

## 06 Радиационная стойкость изоляционных материалов магнитных систем ускорителей

© В.В. Петров, Ю.А. Пупков

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
e-mail: Yu.A.Pupkov@inp.nsk.su

(Поступило в Редакцию 13 июля 2015 г.)

Приведены результаты измерения радиационной стойкости стеклотекстолитов, пропиточных эпоксидных и силиконовых компаундов, лавсана и других материалов, используемых при создании ускорителей частиц. Облучение произведено на ускорителе электронов ИЛУ-6 до доз 30–100 MGy. Даны рекомендации по применению изоляционных материалов.

### Введение

В настоящей работе обобщены данные по радиационной стойкости некоторых материалов, применяемых при создании электромагнитов ускорителей в Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ), описывается методика исследований. Результаты могут использоваться при проектировании новых изделий, а методики испытаний — для тестирования других материалов.

Литературные данные [1–5] дают большой разброс в результатах, поскольку радиационная стойкость материалов может существенно зависеть от условий их изготовления и испытания. Поэтому испытания материалов проведены в условиях их предполагаемой эксплуатации. Исследовались изменения механических и электроизоляционных свойств конкретно используемых материалов под действием излучения.

Необходимо было подтвердить возможность применения отечественных материалов для создания магнитных систем ускорителей, предназначенных для зарубежных научных центров.

### 1. Источник облучения

Облучение образцов материала проводилось на воздухе развернутым пучком ускоренных электронов на ускорителе ИЛУ-6 квазинепрерывного действия при следующих параметрах пучка [6,7]: энергия 2.0 MeV, средняя мощность 3–10 kW, зона облучения  $15 \times 100$  см, мощность дозы 2–6 kGy/s.

Автоматизированная система управления ускорителем обеспечивает набор заданной дозы с погрешностью не более 10% и воспроизводимость режима с погрешностью не более 2%. С учетом неопределенности вклада рассеянных и отраженных от коллектора электронов результирующая погрешность в оценке усредненной по толщине образца дозы не превышает 20%.

Система управления обеспечивает также поддержание заданной температуры образца в процессе облучения. В данных испытаниях температура образца поддерживалась в пределах 70°C.

Облучаемые образцы размещались на медном водоохлаждаемом коллекторе размером  $3 \times 60$  см и прижимались к нему алюминиевой фольгой толщиной 0.1 mm, являющейся одновременно защитой от малоэнергетичных рассеянных электронов.

Толщина образцов выбиралась в пределах 0.05–0.3 пробега электронов с заданной энергией в испытываемом материале. Облучение проводилось дозами 0.1, 1, 3, 10, 30, 50, 100 MGy.

### 2. Радиационная стойкость стеклотекстолитов и эпоксидных компаундов

Испытывались следующие типы материалов.

1. Стеклотекстолит ТСП-85 (TSP-85) — отечественный стеклотекстолит, пропитка стеклоткани Т-10-80 полиаминоимидным связующим ПАИС-105П.
2. Стеклотекстолит СТЭФ-1 (STEF).
3. Стеклотекстолит G-10, производство США.
4. Эпоксидный пропиточный компаунд горячего отверждения ЭПК-1 ИЯФ (ЕРК-1 INP).
5. Эпоксидный пропиточный компаунд, производство США (EIC USA).
6. Препрег ППМ-609 (PPM-609).

Компаунд ЭПК-1 на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-16 или ЭД-20 применяется для вакуумной про-

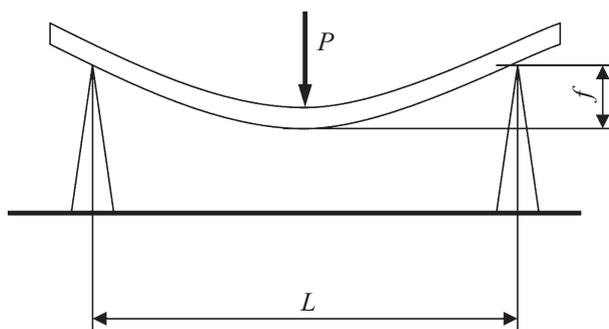


Рис. 1. Схема испытаний.

Таблица 1. Свойства необлученных материалов

Материал / Параметры	ТСП-85	СТЭФ	G-10	Компаунд ЭПК-1	Компаунд США	ППМ 609
$E_0$ , GPa	24	20	17.4	4.3	4.4	7
$\sigma_0$ , МПа	770	570	300	112	112	150

питки катушек электромагнитов. Испытания ЭПК-1 повторены через несколько лет, чтобы подтвердить, что свойства поставляемых компонент не ухудшились.

Препрег ППМ-609 — материал для горячего прессования изделий. Состоит из рубленого стекловолокна, пропитанного смолой, доведенной до полутвержденного состояния. Прессованные детали применялись в качестве заполнителя, так же как и детали из стеклотекстолита, при изготовлении обмоток электромагнитов.

