

УЧРЕЖДЕНИЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

В.В. Петров, Ю.А. Пупков

ИСПЫТАНИЯ В ИЯФ  
РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ СОЗДАНИИ  
МАГНИТНЫХ СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ

ИЯФ 2010-1

НОВОСИБИРСК  
2010

## Содержание

Введение .....	3
1. Радиационная стойкость стеклотекстолитов и эпоксидных компаундов..	4
1.1. Сравнительные испытания стеклотекстолитов и эпоксидных компаундов .....	4
1.2. Дополнительная проверка радиационной стойкости эпоксидного компаунда ЭПК-1 .....	7
1.3. Полимерный материал "Препрег ППМ-609" .....	8
2. Радиационная стойкость полимера "Эластосил" .....	9
3. Радиационная стойкость полиуретана, полистирола и полиэтилена высокого давления .....	11
4. Радиационная стойкость майлара и лавсана .....	11
4.1. Электрическая прочность .....	11
4.2. Механическая прочность .....	12
5. Радиационная стойкость полиимидной пленки ПМ .....	14
6. Радиационная стойкость изоляции обмоточных проводов (шин) .....	15
7. Радиационная стойкость различных типов красок .....	17
7.1. Проверка влияния облучения на краску на ускорителе ИЛУ-6 .....	17
7.2. Проверка влияния облучения на белую краску ЭП-140 на ускорителе ЭЛВ-6 .....	18
8. Радиационная стойкость электроизоляционного покрытия стального листа .....	19
Литература .....	21
Приложение 1 .....	22
Приложение 2 .....	23
Приложение 3 .....	28

---

## Введение

В работе обобщены данные по радиационной стойкости некоторых материалов, применяемых при создании электромагнитов ускорителей. Приводятся данные, полученные при исследованиях в ИЯФ и в других организациях. Описывается методика исследований, примененная в ИЯФ. Результаты могут использоваться при проектировании новых изделий, а методики испытаний – для тестирования других материалов.

Вопрос о радиационной стойкости материалов серьезно встал при изготовлении магнитов для проекта SSC (США) в 1992 году. Необходимо было проверить возможность применения отечественных материалов для магнитов – стали, эпоксидной смолы, различных изоляционных и других материалов. Такой же вопрос возникал и при выполнении последующих контрактов.

Работа проводилась в течение 1992 – 2003 гг. В разные периоды в работе принимали участие В.В. Петров, В.А. Поляков, Ю.А. Пупков, В.И. Сербин, И.Л. Черток.

Литературные данные, например, [1] ÷ [12], дают большой разброс в результатах, поскольку радиационная стойкость материалов может существенно зависеть от конкретных условий их изготовления и испытания (вид радиации, режим облучения – непрерывное или импульсное, кратковременное или длительное, на воздухе или в вакууме, при различных мощностях дозы в процессе испытаний и пр.). В частности, влияние радиационного окисления на воздухе может приводить к большим повреждениям при малых мощностях доз при фиксированных интегральных дозах. Поэтому испытания материалов проведены в условиях их предполагаемой эксплуатации.

Исследовались, в основном, изменения механических и электроизоляционных свойств материалов под действием излучения.

Облучение образцов материала, если это не оговорено особо, проводилось на воздухе, при комнатной температуре, развернутым пучком ускоренных электронов на ускорителе ИЛУ-6 квазинепрерывного действия при следующих параметрах пучка:

Энергия, МэВ	2.0
Средняя мощность, кВт	3 ÷ 10
Зона облучения, см	15×100
Мощность дозы, кГр/сек.	2 ÷ 6

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.

## 1. Радиационная стойкость стеклотекстолитов и эпоксидных компаундов

### 1.1. Сравнительные испытания стеклотекстолитов и эпоксидных компаундов

Испытывались следующие типы материалов:

1. Стеклотекстолит ТСП-85 (отечественный стеклотекстолит, пропитка стеклоткани Т-10-80 полиаминоимидным связующим ПАИС-105П).
2. Стеклотекстолит СТЭФ (см. Приложение 2).
3. Стеклотекстолит G-10 (США).
4. Эпоксидный пропиточный компаунд ЭПК-1 ИЯФ (см. Приложение 2).
5. Эпоксидный пропиточный компаунд (США).

Из испытываемых материалов изготавливались образцы размером 2×10×50 мм.

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

Толщина образца выбиралась в пределах 0.05 ÷ 0.3 пробега электронов с заданной энергией в испытываемом материале. Облучение проводилось дозами: 0.1, 1, 3, 10, 30 МГр.

Для набора статистики проводилось испытание нескольких образцов (от 2 до 6 в зависимости от наличия материала) при каждой дозе. Образцы сравнивались по двум механическим характеристикам материала – по модулю упругости  $E$  и пределу прочности  $\sigma$  при статическом изгибе.

Испытание механических свойств материала проводилось по следующей схеме (Рис. 1):

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

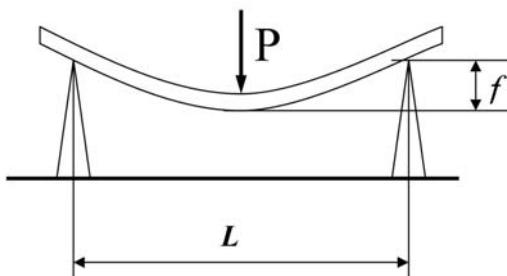


Рис. 1. Схема испытаний.

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

$$\sigma = 3P_m L / 2bh^2,$$

где  $P_m$  – усилие, разрушающее образец.

В таблице 1 приведены модули упругости  $E_0$  и предел прочности  $\sigma_0$  материалов необлученных образцов. Они хорошо соответствуют справочным данным.

Таблица 1

	ТСП - 85	СТЭФ	G - 10	Компаунд ЭПК-1	Компаунд США
$E_0$ ГПа (кГ/мм <sup>2</sup> )	24 (2400)	20 (2000)	17.4 (1740)	4.3 (430)	4.4 (440)
$\sigma_0$ МПа (кГ/мм <sup>2</sup> )	770 (77)	570 (57)	300 (30)	112 (11)	112 (11)

Далее рассматривалось изменение  $E / E_0$  и  $\sigma / \sigma_0$  облученных образцов относительно исходных. Результаты представлены на рис. 2 и 3. Там же для двух материалов показаны характерные величины погрешностей.

