

ДЕГРАДАЦИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ И АЛМАЗНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИИ

*Т. З. Лызденова^{а, 1}, Д. В. Дементьев^а, Е. И. Литвиненко^а,
Ю. А. Мурин^а, В. А. Михеев^б, С. Себаллос^а,
В. И. Стегайлов^а, С. И. Тютюнников^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

^б Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Россия

Описан метод облучения образцов диэлектрических композитов на основе эпоксидных смол и алмазных наполнителей, предназначенных для создания клеевых соединений в цепях съема тепла микроэлектронных изделий, эксплуатируемых в полях повышенной радиации. Метод основан на помещении образцов в тело массивной свинцовой мишени, в дальнейшем облучаемой интенсивным пучком протонов с энергией 660 МэВ. Накопленная образцами доза, создаваемая первичными и вторичными частицами, оценивается в рамках взаимодополняющих моделей FLUKA и MCNPX с результатами, сравниваемыми между собой, а также с результатами оценки дозы, полученной образцами, по наведенной активности изотопа ^{22}Na в мониторинжных алюминиевых фольгах, сопровождающих облучаемые образцы. В качестве анализируемых величин выступает теплопроводность образцов, деградирующая при облучении.

The study describes a method for irradiating samples of dielectric composites based on epoxy resins and diamond fillers, intended for adhesive joints in heat removal circuits of microelectronic devices operating in high-radiation fields. The method involves placing the samples inside a massive lead target, which is subsequently irradiated with an intense proton beam at an energy of 660 MeV. The dose accumulated by the samples from the interaction with primary and secondary particles is evaluated using complementary FLUKA and MCNPX models. The results are compared with each other and with dose estimates derived from the induced activity of the Na-22 isotope in monitoring aluminum foils accompanying the irradiated samples. The primary parameter analyzed is the thermal conductivity of the samples, which degrades under irradiation.

PACS: 83.80.+k; 61.80.+x

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых радиационно стойких связующих на основе сложных высокомолекулярных соединений является актуальной задачей с учетом их широкого применения в производстве устройств микроэлектроники для приложений, функционирующих в условиях повышенной радиации. Такие условия характерны для космических

¹E-mail: ligdenova@jinr.ru

полетов или экспериментов в области физики ядра и частиц. Радиационные характеристики связующих напрямую влияют на срок надежной службы создаваемых с их помощью устройств [1].

Основанием интереса к этой недостаточно изученной области для начала работ в Научно-методическом отделе кремниевых трековых систем ЛФВЭ ОИЯИ явилось широкое использование композитных материалов при создании в отделе сверхлегких опорных конструкций широкоапертурных кремниевых трековых систем для установок МРД и ВМ@N строящегося ускорительно-накопительного комплекса НИСА и, в частности, необходимость оптимизации теплопроводящих диэлектрических клеевых соединений, применяемых в жидкостных системах их охлаждения.

Клеевые соединения такого типа изготавливаются на основе эпоксидных смол, содержащих различные наполнители, которые повышают теплопроводность образуемого соединительного слоя. В качестве наполнителей обычно используются мелкодисперсные порошки оксида алюминия, нитрида алюминия [2]. Одним из таких наполнителей также является гексагональный порошок нитрида бора [3]. Его теплопроводность при нормальных условиях достигает $360 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ для определенного направления в кристалле высокого качества [4]. Известно о применении в качестве наполнителя алмазного порошка с теплопроводностью $900\text{--}2000 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [2, 5] с максимальной достигнутой при 70%-й массовой концентрации алмазного наполнителя теплопроводностью $6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [5].

Изменение теплопроводности адгезивов под воздействием радиации, играющую ключевую роль в сохранении функциональности клея под воздействием радиации, для указанных композитов никогда не изучалось, и в этом смысле данные этой экспериментальной работы делают попытку заполнить этот пробел.

