

ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Брызгин А.А.^{1,3}, Коробейников М.В.^{1,3}, Пупков Ю.А.¹,
Михайленко М.А.², Вихров И.А.⁴, Здвижков А.Т.⁴

¹Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН,
проспект Академика Лаврентьева 11, Новосибирск 630090

²Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН,
ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск 630128.

НИИ космических и авиационных материалов
пл. Менделеева, д. 2р, г. Переславль-Залесский,
Ярославская область, 152025.

⁴Новосибирский государственный университет,
улица Пирогова, 2, Новосибирск 630090.

M.V.Korobeynikov@inp.nsk.su

АННОТАЦИЯ

В Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН) проведено исследование радиационной стойкости 4-х композитных материалов в диапазоне доз до 500 МГр. В статье описаны условия облучения и приведены данные по деградации механических свойств образцов.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий композитные материалы всё шире используются вместо металлов. Благодаря своей лёгкости и высоким прочностным характеристикам они всё шире применяются в космической отрасли и авиации. Но их конечная радиационная стойкость может ограничивать их применение, поэтому важно знать достоверные предельно допустимые поглощённые дозы для материалов, чтобы определять зоны применимости.

Композитные материалы также применяются в качестве изоляционных материалов. Эпоксидные компаунды и смолы используются для изоляции обмоток магнитов и трансформаторов работающих в условиях повышенных радиационных нагрузок – в ускорительных комплексах и активных зонах ядерных энергетических установок.

Институт ядерной физики СО РАН (ИЯФ) является одним из ведущих мировых разработчиков и изготовителей ускорителей заряженных частиц и оборудования для них. С 60-х годов XX века ИЯФ поставляет ускорители и оборудование для ускорительных комплексов для множества ведущих исследовательских организаций, включая ЦЕРН и ев-

ропейские, американские, японские и другие азиатские научные центры.

Отклоняющие и фокусирующие магниты для ускорительных центров являются сложными точными изделиями, работающими в условиях повышенного радиационного фона. Они должны надёжно работать на протяжении десятилетий. Часть магнитов работают в импульсном режиме, рабочие напряжения бывают до нескольких киловольт, импульсные токи бывают килоамперными.

Изготовленные в ИЯФе магниты стабильно работают десятилетиями, но через десятилетия они начинают давать сбои, и их заменяют (обычно через 25-30 лет).

Литературные данные [1-7] показывают широкий разброс радиационной стойкости материалов, но это вполне объяснимо, поскольку условия изготовления материалов и проведения испытаний могут сильно отличаться.

ИЯФ как производитель магнитных систем ускорителей заинтересован в объективных данных о радиационной стойкости композитных материалов, компаундов и смол. Поэтому мы периодически проводим исследования радиационной стойкости материалов [8].

НИИ космических и авиационных материалов (НИИКАМ) разрабатывает и производит оборудование для космических аппаратов.

Узнав об опыте ИЯФа в проведении исследований радиационной стойкости композитных материалов представители НИИКАМа предложили провести исследования радиационной стойкости интересных их материалов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

НИИКАМ предоставил для исследования образцы стандартных размеров 10*50*2 мм изготовленные из следующих материалов:

1. Смола ARALDITE MY 740, отвердитель ARADUR HY 906 и пластификатор FLEXBILISER DY 040 (ARALDITE)
2. Отвержденная олигоциануратная смола (ОЦС)
3. Стеклопластик на основе стеклоткани Т-10 (Стеклопласт)
4. Углепластик на основе углеродной ленты ЛУП-0,1 (Углепласт)

Исследование решили проводить повышая дозы по логарифмической шкале (ну почти что) – 10, 20, 50, 100, 200, 500 МГр.

Для достоверности на каждую дозу было решено закладывать по 5 образцов каждого типа, итого 20 образцов.

Поскольку рабочая температура магнитов не превышает 80°C, и в космических условиях температура может быть иногда несколько вы-

ше, было решено ограничить температуру образцов во время набора дозы значением 50-55°C.

УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ

Ускоритель электронов ИЛУ-6 с диапазоном энергии 1,6-2,5 МэВ и мощностью пучка до 10 кВт установленный в ИЯФе на протяжении десятилетий используется для различных экспериментальных работ, в том числе для разработки новых радиационных процессов и технологий. Он неоднократно был использован для проведения исследований по радиационной стойкости композитных материалов [8] Этот ускоритель снабжён подвижным столиком для транспортировки продукции в зоне обработки.