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

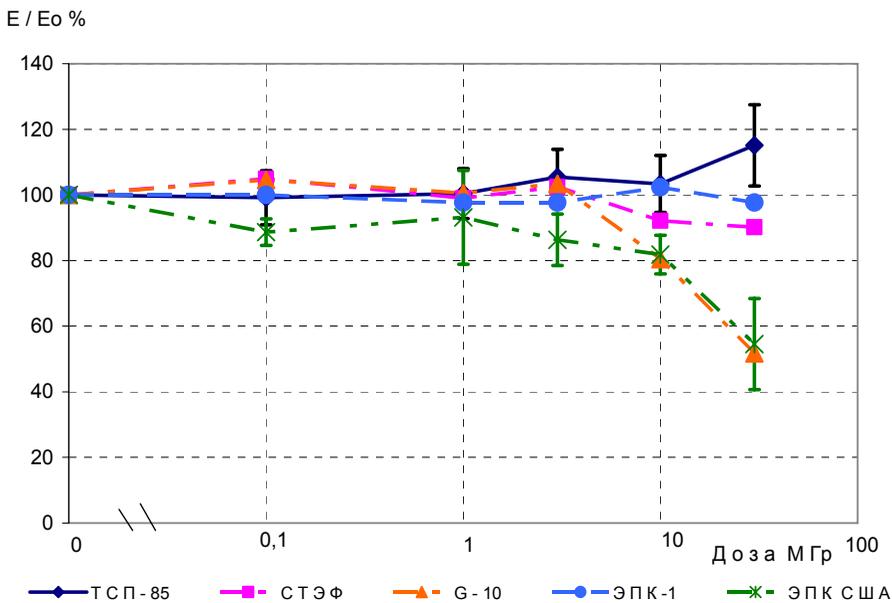


Рис. 2. Относительное изменение модуля упругости в зависимости от дозы.

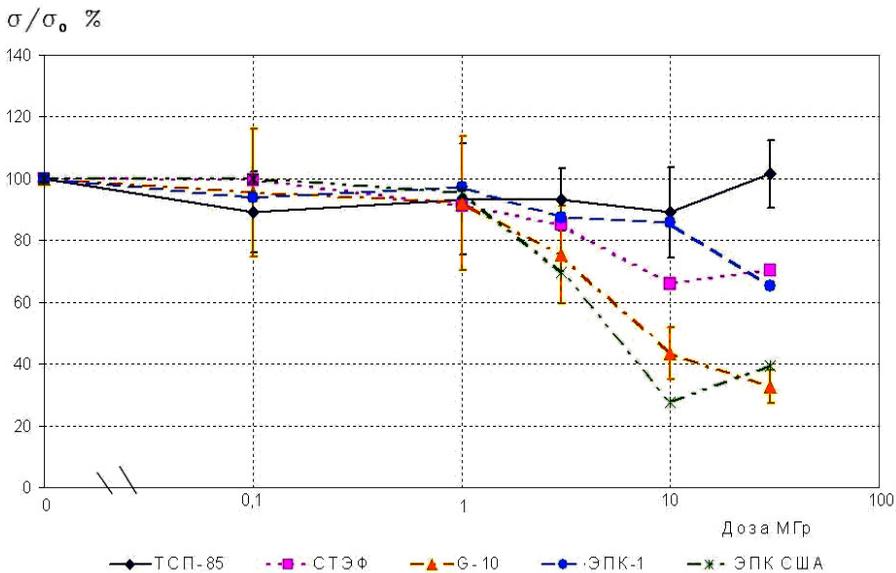


Рис. 3. Относительное изменение предела прочности в зависимости от дозы.

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

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

## **1.2. Дополнительная проверка радиационной стойкости эпоксидного компаунда ЭПК-1**

Дополнительная проверка ЭПК-1 была проведена почти через 10 лет после первых испытаний. Необходимо было подтвердить, что свойства поставляемых компонент не ухудшились. Была увеличена максимальная доза облучения. Была также стабилизирована температура образцов.

Облучение проводилось электронами из импульсного ускорителя ИЛУ-6.

Размеры образцов  $80 \times 10 \times 3$  мм. Для охлаждения образцы помещались в проточную воду (дистиллят) так, что образцы всегда были покрыты слоем воды толщиной  $2 \div 3$  мм. Исключалось влияние образующегося в воздухе озона. Температура образцов во время облучения контролировалась термомпарой и не превышала  $25^{\circ}\text{C}$ .

Проводилось облучение нескольких групп образцов:

1. Образцы, охлаждаемые водой, после облучения половинной дозой переворачивались. Дозы 10 и 30 МГр.
2. Такие же образцы и условия облучения, что и в п.(1). Дозы 30 и 50 МГр.
3. Такие же образцы и условия облучения, что и в п.(1). Дозы 25 и 50 МГр.

### Результаты:

- После облучения дозой 10 МГр образцы слегка потемнели, после 25 – 30 МГр – почернели;
- После облучения дозой 25 – 30 МГр образцы остались без видимых деформаций;
- После дозы 50 МГр образцы слегка изогнулись (стрелка прогиба  $\leq 0.5$  мм).

Предел прочности  $\sigma$  при статическом изгибе испытанных образцов приведен на рис. 4. Для сравнения на графике приведены также результаты измерений, проведенных в 1992 году.

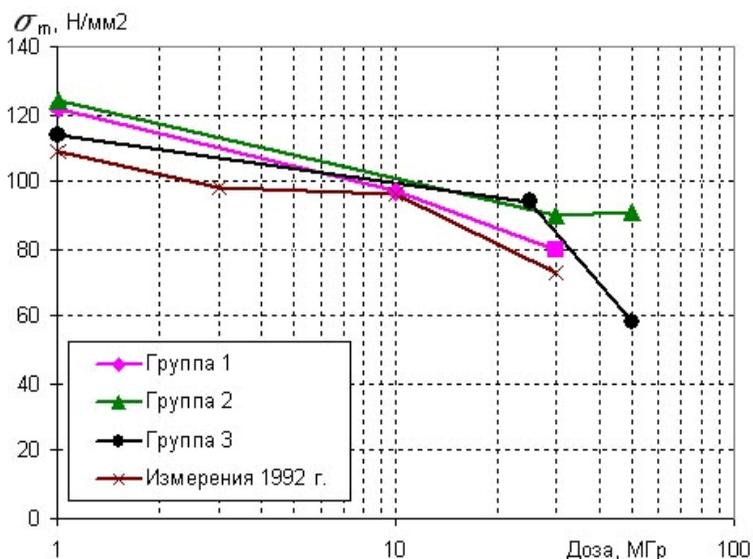


Рис. 4. Зависимость предела прочности компаунда ЭПК-1 от дозы.