Ниже описывается метод и полученные с его помощью результаты оценки степени деградации теплопроводности образцов после облучения интенсивным пучком протонов и оценки дозы, полученной образцами, по наведенной активности в мониторинговых алюминиевых фольгах, сопровождающих облучаемые образцы. В качестве образцов использовались двухкомпонентные композиционные материалы в форме таблеток, изготовленные на основе трех типов эпоксидных смол: ЭД-20 с отвердителем Этал-45М, НТ-2 с отвердителем НТ2 и Stycast 2850FT с Catalyst 23LV в пропорциях, рекомендованных производителями. В состав композиций на основе ЭД-20 и НТ-2 дополнительно вводился мелкодисперсный алмазный порошок в качестве наполнителя. Отверждение всех клеевых систем проводилось при комнатной температуре в течение 24 ч (в условиях холодного отверждения). По данным эксперимента определялась зависимость теплопроводности образцов от уровня поглощенной дозы, полученной ими в результате облучения высокоэнергетичными протонами, имитирующими потенциально возможную ситуацию использования двухкомпонентных клеев указанного типа в качестве тепловых контактных соединений при долговременных космических полетах или в «горячих» точках экспериментов по физике ядра или частиц.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Облучение образцов смесью потоков высокоэнергетических протонов осуществлялось в массивной свинцовой мишени-контейнере размером $200 \times 100 \times 50 \text{ мм}$ (рис. 1, а) со встроенными в ее тело образцами в форме таблеток диаметром 15 мм и тол-

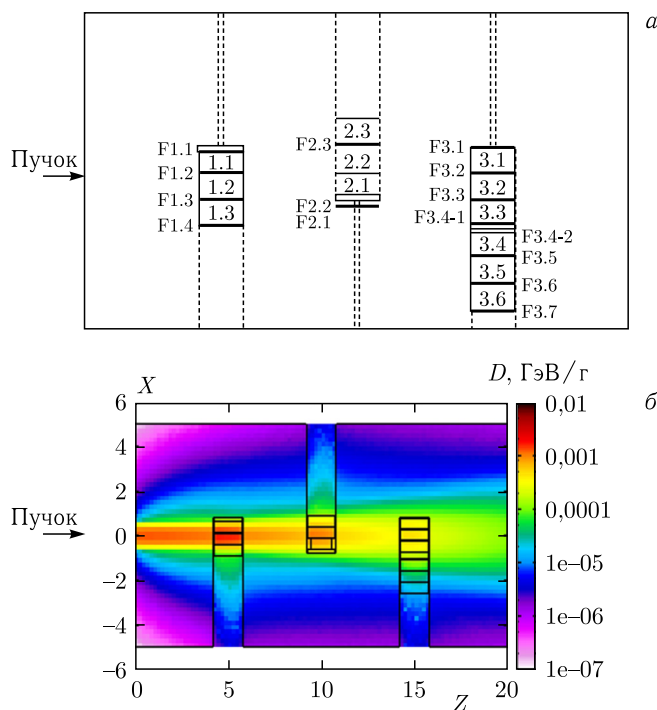


Рис. 1. а) Схема расположения облучаемых образцов в свинцовой мишени-контейнере во время ее облучения пучком протонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ; б) пространственное распределение поглощенных доз, предсказываемое расчетами в рамках программы FLUKA (вид сверху)

щиной 5 мм, прослоенными алюминиевыми мониторинными фольгами (алюминия не менее 99,9%) толщиной 80 мкм, по форме совпадающими с формой тестируемых образцов.

Свинцовый контейнер облучался пучком протонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ [6] диаметром 10 мм с пространственным XY -распределением интенсивности пучка в виде распределений Гаусса с равными дисперсиями по осям X и Y . Энергия протонов в пучке составляла 660 МэВ при средней интенсивности пучка протонов 0,8 мкА, а само облучение длилось 15 мин.

Оценка радиационной дозы была выполнена с помощью программ FLUKA [7] и MCNPX [8]. Пространственное распределение поглощенных доз (рис. 1, б) и энергетические спектры протонов, предсказываемые FLUKA, демонстрируются на рис. 1, б и 2.

На рис. 1, б показано ожидаемое пространственное распределение поглощенных доз в плоскости XZ мишени с образцами. В области первого канала загрузки образцов наблюдаются максимумы дозы. Затем значения дозы постепенно снижаются на порядок в области последнего канала загрузки тестируемых образцов. Для упрощения отслеживания местоположения мониторинными фольгами и образцам присваивались двухзначные индексы, первая цифра которых указывала на номер канала загрузки,

