичной радиации, возникающей от взаимодействия высокоэнергичных частиц космических лучей (в первую очередь протонов и тяжелых заряженных частиц) с материалами элементов конструкции космических аппаратов. Также данный материал можно использовать для защиты космических баз, построенных на поверхности Луны или Марса; кроме того, возможно его использование для защиты экипажа судов с мобильными реакторами, например, на атомных подводных лодках и атомных ледоколах.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10064 (продление), <https://rscf.ru/project/19-79-10064/> с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы

- [1] E. Belzile-Dugas, M.J. Eisenberg. *J. Am. Heart Assoc.*, **10**, 18 (2021). DOI: 10.1161/JAHA.121.021686
- [2] В.М. Баранов, В.П. Катунцев, М.В. Баранов, А.В. Шпаков, Г.Г. Тарасенков. *Ульяновский Медико-биологический журн.*, **3**, 115 (2018). DOI: 10.23648/UMBJ.2018.31.17222
- [3] Z.S. Patel, T.J. Brunstetter, W.J. Tarver, A.M. Whitmire, S.R. Zwart, S.M. Smith, J.L. Huff. *NPJ Microgravity*, **6**(1), 33 (2020). DOI: 10.1038/s41526-020-00124-6
- [4] D.N. Tavakol, T.R. Nash, Y. Kim, S. He, S. Fleischer, P.L. Graney, J.A. Brown, M. Liberman, M. Tamargo, A. Harken, A.A. Ferrando, S. Amundson, G. Garty, E. Azizi, K.W. Leong, D.J. Brenner, G. Vunjak-Novakovic. *Biomaterials*, **301**, 122267 (2023). DOI: 10.1016/j.biomaterials.2023.122267
- [5] G. Dietze, D.T. Bartlett, D.A. Cool, F.A. Cucinotta, X. Jia, I.R. McAulay, M. Pelliccioni, V. Petrov, G. Reitz, T. Sato. *Ann ICRP*, **42**(4), 1 (2013). DOI: 10.1016/j.icrp.2013.05.004
- [6] М.Г. Огурцов. *ЖТФ*, **93**(12), 1819 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56830.f228-23
- [7] А.А. Петрухин, А.Г. Богданов, Р.П. Кокулин. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **49**(4), 1124 (2018).
- [8] А.Н. Попов, Д.П. Барсуков, А.В. Иванчик, С.В. Бобашев. *ЖТФ*, **93**(12), 1743 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56809.f208-23
- [9] L.C. Simonsen, T.C. Slaba. *Life Sci. Space Res. (Amst)*, **31**, 14 (2021). DOI: 10.1016/j.lssr.2021.07.002
- [10] M. Naito, S. Kodaira. *Sci. Rep.*, **12**(1), 13617 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-17079-1
- [11] M. Hatsuda, H. Kawasaki, A. Shigenaga, A. Taketani, T. Takanashi, Y. Wakabayashi, Y. Otake, Y. Kamata, A. Ichinose, H. Nishioka, H. Kimura, Y. Koganei, S. Komoriya, M. Sakai, Y. Hamano, M. Yoshida, F. Yamakura. *Sci. Rep.*, **13**(1), 12479 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-38990-1
- [12] G.N. Timoshenko, I.S. Gordeev. *J. Astrophys.-Astronomy*, **41**(1), 5 (2020). DOI: 10.1007/s12036-020-9620-3
- [13] M.I. Dobynde, Y.Y. Shprits, A.Y. Drozdov, J. Hoffman, J. Li. *Space Weather*, **19**(9), e2021SW002749 (2021). DOI: 10.1029/2021SW002749
- [14] F. Horst, D. Boscolo, M. Durante, F. Luoni, C. Schuy, U. Weber. *Life Sci. Space Res. (Amst)*, **33**, 58 (2022). DOI: 10.1016/j.lssr.2022.03.003
- [15] D.K. Bond, B. Goddard, R.C. Singleterry, S. Bilbao y León. *Nucl Technol.*, **206**(8), 1120 (2020). DOI: 10.1080/00295450.2019.1681221