Заключение. Если считать допустимым изменение характеристик материала на 50%, возможно применение компаунда ЭПК-1 до доз ~50 МГр.

### 1.3. Полимерный материал "Препрег ППМ-609"

Препрег ППМ-609 – материал для горячего прессования изделий. Состоит из рубленого стекловолокна, пропитанного смолой, доведенной до полутвержденного состояния. Прессованные детали применялись в качестве заполнителя при изготовлении обмоток магнитов.

Методика и схема испытаний аналогична вышеописанной в разделе 1.1.

Из испытываемых материалов изготавливались образцы размером 3×10×50 мм.

Облучение проводилось дозами: 0,1, 1, 10, 30 МГр.

Для набора статистики испытывались по 6 образцов при каждой дозе.

При испытаниях фиксировались нагрузка  $P$  и прогиб  $f$ .

Определялся предел прочности материала  $\sigma_m$ , соответствующий нагрузке разрушения образца, и относительное изменение модуля упругости материала  $E/E_0 = P(e)/P(e)_0$ .

У необлученных образцов модуль упругости  $E = 7$  ГПа (700 кГ/мм<sup>2</sup>), предел прочности при статическом изгибе  $\sigma_m = 150$  МПа (15 кГ/мм<sup>2</sup>) (см. Рис. 5).

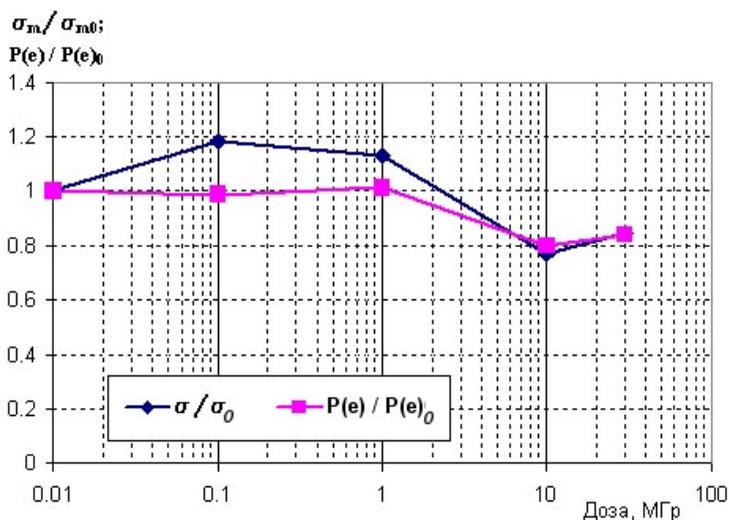


Рис. 5. Радиационная стойкость материала "Препрег ППМ-609".

**Заключение.** Предполагая допустимым на 50% изменение исследуемых свойств, "Препрег ППМ-609" может использоваться до поглощенных доз ~30 МГр. По радиационной стойкости он не хуже стеклотекстолита СТЭФ. Целесообразно использовать при массовом производстве фигурных закладных деталей.

## 2. Радиационная стойкость полимера "Эластосил"

Полимер "Эластосил заливочный 137-312 ТУ 6-02-1-566-88" является материалом с высокой теплопроводностью.

Основной состав:

1. Силиконовый каучук СКТН.
2. Нитрид кремния.
3. Алоксисилоксан.

Образцы для испытаний изготавливались заливкой в металлическую форму с вакуумированием и последующей полимеризацией под давлением 2.5 МПа при температуре 25°C. Размер образцов – 0.6×10×50 мм. Для набора статистики проводились испытания трех образцов при каждой дозе.

Облучение проводилось следующими дозами: 0.1, 0.3, 1, 3, 10 МГр.

Испытание механических свойств материала проводилось на разрывной установке при рабочей длине образца  $L = 30$  мм.

При испытании фиксировались:

- усилие  $P_m$  в момент разрыва образца;
- удлинение  $f_m$  в момент разрыва образца;
- усилие  $P_e$  при удлинении  $f_e$  ( $f_e \sim 0.2f_m$ ).

По результатам испытаний рассчитывались (см. Рис. 6):

- разрушающее напряжение при растяжении:  $\sigma_m = P_m / (b \cdot h)$ , где  $b$  – ширина и  $h$  – толщина образца;
- относительное удлинение при разрыве, (%):  $a = 100 f_m / L$ ;
- модуль упругости  $E$ :  $E = P_e \cdot L / (f_e \cdot b \cdot h)$ .

Необлученные образцы имели следующие свойства:

- модуль упругости  $E_0 = 81$  МПа;
- относительное удлинение при разрыве  $a_0 = 80\%$ ;
- напряжение при разрыве  $\sigma_{m0} = 45.6$  МПа.

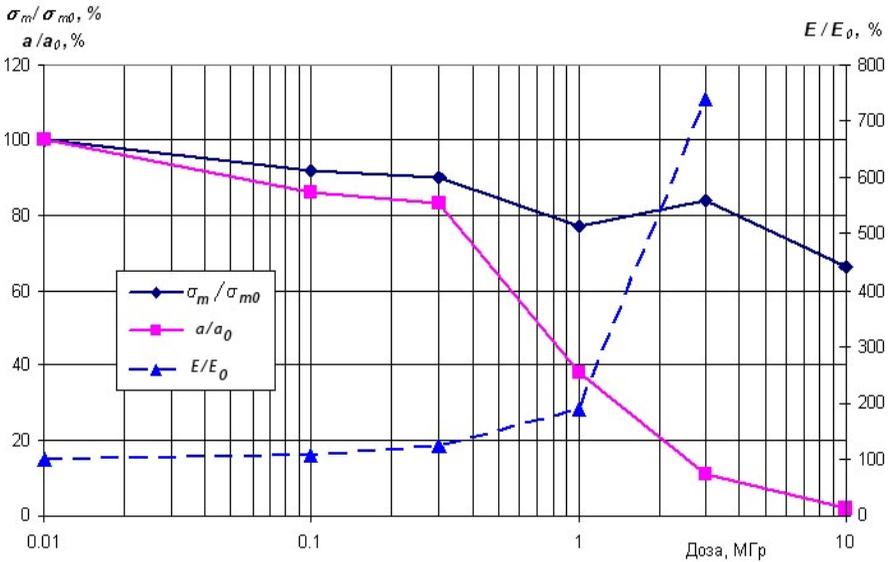


Рис. 6. Влияние радиации на основные характеристики "Эластосила".