На этом ускорителе неоднократно проводились эксперименты по радиационно-термической обработке [9, 10], поэтому установка оборудована измерительным оборудованием позволяющим регистрировать температуру в зоне облучения.

Нашей задачей в данной работе было первым делом обеспечить возможно более высокую скорость набора дозы чтобы температура образцов не поднималась выше 50-55°C.

Образцы были размещены на водоохлаждаемом медном коллекторе под выпускным окном ускорителя как это показано на Рис. 1. Образцы прижимались к коллектору титановой фольгой толщиной 0.1 мм, спай измерительной термопары был размещён сверху образца под прижимающей фольгой, чтобы измерять максимальную поверхностную температуру.

При энергии 2,45 МэВ глубина проникновения пучка составляет 0,8 г/см², это примерно втрое превышает массовую толщину образцов. Поэтому область максимальной дозы (превышающей поверхностную дозу примерно в 1,3 раза) и соответственно максимального нагрева находится в районе нижней поверхности образцов, в месте теплового контакта с коллектором.

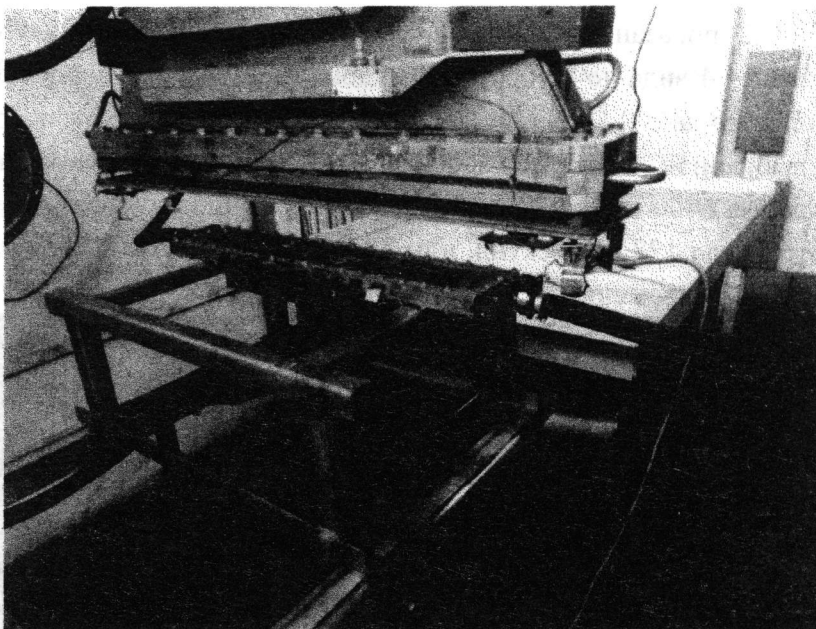


Рис. 1. Коллектор с образцами под выпускным окном ускорителя ИЛУ-6.

После нескольких прогонов различных образцов для облучения был выбран режим обработки:

Энергия – 2,45 МэВ

Ток пучка импульсный – 200 мА

Частота повторения импульсов – 5 Гц

Ток пучка средний – 0,66 мА

Ширина развёртки пучка – узкая, 50 см

Скорость набора дозы – 1,5625 кГр/с

Температура на верхней плоскости образцов – от 35 до 53°C.

Надо отметить, что коллектор охлаждался дистиллированной водой из централизованной системы, которая используется для охлаждения множества ускорителей ИЯФа, и давление и температура воды в этой системе периодически меняются в зависимости от нагрузки, поэтому были произведены длительные прогоны с контролем температуры образцов. Только после этого были начаты работы по облучению образцов.

Во время одного из пробных прогонов стеклотекстолитовый образец был сознательно прижат к коллектору только одной полоской, и часть его не имела непосредственного контакта с коллектором (поскольку лежала на другой полоске). Прогон довольно скоро пришлось прекратить, поскольку образец начал дымить, и половина пластины обуглилась. Видеоконтроль и измерение температуры велись на протяжении всего времени облучения.

На Рис. 2 показаны образцы на коллекторе подготовленные для набора дозы – 4 вида по 5 образцов каждого типа, они занимают 30 см вдоль коллектора.