- [16] Ю.М. Бурмистров, В.М. Скоркин. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **3**, 32 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819030053
- [17] M. Naito, S. Kodaira, R. Ogawara, K. Tobita, Y. Someya, T. Kusumoto, H. Kusano, H. Kitamura, M. Koike, Y. Uchihori, M. Yamanaka, R. Mikoshiba, T. Endo, N. Kiyono, Y. Hagiwara, H. Kodama, S. Matsuo, Y. Takami, T. Sato, S. Orimo. *Life Sci. Space Res. (Amst)*, **26**, 69 (2020). DOI: 10.1016/j.lssr.2020.05.001
- [18] Н.И. Черкашина. *ЖТФ*, **90**(1), 115 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.01.48671.163-19 [N.I. Cherkashina. *Tech. Phys.*, **65**, 107 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220010028]
- [19] A.R. Rennie, A. Engberg, O. Eriksson, R.M. Dalglish. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **984**, 164613 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2020.164613
- [20] В.Д. Черкасов, Ю.П. Щербак, Д.В. Черкасов. *Строительные материалы и изделия*, **6**(4), 30 (2023). DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-30-41 [V.D. Cherkasov, Yu.P. Shcherbak, D.V. Cherkasov. *Construction Mater. Products*, **6**(4), 30 (2023). DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-30-41]
- [21] F. Cataldo, M. Prata. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **320**(3), 831 (2019). DOI: 10.1007/s10967-019-06526-5
- [22] C. Jumpee, T. Rattanaprome, N. Kumwang. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, **773**(1), 012036 (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/773/1/012036
- [23] J. Moradgholi, S.M.J. Mortazavi. *Ceram. Int.*, **48**(4), 5246 (2022). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.065
- [24] M. Alipour, M.K. Saadi, A.A. Rohani. *Moscow Univer. Phys. Bull.*, **74**(6), 608 (2019). DOI: 10.3103/S0027134919060043
- [25] P. Wang, X. Tang, H. Chai, D. Chen, Y. Qiu. *Fusion Eng. Design*, **101**, 218 (2015). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.09.007
- [26] M. Alipour, M.K. Saadi, A.A. Rohani. *Moscow Univer. Phys. Bull.*, **74**(6), 608 (2019). DOI: 10.3103/S0027134919060043
- [27] N.J. Abualroos, K.A. Yaacob, R. Zainon. *Radiation Phys. Chem.*, **212**, 111070 (2023). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111070
- [28] M. Yılmaz, F. Akman. *Appl. Radiat. Isotop.*, **200**, 110994 (2023). DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110994
- [29] A.H. Alsaab, S. Zeghib. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, **16**(4), 100708 (2023). DOI: 10.1016/j.jrras.2023.100708

- [30] M.F. Turhan, F. Akman, M.R. Kaçal, H. Polat, İ. Demirkol. *Appl. Radiat. Isotop.*, **191**, 110568 (2023). DOI: 10.1016/j.apradiso.2022.110568
- [31] N.I. Cherkashina, V.I. Pavlenko, A.V. Noskov, V.V. Sirota, S.V. Zaitsev, D.S. Prokhorenkov, R.V. Sidelnikov. *Progr. Nucl. Energy*, **137**, 103795 (2021). DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103795