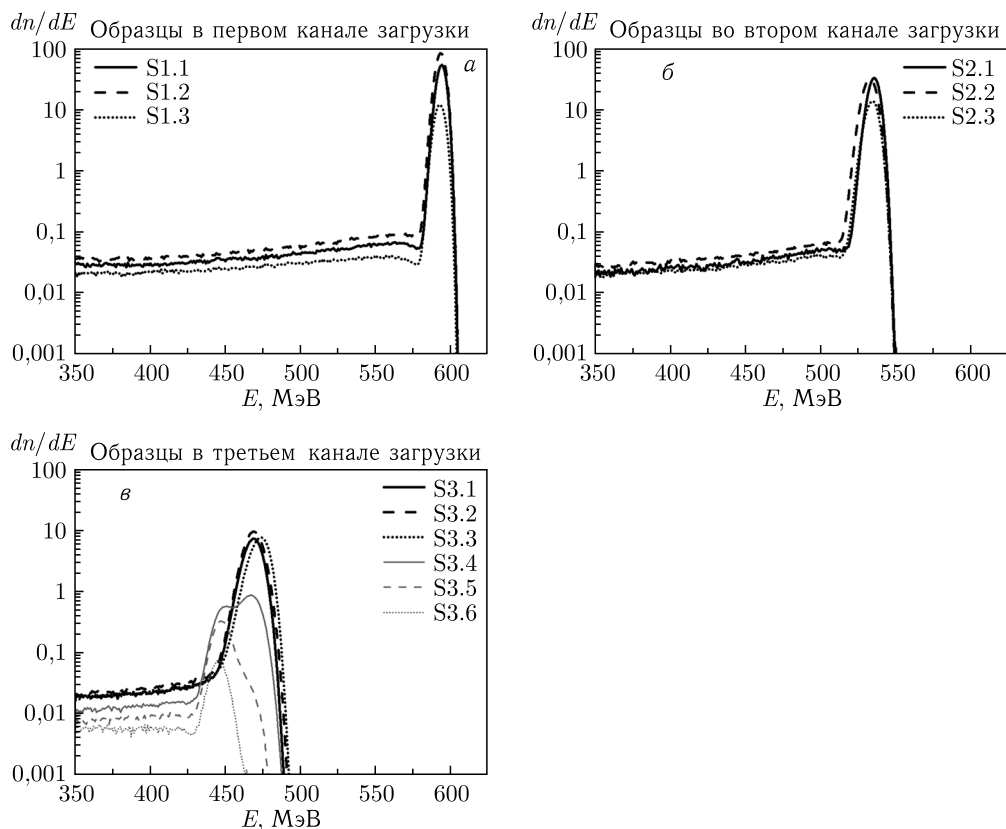


Рис. 2. Энергетические спектры протонов, облучающих тестируемые образцы, положения которых представлены на рис. 1, *a*

в который помещался данный объект, а вторая — на номер очередности его загрузки в данный канал. Для того чтобы отличать образцы от фольг, последним дополнительно присваивался буквенный индекс «f».

Данные рис. 2 демонстрируют предсказания FLUKA для формы энергетических спектров протонов, воздействующих на облученные образцы, размещенные в разных каналах мишени.

Из данных рис. 2, *a* видно, что пиковое значение энергии протонов между образцами с индексами 1.2 и 1.3 отличается на порядок, что сигнализирует о том, что распределение протонов в пространстве, занимаемом образцами, заметно неравномерно. Аналогичная тенденция наблюдается между образцами с индексами 3.4 и 3.6 в третьем канале загрузки образцов (см. рис. 2, *в*). При сравнении всех графиков видно, что в каждом последующем канале происходит уменьшение пиковых значений энергии протонов. В первом канале загрузки пиковое значение энергии протонов составляет примерно 605 МэВ, а в последнем — примерно 460 МэВ. Это касается образцов с индексами 1.1 и 3.6 соответственно.

ОЦЕНКА ОШИБКИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОГЛОЩЕННЫХ ОБРАЗЦАМИ ДОЗ

Оценка величины возможной ошибки в определении дозы, полученной образцом во время облучения, производилась сравнением модельных предсказаний двух общеизвестных транспортных моделей FLUKA и MNCPX между собой и с количественной оценкой дозовой нагрузки на образец, вычисляемой через измеренный уровень наведенной активности изотопов ^{22}Na в тонких алюминиевых мониторных фольгах, помещаемых в каналы загрузки совместно с образцами.

Расчеты, выполненные в рамках FLUKA, равно как и в рамках MNCPX, указывают на то, что дозовые нагрузки на образцы создаются преимущественно протонами с вкладом нейтронной компоненты, не превышающей величину в 2% от общей дозы, полученной образцом. Поэтому в дальнейшем мы пренебрегаем вкладом дозы от вторичных нейтронов, рассматривая только протоны как основной источник дозовой нагрузки на образец.