**Закключение.** Если считать допустимым изменение любой из измеренных характеристик материала на 50%, возможно применение "Эластосила" до доз  $\sim 1$  МГр.

### 3. Радиационная стойкость полиуретана, полистирола и полиэтилена высокого давления

Оценка влияния облучения на эти материалы произведена качественно, без механических и других испытаний.

Полиуретан марки СКУ-ПФЛ-100 при дозе 1 МГр потемнел, но сохранил эластичность; при дозе 10 МГр – слабо-эластичный, близкий к хрупкому; при 30 МГр – хрупкий, вспузырившийся.

Полистирол исходный – красного цвета, упругий; при дозе 1 МГр полностью обесцвел, хрупкий; при дозе 10 МГр – резиноподобный, пластичный; при 30 МГр опять стал жестким, близким к исходному.

Полиэтилен высокого давления исходный – матово-белого цвета, упругий; при дозе 1 МГр без видимых изменений; при дозе 10 МГр пожелтел, без видимых изменений механических свойств; при дозе 30 МГр – коричневатый оттенок, менее жесток, чем исходный.

Рекомендации по применению:

- Полиуретан марки СКУ-ПФЛ-100 – допустимы дозы до 10 МГр;
- Полистирол – доза 1 МГр уже не допустима;
- Полиэтилен высокого давления – допустимы дозы до 30 МГр.

### 4. Радиационная стойкость майлара и лавсана

Полиэтилентерефталат – термореактивный полимер, получаемый поликонденсацией этилентерефталата (в СССР – лавсан), используется для изготовления жестких листов и пленок (майлар), а также прочных волокон (в Англии – терилен, в США – дакрон).

#### 4.1. Электрическая прочность

Измерялось напряжение пробоя между шиной и заземленной медной пластиной в зависимости от дозы облучения изоляции электронами с энергией 2 МэВ. Поперечный размер шины 4.5×1.6 мм.

Шина обмотана в один слой одним из типов изоляции:

- тип 1 – *лента майлар фирмы ЗС, США*, с желтым клеящим подслоем, толщина 0.06 мм;
- тип 2 – *лента лавсан ЛТ-19*, с прозрачным клеящим подслоем, толщина 0.05 мм.

Толщина пленки майлара и лавсана без липкого слоя – 0.025 мм.

Длина области соприкосновения шины с пластиной 16 мм, на краях пластины радиус закругления  $R = 1$  мм. Усилие прижатия шины к пластине 2 кг/см<sup>2</sup>.

Облучение проводилось дозами: 0.1, 1, 3, 10, 30 МГр.

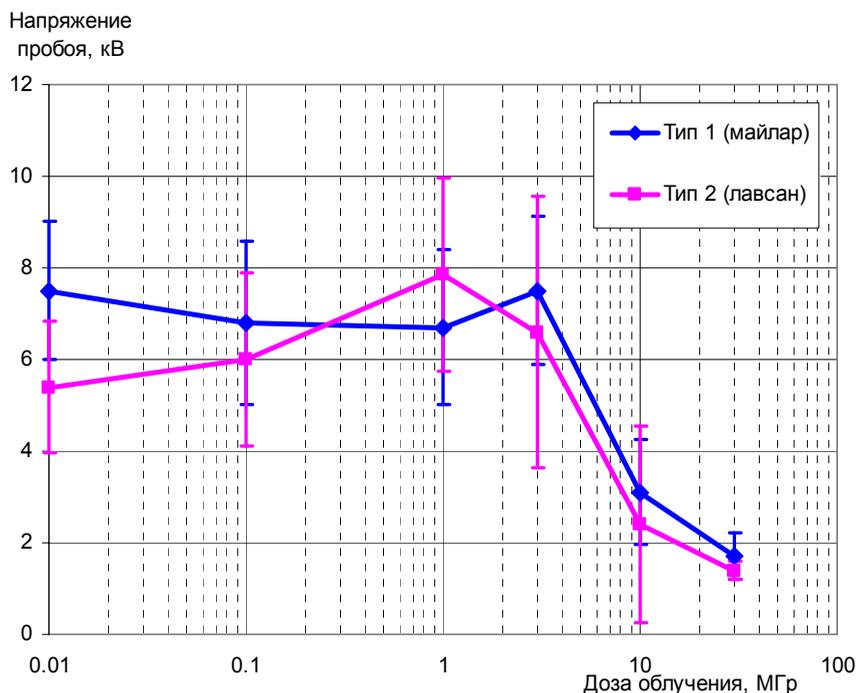


Рис. 7. Напряжение пробоя майлара и лавсана в зависимости от поглощенной дозы (среднее по 12 образцам).

Из измерений (см. Рис. 7) видно:

1. Нет принципиальных отличий в поведении электрической прочности майлара и лавсана в зависимости от облучения.
2. При фиксированной дозе облучения напряжение пробоя может значительно отличаться от образца к образцу, тем не менее, хорошо видны дозы, при которых электрическая прочность резко падает (свыше 3 МГр).

#### 4.2. Механическая прочность

Образцы для проверки:

- Тип 1 – 10 склеенных слоев ленты *майлар фирмы 3С, США*; ширина ленты 25.4 мм, для фиксации места разрыва в середине лента плавно сужена до ширины 10 мм.
- Тип 2 – 10 склеенных слоев ленты *лавсан ЛТ-19*; ширина ленты 19 мм, для фиксации места разрыва в середине лента плавно сужена до ширины 10 мм.

Проверяется усилие, при котором разрываются образцы, в зависимости от дозы облучения электронами с энергией 2 МэВ (см. Таб. 2, Рис. 8).