- [32] П.А. Витязь, С.А. Ковалева, В.И. Жорник, М.А. Белоцерковский, А.Д. Дубинчук, Т.Ф. Григорьева, Н.З. Ляхов. *Космические аппараты и технологии*, **2**(4), 204 (2018). DOI: 10.26732/2618-7957-2018-4-204-211
- [33] O. Kilicoglu, C.V. More, F. Akman, K. Dilsiz, H. Oğul, M.R. Kaçal, H. Polat, O. Agar. *Radiat. Phys. Chem.*, **194**, 110039 (2022). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110039
- [34] F. Akman, H. Ozdogan, O. Kilicoglu, H. Ogul, O. Agar, M.R. Kacal, H. Polat, A. Tursucu. *Radiat. Phys. Chem.*, **212**, 111120 (2023). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111120
- [35] H. Oğul, H. Polat, F. Akman, M.R. Kaçal, K. Dilsiz, F. Bulut, O. Agar. *Radiat. Phys. Chem.*, **201**, 110474 (2022). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110474
- [36] N.I. Cherkashina, V.I. Pavlenko, A.N. Shkaplerov, A.A. Kuritsyn, R.V. Sidelnikov, E.V. Popova, L.A. Umnova, S.N. Domarev. *Adv. Space Res.*, **73**(5), 2638 (2024). DOI: 10.1016/j.asr.2023.12.003
- [37] V.I. Pavlenko, R.V. Sidelnikov, V.V. Kashibadze, M.I. Dobynde, D.A. Kartashov, V.A. Shurshakov. *Radiat. Phys. Chem.*, **215**, 111357 (2024). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111357
- [38] Э.Я. Бейдер, А.А. Донской, Г.Ф. Железина, Э.К. Кондрашов, Ю.В. Сытый, Е.Г. Сурнин. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*, **LI**(3), 30 (2008).
- [39] N.I. Cherkashina, V.I. Pavlenko, A.V. Noskov, A.N. Shkaplerov, A.A. Kuritsyn, E.V. Popova, S.V. Zaitsev, O.V. Kuprieva, N.V. Kashibadze. *Polymer (Guildf)*, **212**, 123192 (2021). DOI: 10.1016/j.polymer.2020.123192
- [40] A.V. Klyuev, N.F. Kashapov, S.V. Klyuev, S.V. Zolotareva, N.A. Shchekina, E.S. Shorstova, R.V. Lesovik. *Construction Mater. Products*, **6**(2), 5 (2023). DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18
- [41] О.Д. Едаменко, Р.Н. Ястребинский, И.В. Соколенко, А.В. Ястребинская. *Современные проблемы науки и образования*, **6** (2012)
- [42] Z. Alsayed, M.S. Badawi, R. Awad, A.M. El-Khatib, A.A. Thabet. *Phys. Scr.*, **95**(8), 085301 (2020). DOI: 10.1088/1402-4896/ab9a6e
- [43] F. Nasehi, M. Ismail. *Nucl. Med. Radiat. Ther.*, **10**(3), 1000404 (2019).
- [44] M. Sheela, V.A. Kamat, K. Kiran, K. Eshwarappa. *Radiat. Protect. Environ.*, **42**(4), 180 (2019). DOI: 10.4103/rpe.RPE_29_19
- [45] A.H. Alsaab, S. Zeghib. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, **16**(4), 100708 (2023). DOI: 10.1016/j.jgras.2023.100708
- [46] Z. Huo, S. Zhao, G. Zhong, H. Zhang, L. Hu. *Nucl. Mater. Energy*, **29**, 101095 (2021). DOI: 10.1016/j.nme.2021.101095
- [47] В.А. Шаропова, И.С. Каманцев, В.П. Швейкин, В.Ю. Иванов, О.В. Рябухин. *Письма в ЖТФ*, **48**(3), 30 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52153.19068 [V.A. Sharapova, I.S. Kamantsev, V.P. Shveikin, V.Yu. Ivanov, O.V. Ryabukhin. *Tech. Phys. Lett.*, **3**, 28 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.03.52878.19068]
- [48] H. Kudoh, T. Sasuga, T. Seguchi. In: *Irradiation of Polymers ACS Symposium Series*, ed. by Clough and Shalaby (American Chemical Society: Washington, DC, 1996), DOI: 0097-6156/96/0620-000212.00/0