Число протонов, прошедших за время облучения через тестовый образец, можно оценить, если известно число радиоактивных ядер ^{22}Na в алюминиевых мониторных фольгах, окружающих образец, а также сечение образования данного изотопа в столкновениях протонов заданной энергии с ядрами алюминия. Уровень наведенной активности алюминиевых мониторных фольг измерялся по величине характерной линии от распада ^{22}Na в энергетическом спектре гамма-излучения облученной фольги, измеряемом с помощью Ge(Li)-детектора. Измерения проводились спустя 10 мес после облучения, когда в γ -спектре был четко различим пик ^{22}Na , а сопутствующие более короткоживущие изотопы ^{24}Na и ^7Be в основном распались. Для анализа был выбран ^{22}Na , поскольку он обладает более высоким выходом гамма-квантов на один распад (99,9%) и его содержание в образце было значительно выше, чем у ^7Be (10,44%). Это особенно проявлялось, когда образцы находились на удалении от пучка, где пик ^7Be не был различим из-за его низкой квантовой эффективности.

Калибровка детектора проводилась с использованием эталонного источника ^{152}Eu [10]. Все зарегистрированные спектры были проанализированы с помощью программной среды GAMMA MCA-8000. Активность алюминиевой мониторной мишени сразу после окончания облучения при ($t_0 = 0$) рассчитывается как [11]:

$$A_0 = \frac{S(^{22}\text{Na}) e^{\lambda t}}{\gamma(^{22}\text{Na}) \epsilon(E) \tau}, \quad (1)$$

где $S(^{22}\text{Na})$ — площадь характерного пика в γ -спектре от распада ^{22}Na с $E_\gamma = 1274,5$ кэВ; t — время, прошедшее от момента облучения до момента измерения в Ge(Li)-детекторе ($t = 10$ мес), $\lambda = \ln 2 / T_{22\text{Na}}$ — постоянная распада, $T_{22\text{Na}}$ — период полураспада ^{22}Na ; $\gamma(^{22}\text{Na})$ — выход гамма-квантов на один распад, а $\epsilon(E_\gamma)$ — эффективность регистрации γ -квантов, рассчитанная по эталонному источнику ^{152}Eu активностью $142 \cdot 10^3$ Бк на момент аттестации, соответствующая требованиям ТУ 95 2918-2007 для характерного распада ^{22}Na с энергией $E_\gamma = 1274,5$ кэВ; τ — время измерения Ge(Li)-детектором.

Так как число распадов в единицу времени определяется законом Соди-Резерфорда, количество радиоактивных ядер ^{22}Na — N_0 , наработанных в ходе облучения, есть

$$N_0 = A_0 / \lambda. \quad (2)$$

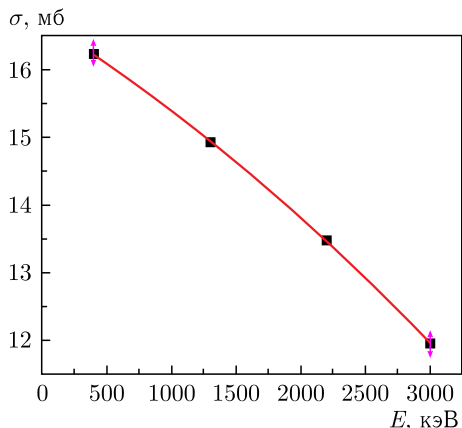


Рис. 3. Зависимость сечения образования ^{22}Na в алюминии от энергии налетающих протонов

(см. рис. 2). Для определения N_0 сечения образования ^{22}Na в алюминии (σ) протонами с энергией на входе в мониторную фольгу, рассчитанную в рамках FLUKA, экспериментальные данные работы [9] по энергетической зависимости σ аппроксимировались полиномом второго порядка (рис. 3).