Изготавливались образцы размером  $2 \times 10 \times 50$  mm. Для набора статистики проводилось испытание нескольких образцов при каждой дозе. Образцы сравнивались по двум механическим характеристикам материала — модулю упругости  $E$  и пределу прочности  $\sigma$  при статическом изгибе.

Испытание механических свойств материала проводилось по схеме, показанной на рис. 1. Образец рас-

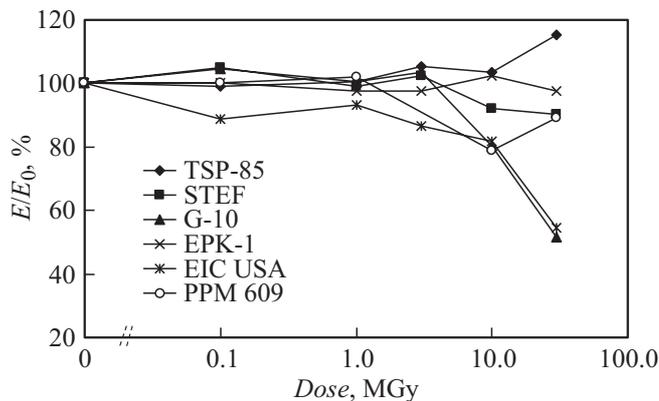


Рис. 2. Относительное изменение модуля упругости в зависимости от дозы.

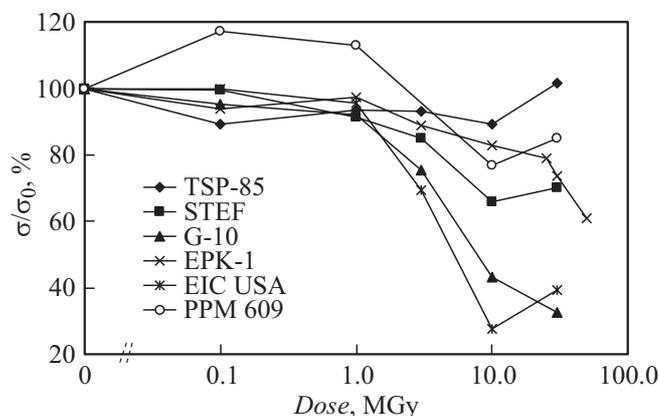


Рис. 3. Относительное изменение предела прочности в зависимости от дозы.

полагался на двух опорах с расстоянием между ними  $L = 30$  mm. По линии, расположенной между опорами и на равном расстоянии от них, образец нагружался изменяемым фиксируемым усилием  $P$ , фиксировался прогиб образца  $f$ . Образец нагружался до разрушения.

Модуль упругости  $E$  определяется соотношением  $E = PL^3/4fbh^3$ , где  $b$  — ширина образца,  $h$  — толщина образца,  $f = 0.2-0.6$  от максимального прогиба.

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

В табл. 1 приведены модули упругости  $E_0$  и предел прочности  $\sigma_0$  необлученных материалов, хорошо соответствующие справочным данным.

На рис. 2 и 3 представлены изменения  $E/E_0$  и  $\sigma/\sigma_0$  облученных образцов относительно исходных. Величины погрешностей  $\sim 10\%$ .

Из приведенных результатов видно, что прочностные характеристики материалов ( $\sigma/\sigma_0$ ), кроме ТСП-85, деградируют с поглощенной дозой значительней, чем их упругие свойства ( $E/E_0$ ). Характеристики ТСП-85 при достигнутых дозах не изменились, что подтвердило хорошую радиационную стойкость полиаминоимидных веществ.

Радиационная стойкость отечественных материалов оказалась выше, чем у образцов, представленных Лабораторией SSC (США).

Предполагая допустимым изменение характеристик материала на 50%, стеклотекстолит СТЭФ и компаунд ЭПК-1 можно применять до доз 30–50 МГу, стеклотекстолит G-10 — до 10 МГу, стеклотекстолит ТСП-85 — свыше 30–50 МГу, определив верхнюю границу применимости.

### 3. Радиационная стойкость полимера „Эластосил“

Полимер „Эластосил заливающий 137-312 ТУ 6-02-1-566-88“ является материалом с высокой теплопроводностью, полимеризуется при смешении компонент при нормальной температуре, пластичный. Состав — силиконовый каучук СКТН, нитрид кремния, алоксисилоксан. Используется также как компаунд „Виксинт К-68“, для упруго-эластичной фиксации радио- и электротехнических компонент в конструкциях ускорителей.

Образцы для испытаний изготавливались заливкой в металлическую форму с вакуумированием и последующей полимеризацией под давлением 2.5 МПа при температуре 25°C. Размер образцов —  $0.6 \times 10 \times 50$  mm.