Таблица 2

Образец	Разрывное усилие (кг), при дозах облучения (МГр)					
	0	0.1	1	3	10	30
Тип 1 (майлар)	42.75	39.5	41.5	22.5 *)	0 **)	0 ***)
Тип 2 (лавсан)	40	37	40.75	26 *)	0 **)	0 ***)

\*) образец становится хрупким;

\*\*) образец очень хрупкий, ломается при заправке в станок;

\*\*\*) образец крошится в руках.

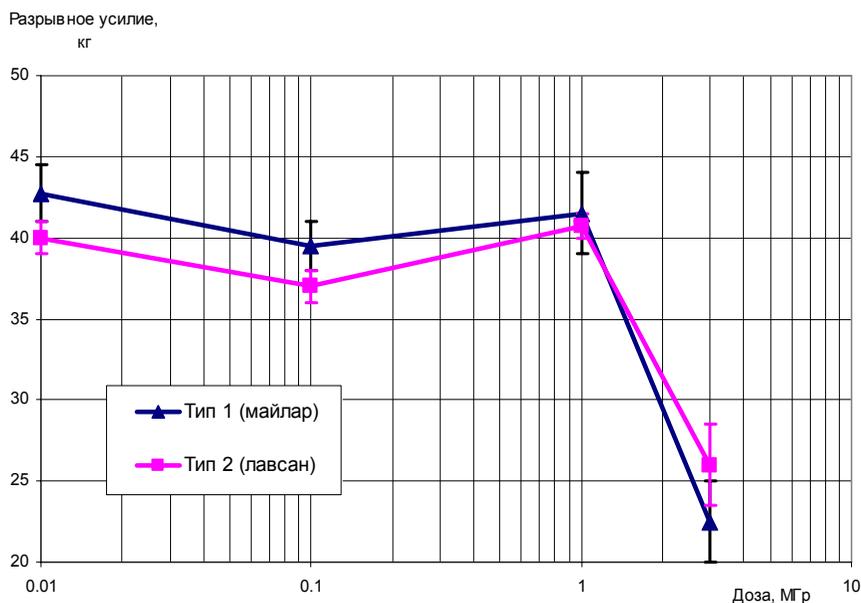


Рис. 8. Прочность майлара и лавсана на разрыв в зависимости от поглощенной дозы.

Из измерений видно:

- 1) свойства лавсана и майлара мало отличаются;
- 2) рабочий диапазон доз для майлара и лавсана не должен превышать  $1 \div 3$  МГр.

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными. В частности, согласно [1], покрытия из полиэтилентерефталата рекомендуется использовать при дозах облучения не более 5 МГр.

## **5. Радиационная стойкость полиимидной пленки ПМ**

Международное название аналогов – "каптон".

Испытывались два типа полиимидной пленки:

- 1) пленка полиимидная ПМ-А, ТУ 6-19-121-85, шириной 20 мм, толщиной 40 мкм;
- 2) "широкая" лента, толщиной 80 мкм, из которой вырезались полосы шириной 30 – 35 мм.

Образцы ленты облучались пучком электронов из ускорителя ИЛУ-6 с энергией 2 МэВ, средняя мощность пучка около 10 кВт. Дозы для разных образцов: 0,1, 1, 3, 10, 30 МГр.

Температура образцов в процессе облучения не поднималась выше 100 градусов.

Для проверки электрической прочности образцы наматывались на трубку из нержавеющей стали диаметром 40 мм, к которой прикладывалось постоянное напряжение до 10 кВ от испытательной установки УПУ-10. В качестве второго электрода использовалась такая же трубка из нержавеющей стали, расположенная перпендикулярно первой. Ввиду высокой электрической прочности испытываемой изоляции принимались меры для того, чтобы избежать пробоя по поверхности пленки.

Результаты испытаний (см. Рис. 9):

1. После облучения вплоть до максимальных доз цвет образцов практически не меняется.
2. Все образцы, как необлученные, так и облученные, выдерживают испытание постоянным напряжением 10 кВ без пробоя. При более высоком напряжении испытания не проводились. Согласно справочным данным, электрическая прочность полиимидных пленок не менее 200 кВ/мм, что соответствует 8 кВ для пленки толщиной 40 мкм. Следовательно, при дозах до 30 МГр гарантированные изоляционные свойства пленок сохраняются.
3. Прочность при разрыве образцов практически не меняется вплоть до доз 30 МГр.

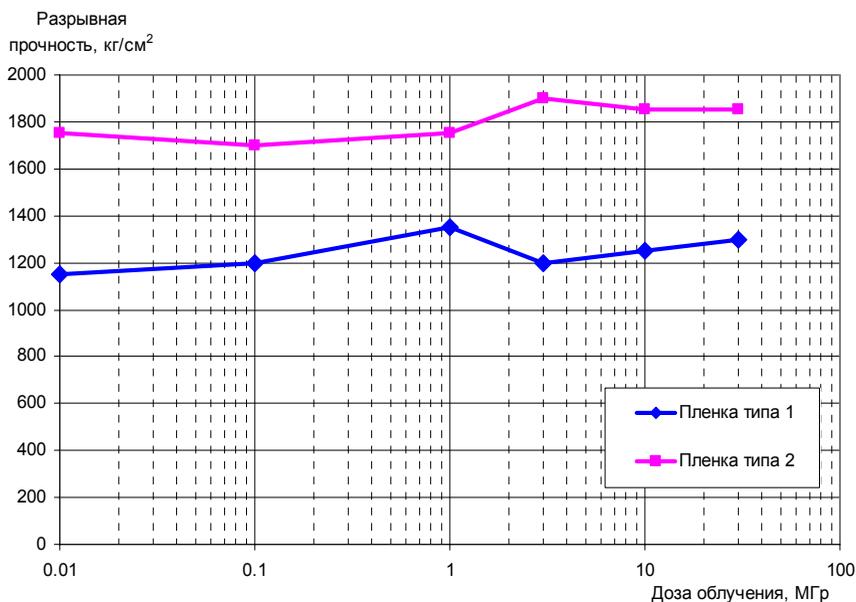


Рис. 9. Прочность полиимидной пленки на разрыв в зависимости от поглощенной дозы.