Из формул (2) и (3) можно получить окончательно выражение для оценки числа протонов, прошедших через 1 см^2 мониторной фольги за все время ее облучения (флюенс):

$$F = \frac{MS(^{22}\text{Na})e^{\lambda t}}{\sigma\rho VN_A\gamma(^{22}\text{Na})\epsilon(E)\tau\lambda}. \quad (4)$$

Табл. 1 приводит результаты оценки значений флюенса протонов на всех мониторных фольгах, встроенных вместе с тестируемыми образцами в мишень-контейнер. В данных заметен большой разброс в измеренных значениях флюенсов, находящихся по разным сторонам тестируемого образца, что, по всей видимости, указывает на пространственную неоднородность потока протонов. В дальнейшем для расчета дозовых нагрузок на тестируемый образец считалось, что средний интегральный флюенс протонов, проходящих через образец, равен среднеарифметическому значению флюенсов, оцененных из данных по активации мониторных алюминиевых фольг, окружающих его.

Основной источник дозовой нагрузки на тестируемый образец — потеря энергии протонами на ионизацию атомов тестируемого образца. Эти потери на единицу пути, пройденного протоном («тормозная способность»), в композите выражаются через удельные ионизационные потери протонов $(dE/dx)_i$, рассчитываемые по формуле Бете–Блоха для атомов отдельных составляющих композита [12],

$$\frac{dE}{dx} = \sum_i \omega_i \left(\frac{dE}{dx} \right)_i, \quad (5)$$

где $(dE/dx)_i$ и ω_i — удельные ионизационные потери и весовые доли отдельных компонентов в композите.

С другой стороны, число образовавшихся ядер ^{22}Na можно оценить по количеству протонов, прошедших через мониторную фольгу, если известно сечение образования ^{22}Na в рассматриваемой реакции и известна энергия протонов:

$$N_0 = \frac{F\sigma\rho VN_A}{M}, \quad (3)$$

где ρ — плотность алюминия; N_A — число Авогадро; M — молярная масса алюминия; F — флюенс протонов, прошедших через фольгу за время ее облучения; V — объем мониторной фольги; σ — эффективное сечение образования ^{22}Na в алюминии с учетом кинетической энергии облучающих ее протонов, рассчитанной в рамках FLUKA

Таблица 1. Поглощенные дозы, рассчитанные с использованием алюминиевых мишеней

Индекс мониторной фольги (образца)	Расчетное значение дозы Al фольги, Мрад	Усредненное значение дозы фольги, Мрад	Расчетное значение дозы образца (FLUKA), Мрад	Расчетное значение дозы образца (MCNPX), Мрад
f11(1.1) f12(1.1)	19,86 ± 1,98 99,09 ± 21,21	56,48 ± 6,00	54,72	59,62
f12(1.2) f13(1.2)	99,23 ± 17,76 47,12 ± 8,29	70,68 ± 8,91	88,00	75,62
f1.3(1.3) f14(1.3)	46,29 ± 6,92 14,51 ± 2,18	30,40 ± 3,59	18,08	34,51
f22(2.3)	23,17 ± 5,54	23,17 ± 5,54	22,00	27,96
f31(3.1) f32(3.1)	19,92 ± 5,12 18,65 ± 4,87	19,29 ± 3,53	16,88	19,5036
f32(3.2) f33(3.2)	18,2 ± 4,93 16,13 ± 5,18	17,17 ± 3,59	21,84	23,78
f33(3.3) f34-1(3.3)	16,33 ± 3,95 14,29 ± 3,20	15,36 ± 2,53	17,68	21,18
F34-2(3.4) F3.5(3.4)	11,48 ± 4,14 6,28 ± 2,25	8,88 ± 2,26	5,20	7,61
F3.5(3.5) F3.6(3.5)	5,96 ± 1,90 1,77 ± 0,96	3,87 ± 1,22	1,92	2,86
F3.6(3.6) F3.7(3.6)	1,77 ± 0,96 0,35 ± 0,16	1,06 ± 0,38	0,96	1,25

Для расчета удельных ионизационных потерь, фигурирующих в формуле (5), использовалась программа SRIM [13] для значений кинетических энергий протонов на входе в образец, рассчитанных в рамках программы FLUKA.

Так как толщины образцов существенно меньше длины протонов в мишени-контейнере, при расчете энергии, выделяемой протоном в образце изменением тормозной способности протона во время его прохождения через образец, можно пренебречь:

$$E = \left(\frac{dE}{dx} \right)_0 \rho d, \quad (6)$$

где $(dE/dx)_0$ — тормозная способность протона, рассчитанная для энергии протонов на входе в образец; ρ — его плотность, а d — эффективная толщина диска, повернутого торцом по направлению пучка, $d = (\pi/2)R$, где R — радиус образца.