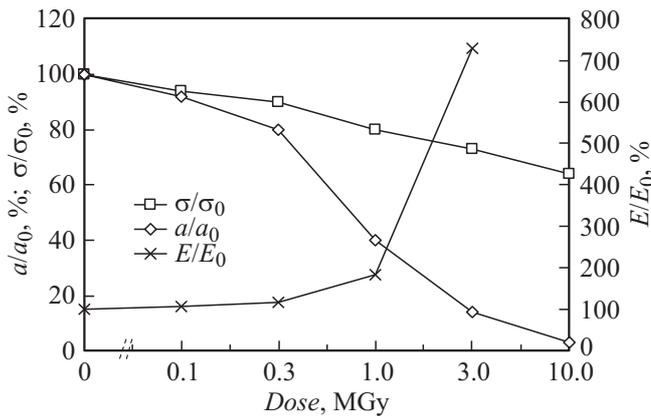


Рис. 4. Влияние радиации на основные характеристики „Эластосила“.

Испытания проводились на трех образцах при каждой дозе.

Испытание механических свойств материала — на растяжение и на разрыв.

При испытании фиксировались: усилие  $P$  при удлинении  $f$  ( $f \sim 0.2f_m$ ), усилие  $P_m$  и удлинение  $f_m$  в момент разрыва образца.

Рассчитывались: разрушающее напряжение при растяжении  $\sigma_m = P_m/(bh)$ , относительное удлинение при разрыве  $a\% = 100f_m/L$ , модуль упругости  $E = PL/(fbh)$ .  $L, b, h$  — длина, ширина и толщина образца.

Свойства необлученных образцов: модуль упругости  $E_0 = 81$  МПа; относительное удлинение при разрыве  $a_0 = 80\%$ , напряжение при разрыве  $\sigma_{m_0} = 45.6$  МПа.

На рис. 4 приведены относительные изменения этих свойств при облучении. Погрешность составляет  $\sim 15\%$ .

При дозе более 1 MGy, не теряя прочности, „Эластосил“ теряет пластичность, становится жестким. Допуская 50% изменения любой из измеренных характеристик материала, возможно применение „Эластосила“ до доз  $\sim 1$  MGy.

#### 4. Радиационная стойкость пленочных материалов

Испытывались пленочные материалы (ленты) из полиэтилентерефталата, имеющего наименование „Лавсан“ в РФ, „Майлар“ и „Дакрон“ в США, а также полиимидная пленка ПМ, международное наименование „Каптон“. Ленты применяются как первичный изолятор пропитываемых обмоток.

Исследовались электрическая прочность на пробой и механическая прочность лент в зависимости от дозы облучения.

Для измерения пробивного напряжения  $U$  пленки зажимались между заземленной медной пластиной и шиной размером  $4.5 \times 1.6$  mm. Усилие прижатия  $2 \text{ kg/cm}^2$ .

Для измерения механической прочности  $P$  склеивалось по 10 слоев ленты „Майлар“ (фирмы ЗС, США)

шириной 25.4 mm и аналогично с лентой лавсан ЛТ-19 шириной 19 mm. Толщины лент без клеящего подслоя 0.025 mm. Склеенные ленты плавно сужены до ширины 10 mm в середине для фиксации места разрыва.

В табл. 2 приведены результаты испытаний этих лент. Погрешность составляет  $\sim 20\%$ .

Из результатов табл. 2 следует, что в пределах погрешностей свойства лавсана и майлара идентичны. Рабочий диапазон доз не должен превышать 1–3 MGy.

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [1] о том, что покрытия из полиэтилентерефталата рекомендуются использовать при дозах облучения не более 5 MGy.

Исследовалась полиимидная пленка ПМ-А (каптон) толщиной 0.04 и 0.08 mm. До доз 30 MGy изменений электрической прочности и механической прочности не наблюдалось.

Таблица 2. Свойства лавсана и майлара при облучении

Материал	Испытание	Доза, MGy					
		0	0.1	1	3	10	30
Лавсан	$U, \text{ kV}$	5.4	6.0	7.85	6.6	2.4	1.4
	$P, \text{ kg}$	40	37	41	26*	0**	
Майлар	$U, \text{ kV}$	7.5	6.8	6.7	7.5	3.1	1.7
	$P, \text{ kg}$	43	40	41.5	22.5*	0**	

Примечание. \* образец становится хрупким, \*\* образец очень хрупкий, ломается при заправке в станок.

#### 5. Радиационная стойкость изоляции обмоточных проводов (шин)

Испытывались три типа шин разных номиналов сечения, используемых для изготовления обмоток электромагнитов. Типы шин: ПСДТ, ПСДТ-Л, ПСД со стекловолоконистой изоляцией с пропиткой нескольких разновидностей.