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

Испытывались несколько типов шин, используемых для изготовления корректирующих обмоток магнитов (см. Таблицу 3). Основные свойства изоляции шин представлены ниже:

1. Шина ПСДТ (ТУ16.К71-129-91) – утоненная изоляция из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком или компаундом, двух типоразмеров.
2. Шина ПСДТ-Л (ТУ16.К71-129-91) – утоненная изоляция из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком или компаундом, с поверхностным лаковым слоем, одного типоразмера.
3. Шина типа ПСД (ГОСТ 7019-80) – изоляция из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком или компаундом, двух типоразмеров.

Для всех образцов измерялось напряжение пробоя между шиной (по широкой стороне) и заземленной медной пластиной в зависимости от дозы облучения изоляции электронами с энергией 2 МэВ. Длина области соприкосновения шины с пластиной 16 мм, на краях пластины радиус закругления  $R = 1$  мм.

Таблица 3

Тип образца	Поперечные размеры шины по меди, мм×мм	Толщина шины с изоляцией, мм	Усилие прижатия шины к заземленной пластине, кг/см <sup>2</sup>	Количество образцов
ПСДТ, тип 1	2.36 × 5.6	2.73	1.6	18
ПСДТ, тип 2	2.12 × 4.5	2.49	2.0	18
ПСДТ-Л	2.8 × 6.3	3.21	3.0	6
ПСД, тип 1	1.6 × 4.5	2.0	3.5	12
ПСД, тип 2	2.8 × 8.0	3.15	2.3	12

Результаты испытаний представлены на рис. 10.

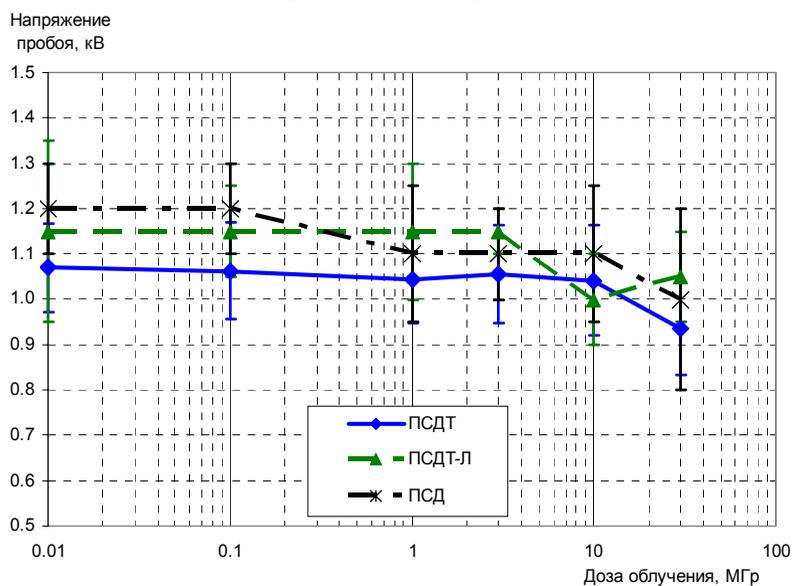


Рис. 10. Напряжение пробоя изоляции в зависимости от дозы облучения

Заключение. Если принять допустимым 50% снижение свойств изоляции в процессе эксплуатации, возможно использование шин при дозах до 30 МГр.

## 7. Радиационная стойкость различных типов красок

### 7.1. Проверка влияния облучения на краску на ускорителе ИЛУ-6

В процессе выполнения контрактов по изготовлению магнитов для SSC, КЕК и других лабораторий проводилась проверка радиационной стойкости различных типов красок для магнитов. В частности, испытывались:

1. Лак ЭП-730 плюс нитрокраска НЦ-25 (белая). Краска наносилась на зачищенную поверхность железа, без грунтовки. Сушка – естественная, без нагрева.
2. Эмаль ЭП 51 (желтая).
3. Краска МЛ-152 (оранжевая), нанесенная без предварительной грунтовки на не очищенную от изоляционного покрытия поверхность стали. Окрашенные образцы запекались в печи при температуре 60 – 80 градусов.
4. Краска МЛ-12 (красная), нанесенная без предварительной грунтовки на не очищенную от изоляционного покрытия поверхность стали.
5. Финский аналог краски МЛ-152 (красная), нанесенный поверх грунтовки ФЛ-05-К. Сушка – естественная, без нагрева.
6. Эмаль МЛ (серая).
7. Краска "GEPARD" (красная), нанесенная без предварительной грунтовки на не очищенную от изоляционного покрытия поверхность стали.
8. Финская краска САДОЛИН 012 разных цветов.
9. Порошковая краска (серо-бежевая).

Образцы облучались на воздухе, при комнатной температуре, пучком электронов из ускорителя ИЛУ-6.

Во время облучения образцы прижимались к массивной металлической плите, охлаждаемой водой. Температура образцов во время облучения не поднималась выше 70 ÷ 85 градусов. Скорость набора дозы облучения менялась от 0.4 до 5 кГр/с. Максимальная доза облучения образцов 30 МГр.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

1. Лак ЭП-730 плюс нитрокраска НЦ-25 (белая). Краска начинает менять цвет (темнеет) при дозах 0.3 МГр и более. При дозах 10 МГр и выше начинается вспучивание слоя краски.
2. Эмаль ЭП 51, желтая. Заметно изменение цвета уже при дозе 10 МГр. Заметного изменения механических свойств краски вплоть до доз 30 МГр не наблюдалось.
3. Для остальных образцов красок заметного изменения цвета и механических свойств вплоть до доз 30 МГр не наблюдалось.

## 7.2. Проверка влияния облучения на белую краску ЭП-140 на ускорителе ЭЛВ-6

Испытывалась белая краска ЭП-140 с различными добавками и при различных условиях сушки. Краска наносилась на тонкие листы стали, без грунтовки. Всего испытывались 5 типов образцов:

- (1) Образец, покрытый только краской ЭП-140, сушка на воздухе.
- (2) Образец, покрытый только краской ЭП-140, сушка с запечкой при температуре 60 – 80 градусов.
- (3) Образец, покрытый краской ЭП-140 с добавлением нитроэмали НЦ-11, сушка на воздухе.
- (4) Образец, покрытый краской ЭП-140 с добавлением окиси цинка, сушка на воздухе.
- (5) Образец, покрытый краской ЭП-140 с добавлением окиси цинка, сушка с запечкой при температуре 60 – 80 градусов.