Откуда окончательно получаем оценку для поглощенной образцом дозы

$$D = \frac{EFS}{m}, \quad (7)$$

где S — площадь торца образца, повернутого по направлению пучка протонов; m — масса образца.

Оценки поглощенных доз облученных образцов, предсказанные двумя транспортными моделями и вычисленные по формуле (7) в описанных выше приближениях,

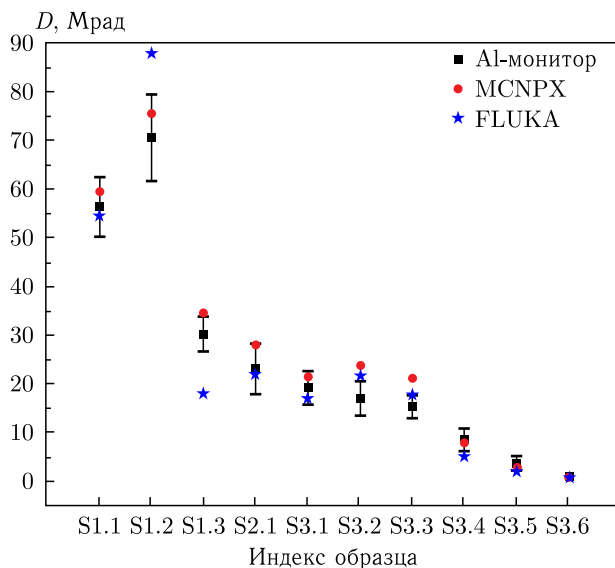


Рис. 4. Поглощенные дозы, рассчитанные в рамках FLUKA, MCNPX и по данным активации мониторных фольг

представлены на рис. 4 и данными табл. 1, в которых номера образцов обозначены двузначными символами, отражающими их расположение в мишени-контейнере, а символ \bar{f} указывает на то, что эти данные относятся к мониторной фольге (см. рис. 1, а).

Систематическая погрешность измеренных значений поглощенной дозы для образцов составляет от 10 до 36 %, в диапазоне от 71 до 1 Мрад соответственно. Статистическая погрешность для теоретического моделирования не превышает 6 %.

Чтобы получить более точные измерения в области малых доз (до 1 Мрад), возможно проведение измерений активности мониторных фольг непосредственно после облучения. Однако для этого необходимо организовать измерение в непосредственной близости к месту облучения в связи с ограничениями по транспортировке облученных образцов.

Результаты, полученные с помощью описанного метода, согласуются с результатами моделирования, полученными с использованием пакетов FLUKA и MCNPX в рамках точности используемых прикладных моделей [14].

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОБРАЗЦОВ ДО И ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ

Измерение теплопроводности образцов до и после облучения проводилось на измерителе теплопроводности ИТЭМ-1М, предназначенном для массовых экспресс-измерений теплопроводности твердых механически обрабатываемых материалов: металлов, сплавов, полупроводников, резин, пластмасс и прочих материалов в диапазоне теплопроводности от 0,2 до 80 Вт/(м·К) при комнатной температуре.

В основу работы измерителя ИТЭМ-1М положен стационарный сравнительный метод измерений. Образец и контактирующий с ним тепломер помещают между дву-

мя блоками с одинаковой теплоемкостью. Верхний блок перегревают относительно нижнего на 5–10 К. После установления в исследуемом образце теплового режима, который близок к стационарному, измеряют температурные перепады на образце и термометре. В качестве датчиков температуры используются термопары. При этом для материалов с теплопроводностью в диапазоне от 0,2 до 7 Вт/(м·К) измерение перепада температуры на образце производится с помощью термопар, вмонтированных в верхний и нижний блоки, а для материалов с теплопроводностью выше 7 Вт/(м·К) используются армированные термопары, размещенные в двух радиальных отверстиях образца вблизи его торцов [15].