До дозы 10 MGy напряжение пробоя изоляции не изменилось. При дозе 30 MGy напряжение понижается примерно на 20%.

Принимая допустимым 50% снижение свойств изоляции в процессе эксплуатации, возможно использование шин при дозах до 30 MGy.

#### 6. Радиационная стойкость полиуретана, полистирола и полиэтилена высокого давления, краски

Оценка влияния облучения на эти материалы произведена качественно, без механических и других испытаний. Контролировались изменения цвета, агрегатного состояния — эластичный, хрупкий.

Сформулированы следующие рекомендации по применению.

- Полиуретан марки СКУ-ПФЛ-100 — допустимы дозы до 10 MGy, далее теряет эластичность.
- Полистирол — доза 1 MGy уже не допустима, становится хрупким.
- Полиэтилен высокого давления — допустимы дозы до 30 MGy, далее меняет цвет, размягчается.
- Краски: лак ЭП-730 с нитрокраской НЦ-25 меняет цвет при дозе 0.3 MGy, ЭП-51 — при 10 MGy, МЛ-12, МЛ-152, ЭП-140, Sadolyn 012 до доз 30 MGy не меняют свойств.

## 7. Радиационная стойкость электроизоляционного покрытия стального листа

Проверялась радиационная стойкость электроизоляционного покрытия электротехнической стали, из которой изготавливались шихтованные магниты. Покрытие типа ТШ (термостойкое электроизоляционное покрытие, улучшающее штампуемость) содержит ортофосфорную кислоту, поливиниловый спирт, окиси магния, алюминия, эфир.

Испытывалась сталь марки 2312, ГОСТ 21427-2.83 толщиной 0.5 mm производства Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) и марки 21848 толщиной 1 mm производства Верх-Исетского металлургического завода (ВИЗ).

Контролируемые параметры — электросопротивление покрытия, напряжение пробоя, механическая прочность покрытия.

Сталь производства НЛМК испытывалась в пакетах из образцов 30 × 30 mm. Пакеты зажимались между электродами с усилием 10 kg/cm<sup>2</sup>. Измерялось сопротивление пакета при напряжении ~ 0.5 V на лист, далее напряжение повышалось до пробоя и фиксировалось. Пакеты менялись и перебирались, измерения повторялись несколько раз.

Сталь производства ВИЗ испытывалась на образцах, вырезанных из различных участков рулонов, прижимными электродами. Полированные электроды — Ø 20 mm прижимались с усилием ~ 3 kg с двух сторон образца. Измерялось сопротивление на разных участках образца и разных образцах.

Прочность покрытия определялась, согласно п.4.13. ГОСТ-21427.2-83, изгибом образцов на цилиндре диаметром 20 mm. Контролировалось отсутствие трещин и отслаивания покрытия.

Измерения проводились на необлученных и на идентичных образцах после облучения дозой до 100 MGy.

Результаты испытаний: сопротивление изоляции и напряжение ее пробоя не менялись при поглощенной дозе до 100 MGy, прочность покрытия и сцепление со сталью остались неизменными. Высокая радиационная стойкость покрытия типа ТШ показала конкурентоспособность с неорганическими фосфатными или оксидными покрытиями, создающими проблемы с работоспособностью штампов.

Электротехнические стали с покрытием ТШ использовались для магнитов установок LEB (США), SLS (Швейцария), КЕК (Япония), MBG и QTG (ЦЕРН).

## Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность применения отечественных изоляционных материалов. Полученные данные используются в Программах гарантии качества (QAP) при изготовлении магнитов.

Определив дозные поля в ускорителях, возможно предсказывать продолжительность работоспособности магнитов, принимать необходимые меры по локальной радиационной защите изделий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00080). Авторы благодарят В.И. Сербина и И.Л. Чертка за помощь в проведении исследований.

## Список литературы

- [1] *Радиационная стойкость материалов. Справочник* / Под общей ред. В.Б. Дубровского. М.: Атомиздат, 1973. 264 с.
- [2] *Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры* / Пер. с англ. М.: ИИЛ, 1962. 522 с.
- [3] *Князев В.К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении*. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
- [4] *Действие радиации на органические материалы*. Сост. Р. Болт и Дж. Кэррол / Пер. с англ. под ред. В.Л. Карпова. М.: Атомиздат, 1965. 409 с.
- [5] *Бовей Ф. Действие ионизирующих излучений на природные и синтетические полимеры* / Пер. с англ. М.: ИИЛ, 1959. 295 с.
- [6] *Auslander V.L. // NIM, Section B, Beam Interactions with Materials and Atoms. 1994. Vol. 89. N 1-4. P. 46-48.*
- [7] *Auslander V.L. и др. // Вестник Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика. 2006. Т. 1. № 2. С. 89-96.*