Образцы облучались на воздухе, при комнатной температуре, пучком электронов из ускорителя ЭЛВ-6 непрерывного действия с параметрами:

Энергия электронов	1.4 МэВ
Плотность тока на образцах	0.5 мкА/см <sup>2</sup>

Образцы во время облучения приклеивались к массивной металлической плите, охлаждаемой воздушным потоком. Температура образцов во время облучения не поднималась выше 50 – 60 градусов. Скорость набора дозы облучения порядка 1 кГр/с. Максимальная доза облучения образцов 10 МГр.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

1. При сушке на воздухе образцы не меняют первоначально белый цвет.
2. При сушке с запечкой цвет образцов меняется на песочно-желтый.
3. Облучение дозами выше 3 МГр приводит к дополнительному пожелтению образцов, что, возможно, аналогично запечке, так как при облучении образцы нагревались пучком электронов (см. выше).
4. Меньше всего цвет после облучения менялся у образцов типа (4), которые при дозах 10 МГр едва заметно желтели, сильнее всего – у образцов типа (3), которые заметно желтели при дозах выше 1 МГр.
5. Заметного изменения механических свойств краски вплоть до доз 10 МГр не наблюдалось.

## 8. Радиационная стойкость электроизоляционного покрытия стального листа

Проверялась радиационная стойкость электроизоляционного покрытия типа ТШ (термостойкое электроизоляционное покрытие, улучшающее штампуемость) электротехнической стали двух производителей – Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) и Верхисетского завода (ВИЗ).

Испытывалась сталь марки 2312, ГОСТ 21427-2.83 толщиной 0.5 мм. Покрытие толщиной 0.5 мкм обеспечивает коэффициент упаковки не хуже 98%. В составе покрытия ортофосфорная кислота, поливиниловый спирт, окись магния, алюминий, эфир.

Контролируемые параметры:

- Электросопротивление покрытия до и после облучения.
- Прочность покрытия и сцепление со сталью до и после облучения.

Методика электроиспытаний стали производства НЛМК на пакетах:

- Для измерения сопротивления изоляции из листа стали размером 1.5 м × 0.3 м вырезались из разных участков образцы размером 30 × 30 мм<sup>2</sup> общим количеством 36 шт. С образцов снимались заусенцы, затем они складывались в 2 пакета по 18 шт. (толщиной 9 мм) между двумя параллельными проводящими поверхностями и зажимались с усилием ~100 кг. Измерялось сопротивление пакета в направлении, перпендикулярном плоскости листов. Величина прикладываемого напряжения  $U \geq 1$  В/мм.
- Измерения проводились до и после облучения образцов.

Методика электроиспытаний стали производства ВИЗ прижимными электродами:

- Из листа стали размером 0.5 м × 0.3 м вырезались из разных участков образцы размером 110 × 23 мм<sup>2</sup>, общим количеством 16 шт.
- Измерялось сопротивление изоляции необлученных и облученных образцов. Каждый образец зажимался между двумя полированными электродами Ø 20 мм. Усилие зажатия ~ 3 кг. На каждом образце измерения проводились в 4 – 5 точках.

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

Облучение образцов:

- Облучение образцов производилось электронным пучком, выпущенным в атмосферу из электронного ускорителя типа ИЛУ-6.
- Образцы раскладывались в месте выхода пучка в 2 слоя. Для исключения влияния образующегося большого количества озона образцы оборачивались в один слой алюминиевой фольгой толщиной 0.1 мм.
- Контролировалась температура образцов и поглощенная доза.
- Средняя мощность пучка контролировалась и регулировалась так, что температура образцов не превышала 210°C.
- Время экспозиции (10 часов) определено таким, что поглощенная доза равнялась 100 МГр.
- Поглощенная доза определена с точностью 10%.

Результаты испытаний пакетов:

- 1) Сопротивление пакета образцов до облучения при напряжении 9 вольт (1 В/мм) равнялось бесконечности. Пробой наступал при напряжении на пакете в  $45 \div 50$  вольт ( $\sim 5$  В/мм), т.е. при пятикратном превышении величины, требуемой заказчиком.
- 2) Сопротивление пакета образцов после облучения при напряжении 9 вольт (1 В/мм) равнялось бесконечности (сопротивление утечки  $> 100$  кОм). Пробой наступал при напряжении на пакете  $35 \div 45$  вольт ( $4 \div 5$  В/мм) Напряжение пробоя определялось несколько раз. После пробоя пакет разбирался, образцы перемешивались и складывались вновь.

Результаты испытаний электродами:

- 1) Сопротивление необлученных образцов  $0.4 \pm 0.2$  Ом.
- 2) Сопротивление облученных образцов  $0.5 \pm 0.3$  Ом. В пределах разброса по образцам и точкам измерения сопротивления равны.

Прочность покрытия и сцепление со сталью у облученных образцов остались такими же, как и у необлученных.

Заключение. Облучение при поглощенной дозе 100 МГр не ухудшает изоляционных свойств покрытия типа ТШ. Электротехнические стали с таким покрытием использовались для магнитов LEB (США), MBG и QTG (ЦЕРН).

## Литература

- [1] Радиационная стойкость материалов. Справочник. Под общей редакцией В.Б.Дубровского. – Москва, Атомиздат, 1973.
- [2] Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры. Перев. с англ. – М., Изд-во иностр. лит., 1962 .
- [3] Влияние излучения на материалы и элементы электронных схем. Под ред. Д.Кирхера и Р.Боумана. Перев. с англ. Под ред. В.Н.Быкова и С.П.Соловьева. – М., Атомиздат, 1967.
- [4] Князев В.К. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций Справочник. Под ред. Н.А.Сидорова и В.К.Князева. – М., "Советское радио", 1976.
- [5] Князев В.К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении. – М., Машиностроение, 1977.
- [6] Действие радиации на органические материалы. Сост. Р.Болт и Дж.Кэррол. Перев. с англ. /Под ред. В.Л.Карпова. – М., Атомиздат, 1965.
- [7] Никитина Т.С., Журавская Е.В., Кузьминский А.С. Действие ионизирующих излучений на полимеры. – М., Госхимиздат, 1959.
- [8] Бовей Ф. Действие ионизирующих излучений на природные и синтетические полимеры. Перев. с англ. – М., Изд-во иностр. лит., 1959.
- [9] Действие излучения на материалы и детали. Сб. статей. Выпуск №27. Перев. с англ. – М., Атомиздат, 1959.
- [10] Действие излучения на свойства материалов (труды конференции). – Межвузовский сборник трудов. Выпуск 2. Новосибирск, 1963
- [11] В.К. Милинчук, В.И. Тупиков, Б.А. Брикман и др. Радиационная стойкость органических материалов. Справочник. Под ред. В.К.Милинчука, В.И.Тупикова. – М. "Энергоиздат", 1986.
- [12] Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. – М.: Наука, 1987.
- [13] S. Bates, K. Sinram, D. Willis – Bonding agent shear tests on steel laminations including irradiated test pieces with radiation doses of between  $10^7$  and  $10^9$  rad. // IEEE transactions on magnetics, vol.28, No.1, January 1992, pp.904-907.