При выбранной скорости набора дозы 1,5625 кГр/с доза 10 МГр набиралась за 6400 секунд, или 46 минут 40 секунд, а набор дозы 200 МГр потребовал 128 000 секунд, или 25 часов 33 минуты 20 секунд, а 500 МГр набирались ещё в 2,5 раза дольше.

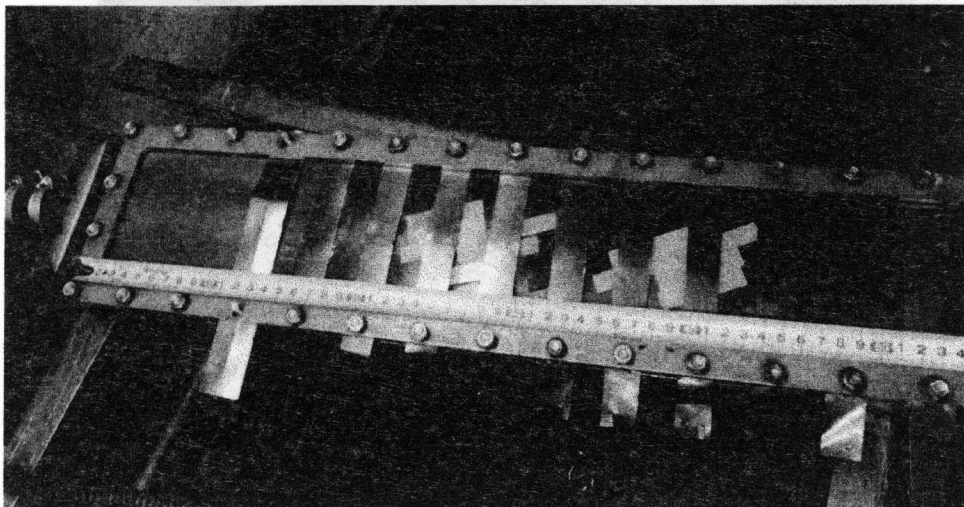


Рис. 2. Образцы на коллекторе перед обработкой.

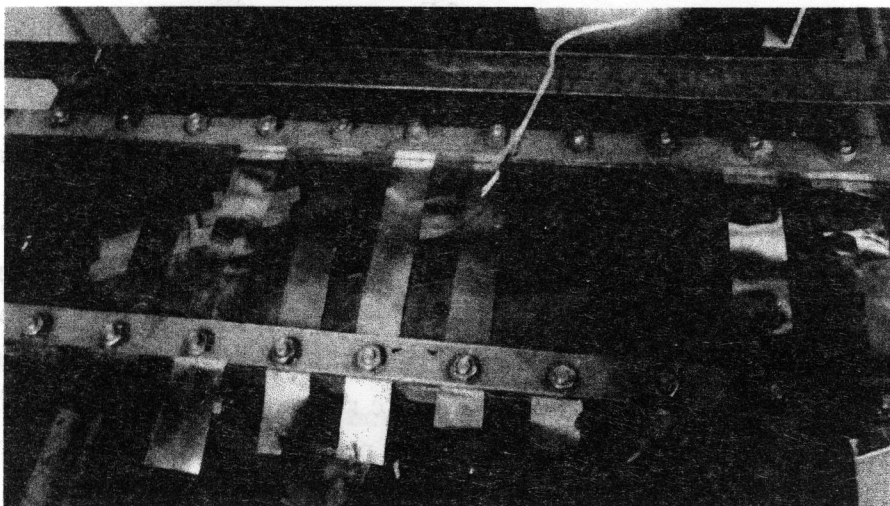


Рис. 3. Образцы на коллекторе после обработки и термопара с проводом.

Вид образцов после набора дозы показан на Рис.3. На фотографии виден провод идущий к термопаре расположенной на верхней плоскости одного из образцов. После набора большой дозы все образцы кроме углепластика меняли цвет.

После облучения образцы снимались и их механические параметры измерялись в ИЯФе.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Размеры образцов 10*50*2 мм, точные размеры каждого образца измерялись. В каждой серии использовалось по 5 образцов одного типа, результат усреднялся. Определялись изменения модуля упругости E и предел прочности при статическом изгибе $\sigma_{\text{пред}}$ по методике, описанной в [8], см. Рис. 4.