Измеритель внесен в реестр средств измерений под №9375-83 с пределом допускаемой погрешности — 10 %. Измеритель ИТЭМ-1М состоит из двух блоков: термоблока и блока измерительного. Замена измерительного блока на мультиметр Keithley DAQ6510 с системой сбора и регистрации измерительных данных [16], а также градуировка измерителя по мерам теплопроводности из стекла кварцевого оптического марки КВ ГОСТ 15130-86 (теплопроводность — 1,33 Вт/(м·К)), органического технического стекла марки ТОСН ГОСТ 17622-72 (теплопроводность — 0,19 Вт/(м·К)) и оптического бесцветного стекла марки ТФ1 ГОСТ 3514-94 (теплопроводность — 0,70 Вт/(м·К)), входящих в состав Государственного рабочего эталона единицы теплопроводности твердых тел в диапазоне от 0,02 до 20 Вт/(м·К) при температуре от 90 до 1100 К рег. №3.1.ZZB.0112.2015, позволила достичь погрешности измерений измерителем — 5 %.

Результаты исследования деградации теплопроводности образцов χ с различной концентрацией алмазного порошка в эпоксидной смоле в зависимости от поглощенной ими дозы радиации представляют данные рис.5 и табл.2. Несмотря на то, что, как это было выше, в использованном нами методе ошибки в оценке величины поглощенной образцом дозы значительны и составляют величину порядка 30 %, полученные результаты уверенно демонстрируют заметное снижение теплопроводности для всех исследуемых образцов при превышении величины дозы в 1 Мрад.

После облучения эпоксидных смол типа НТ2 теплопроводность снизилась на 44 % при дозе 19,29 Мрад, и дальнейшее повышение дозы до 70,68 Мрад не привело к изменениям. В случае клея ЭД20 теплопроводность уменьшилась примерно на 40 % при

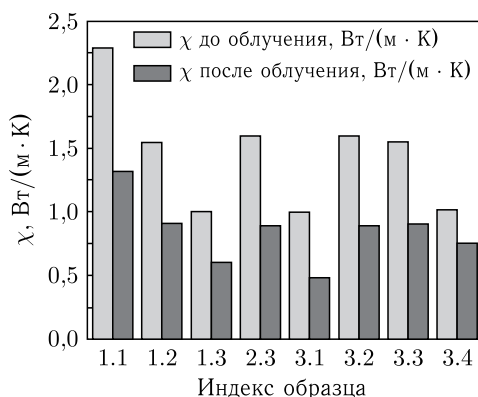


Рис. 5. Теплопроводность исследованных образцов до и после облучения

Таблица 2. Теплопроводность исследуемых образцов до и после облучения

Положение образца в сборке	Тип связующего	Наполнитель и его средний размер, мкм	Массовое соотношение фракций наполнителя и связующего	Концентрация алмазов, %	Измеренная теплопроводность до и после облучения, Вт/(м · К)
1.1	ЭД20 с двумя фракциями алмазов	D1 — 8,5, D2 — 50	37/13/50	50	$1 \pm 0,1 / 0,603 \pm 0,6$
1.2	НТ2 с двумя фракциями	D1 — 8,5, D2 — 50	48/17/35	65	$1,55 \pm 0,15 / 0,908 \pm 0,09$
1.3	НТ2 алмазов алмазным порошком	D1 — 8,5, D2 — 50	56/21/23	73	$2,3 \pm 0,23 / 1,33 \pm 0,13$
2,3	НТ2 с одной фракцией	D1 — 8,5	75/35	65	$1,6 \pm 0,16 / 0,898 \pm 0,81$
3.1	НТ2 с двумя фракциями алмазов	D1 — 8,5, D2 — 50	48/17/35	65	$1,55 \pm 0,15 / 0,905 \pm 0,09$
3.2	НТ2 с одной фракцией алмазов	D1 — 8,5	75/35	65	$1,6 \pm 0,16 / 0,897 \pm 0,09$
3.3	ЭД20 с двумя фракциями в концентрации алмазов	D1 — 8,5, D2 — 50	37/13/50	50	$1 \pm 0,1 / 0,481 \pm 0,05$
3.4	Stycast 2850FT	—	—	—	$1,02 \text{ (из ТЗ)} / 0,758 \pm 0,08$

дозе 15,36 Мрад и на 52 % при 56,48 Мрад, а разница между этими значениями находилась в пределах погрешности 10 %. Эти наблюдения косвенно указывают на нелинейный характер накопления структурных повреждений связующего с ростом дозы.