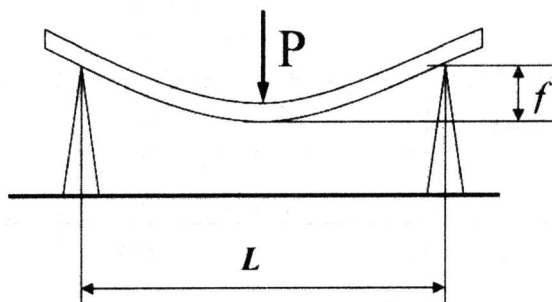


Рис. 4. Схема приложения нагрузки к образцам.

Для определения модуля упругости E измерялось усилие P и прогиб f образца, значение вычислялось по формуле

$$E = PL^3 / 4fbh^3,$$

где b – ширина образца, h – толщина образца, $f = 0.2 - 0.6$ от максимального прогиба.

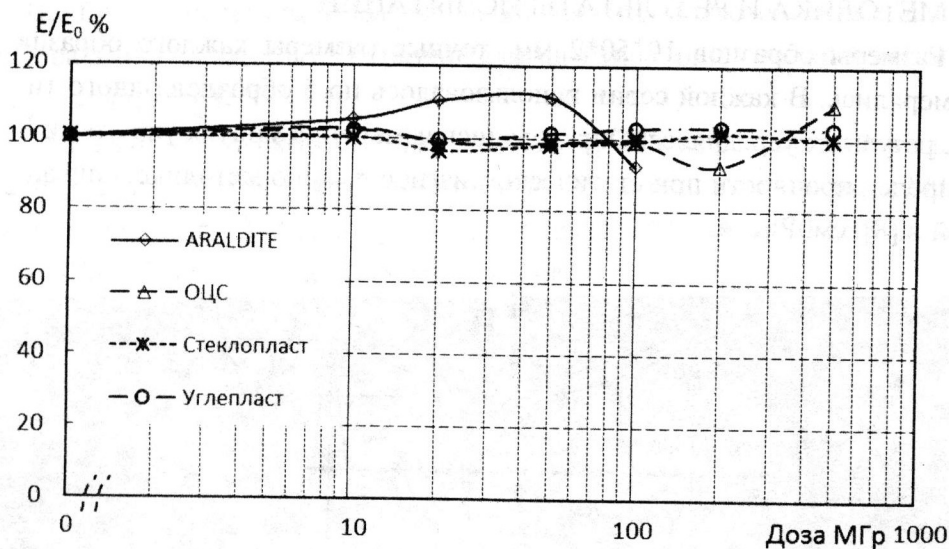
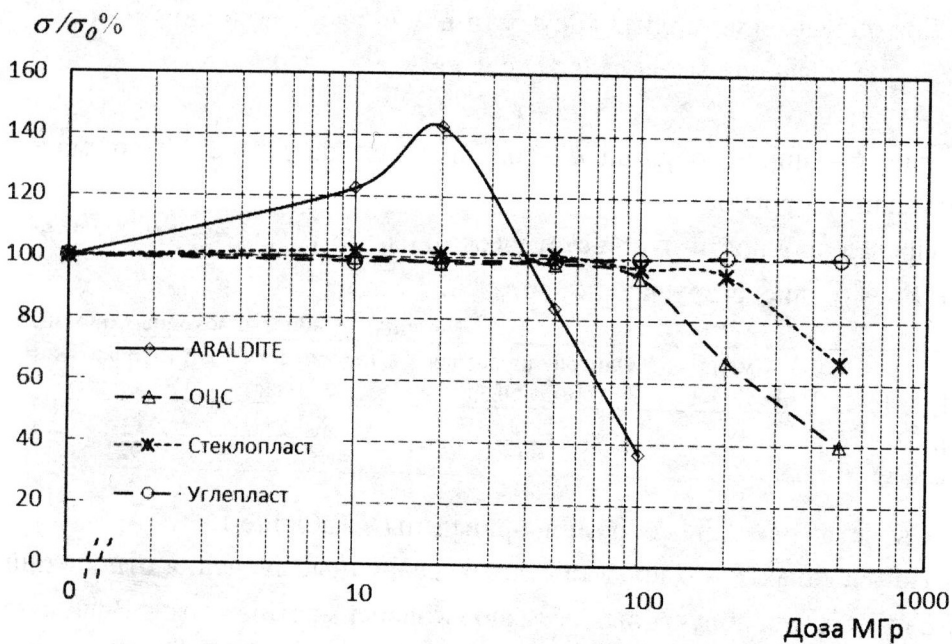
Предел прочности σ при статическом изгибе равен $\sigma = 3P_m L / 2bh^2$, где P_m – усилие, разрушающее образец.

Таблица 1. Свойства исходных образцов.

	Смола ARALDITE	Олигоциануратная смола ОЦС	Стеклопластик (Стеклопласт)	Углепластик (Углепласт)
E_0 GPa	2,1	2,55	8,4	13,4
σ_0 Мра	84	98	755	921

Свойства исходных образцов приведены в Таблице 1.

На рисунках 5 и 6 представлены усреднённые значения отношений E/E_0 и σ/σ_0 для облученных образцов в зависимости от дозы. Величина погрешностей ~10%.

Рис. 5. Изменение относительного модуля упругости E/E_0 от дозы.Рис. 6. Изменение относительного предела прочности σ/σ_0 от дозы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Радиационная стойкость компаунда ARALDITE соответствует литературным данным по эпоксидным смолам [5]. ARALDITE при дозе более 50 МГр теряет эластичные свойства, становится хрупким, легко разрушаемым, но упругие свойства (модуль E) при малых деформациях сохраняются. Подъем характеристик при дозе 10÷20 МГр объясняется, вероятно, процессом радиационной дополимеризации смолы.

Связующее и композиты на основе олигоциануратной смолы до 100 МГр свойства не меняют. При дозе более 200 МГр связующее начинает терять эластичные свойства, при дозе 500 МГр становится хрупким, легко разрушаемым.

Стеклопластик при 500 МГр теряет ~30% прочности, причем наблюдается расслаивание образцов при изломе, которое отсутствовало при меньших дозах.

Углепластик не менял свойства до 500 МГр, что объясняется, вероятно, большей прочностью и ориентацией волокон вдоль образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бовей Ф. Действие ионизирующих излучений на природные и синтетические полимеры / Пер. с англ. М.: ИИЛ, 1959. 295 с
2. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры / Пер. с англ. М.: ИИЛ, 1962. 522 с.
3. Действие радиации на органические материалы. Сост. Р. Болт и Дж. Кэррол / Пер. с англ. под ред. В.Л. Карпова. М.: Атомиздат, 1965. 409 с.
4. Князев В.К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
5. Радиационная стойкость материалов. Справочник. Под общей редакцией В.Б.Дубровского. М.: Атомиздат, 1973. 264 с.
6. A. Nishimura, Y. Izumi, M. Imazumi and S. Nisijima. Radiation effect on interlinear shear strength of the electric insulation system with cyanate ester and epoxy blended resin. AIP Conf. Proc. 1435, 99 (2012); doi: 10.1063/1.4712085
7. P.M. Visakh, O.B. Nazarenko, C. Sarath Chandran, T.V. Melnikova, S.Yu. Nazarenko, J.-C. Kim. Effect of electron beam irradiation on thermal and mechanical properties of aluminum based epoxy composites. Radiation Physics and Chemistry 136 (2017) 17–22.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X16306351>
8. В.В. Петров, Ю.А. Пупков. Радиационная стойкость изоляционных материалов магнитных систем ускорителей. ЖТФ №7, 2016, стр. 65.
<http://journals.ioffe.ru/articles/43317>
9. V. Sadykov, N. Mezentseva, V. Usoltsev, E. Sadovskaya, A. Ishchenko, S. Pavlova, Y. Bepalko, T. Kharlamova, E. Zevaka, A. Salanov, T. Krieger, V. Belyaev, O. Bobrenok, N. Uvarov, Yr. Okhlupin, O. Smorygo, A. Smirnova, P. Singh, A. Vlasov, M. Korobeynikov, A. Bryazgin, P. Kalinin, A. Arzhannikov. Solid oxide fuel cell composite ca-

thodes based on perovskite and fluorite structures. *Journal of Power Sources* 196 (2011) 7104–7109.

10. В. Садыков, В. Усольцев, Ю. Федорова, В. Собянин, П. Калинин, А. Аржанников, А. Власов, М. Коробейников, А. Брызгин, А. Саланов, М. Предтеченский, О. Бобренок, А. Улихин, Н. Уваров, О. Смoryго, А. Ильющенко, В. Ульяницкий, С. Злобин. Дизайн среднетемпературных твердооксидных топливных элементов на пористых подложках из деформационно упрочненного Ni-Al сплава. *Электрохимия*, 2011, Т. 47, № 4, с. 517–523.