Также стоит отметить, что даже при высокой концентрации алмазного порошка нам не удалось достичь предельных значений теплопроводности, цитируемой авторами [5]. Использование смеси двух фракций порошка не улучшило ситуацию, вероятно, из-за низкой массовой концентрации алмазного порошка (менее 77 % от массы образца) и исходно невысокой теплопроводности применяемого порошка, что требует дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРОДОЛЖЕНИЮ РАБОТ

Основным выводом данной работы служит утверждение, что измерение теплопроводности образцов до и после облучения является чувствительной характеристикой степени деградации их свойств при облучении. Полученные данные показывают, что теплопроводность образцов после облучения снизилась на 40–50 % в диапазоне доз от единиц до десятков мегарад, что говорит об эффективности предложенного метода для количественной оценки разрушений связующего в композитах. Применение сравнительно простой методики облучения небольших композитных образцов протонами продемонстрировало работоспособность в указанном выше диапазоне доз с возможностью одновременного накопления доз разных уровней в одном эксперименте.

В дальнейшем предполагается использовать эту методику для большего количества облучаемых образцов с различными типами радиационно устойчивых связующих и диэлектрических наполнителей разных фракций, а также расширить набор измеряемых параметров, добавив исследование деградации электромеханических свойств образцов до и после облучения, таких как адгезия и удельное электрическое сопротивление.

Благодарности. Мы благодарны за помощь в проводке и настройке пучка протонов сотрудникам фазотрона ЛЯП ОИЯИ Н. Г. Шакуну, Г. В. Мицыну, С. А. Густову, а также нашему коллеге В. В. Елше за помощь в приготовлении мониторинговых алюминиевых мишеней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Journal of Adhesion and Adhesives. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01437496>.
2. Md. Abdul Alim, Mohd Zulkifly Abdullah, Mohd Sharizal Abdul Aziz, Kamarudin R., Gunnasegaran P. // *Polymers*. 2021. No. 13. P. 3337.
3. Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 4. С. 317–322.
4. Jo Insun, Pettes M. Th., Kim Jaehyun, Watanabe K., Taniguchi T., Yao Zhen, Li Shi // *Nano Lett.* 2013. V. 13. P. 550–554.
5. Патент на изобретение RU 2650818. Правообладатель Научно-исследовательский институт приборостроения им. В. В. Тихомирова. № 2017113280; заявл. 17.04.2017; опубл. 17.04.2018 / Белый Ю. И., Зайченко И. И., Чувилина Л. Ф., Брызгалина Г. В., Сомкин А. С.
6. Черняев А. П., Белихин М. А., Желтоножская М. В. Введение в физику ускорителей заряженных частиц. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2019.
7. The official CERN FLUKA website: <https://fluka.cern/>.
8. Los Alamos National Laboratory. The MCNP® Code. <https://mcnp.lanl.gov/>.
9. Matsuda H., Meigo S., Iwamoto H. // *J. Nucl. Sci. Technol.* 2018. V. 55. P. 955–961.
10. Вылов Ц., Байер Г.-Ю., Горюжанкин В. М., Желев Ж., Иванов А. И., Калинин В. Г., Кузнецова М. Я., Лебедев Н. А., Михайлова М. А., Муминов А. И., Новгородов А. Ф., Норсеев Ю. В., Оманов Ш., Осипенко Б. П., Степанов Э. К., Тиме К., Чумин В. Г., Щусь А. Ф., Юшкевич Ю. В. Спектры излучений радиоактивных нуклидов, измеренные с помощью полупроводниковых детекторов. М.: Наука, 1980. 558 с.
11. Савицкая Е. Н., Белецкая Ю. В., Крупный Г. И., Расцветалов Я. Н., Санников А. В. Эффективность регистрации фотонов германиевым полупроводниковым спектрометром. Препринт ИФВЭ 2011-15. Протвино, 2011. 15 с.

12. *Tsoufanidis N.* Measurement and Detection of Radiation. Taylor & Francis, 2015.
13. Pstar (Stopping-Power and Range Tables for Protons). National Institute of Standards and Technology. https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/ap_table.pl.
14. *Ferrari A., Kiselev D., Koi T., Wohlmuther M., Davide J.-C.* // Proc. 13th Meeting of the Task-Force on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-13), HZDR, Dresden, Germany, Oct. 10–12, 2016. 15 p.; arXiv:1806.03732.
15. Эксплуатационная документация на измеритель теплопроводности ИТЭМ-1М. 1986. 20 с.
16. Приложение к свидетельству № 73122 об утверждении типа средств измерений: Описание типа средств измерений «Мультиметры Keithley DMM6500, Keithley DAQ6510». 2019. 8 с.

Получено 15 апреля 2025 г.