**Электроизоляционное клеевое покрытие “Stabolit 70”  
(по материалам [13])**

Электротехническая сталь с покрытием Stabolit 70 широко применяется в ИЯФ при изготовлении электромагнитов.

Stabolit 70 – это клеящий лак на основе термостойкой синтетической смолы, применяется для склеивания пластин из электротехнической стали, набираемых в блоки. Стальной лист покрывается с одной или двух сторон слоем лака толщиной ~ 6 мкм. Лаковое покрытие проходит частичную полимеризацию, без прилипания. Шихтованные блоки склеиваются при нагревании под давлением.

Лучший результат по прочности склейки получен при нагреве до 190°C и выдержке 15 минут, при этом получен предел прочности при срезе 11.9 Н/мм<sup>2</sup>, предел прочности при сдвиге 22.2 Н/мм<sup>2</sup>.

На рис. П1.1 показана зависимость от дозы облучения предела прочности для образца, склеенного Stabolit 70 и подвергнутого гамма-излучению.

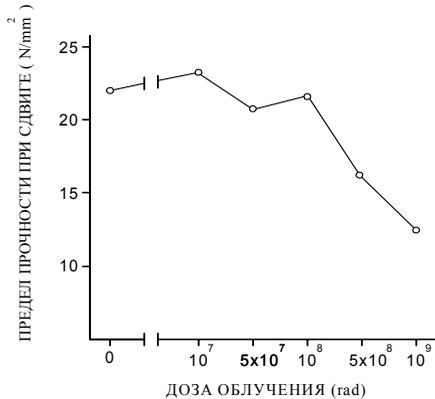


Рис. П1.1. Предел прочности облученных образцов Stabolit 70.

Значение предела прочности для образцов, подвергнутых воздействию 10<sup>9</sup> рад, составляет примерно 60% предела прочности без облучения.

**Выводы.** Метод склеивания смолой шихтованных магнитопроводов обеспечивает достаточный запас прочности при срезе и может быть применен в конструировании магнитов. Из испытанных смол Stabolit 70 показал самый высокий предел прочности при срезе. Образцы Stabolit 70 критичны к условиям отверждения, поэтому температура отверждения и время выдержки должны точно контролироваться. Температура не должна превышать 210°C для любой части блока.

**Химические, механические и электрические свойства российских электроизоляционных материалов, применявшихся при испытаниях  
(По материалам соответствующих Государственных Стандартов и Технических Условий производителей)**

**1. Эпоксидный пропиточный компаунд ЭПК-1**

Эпоксидный пропиточный компаунд ЭПК-1 предназначен для вакуумной пропитки катушек магнитов, склейки концевых пакетов.

1.1. Состав эпоксидного компаунда ЭПК-1 в весовых частях:

• Эпоксидно-диановая смола ЭД-16	100
• Отвердитель МА	2.28 × К
• Пластификатор МГФ-9	20
• Ускоритель ТЭа	0.5

*Примечание:* коэффициент К – количество эпоксидных групп в смоле по химическому составу.

1.1.1. **Эпоксидная смола ЭД-16** (ГОСТ 10587-84) представляет собой жидкий, сильновязкий реакционноспособный олигомерный продукт на основе диглицидилового эфира дифенилолпропана.

В зависимости от физико-химических свойств устанавливаются следующие марки эпоксидно-диановых смол: ЭД-22, ЭД-20, ЭД-16, ЭД-14, ЭД-10, ЭД-8. Обозначение марок состоит из следующих букв: Э – эпоксидная; Д – дифенилолпропановая; цифр, указывающих предел нормы содержания эпоксидных групп (*чем больше эпоксидно-диановое число, тем меньше в молекуле смолы эпоксидных групп и ниже прочность клеящего слоя*).

Старое название смолы ЭД-20 (по всей видимости, до 1984г.) – ЭД-6. Аналогично, старое название смолы ЭД-16 – ЭД-5.

Неотвержденные эпоксидно-диановые смолы могут быть переведены в неплавкое и нерастворимое состояние действием отверждающих агентов различного типа.

Покрyтия на основе эпоксидной смолы характеризуются следующими свойствами:

- хорошая адгезия к металлу, стеклу, керамике;
- высокая твердость;
- эластичность;
- ценные диэлектрические свойства;
- стойкость в агрессивных средах.

Технические характеристики:

Смола эпоксидная ГОСТ 10587-84	смола эпоксидно-диановая ЭД-20		смола эпоксидно-диановая ЭД-16	
	Высший	Первый	Высший	Первый
1. Внешний вид	Вязкая		Высоковязкая	
	прозрачная, без видимых механических включений и следов воды, жидкость			
2. Массовая доля эпоксидных групп, %	20.0 – 22.5		16 – 18	
3. Массовая доля летучих веществ, %, не более	0.2	0.8	0.2	0.4
4. Динамическая вязкость, Па•с, при:				
25 ± 0.1°С	13 – 20	12 – 25	–	–
50 ± 0.1°С	–	–	15 – 18	5 – 20
5. Время желатинизации, ч, не менее	8.0	4.0	4.0	3.0
6. Молекулярная масса	480 – 540			
7. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1155			
8. Температура вспышки в открытом тигле, °С	выше 270			
9. Эпоксидный эквивалент	269 – 239			

1.1.2. **Отвердитель МА** – малеиновый ангидрид.

1.1.3. **Пластификатор МФ-9** – полиэфир, продукт поликонденсации метакриловой кислоты фталиевого ангидрида и триэтиленгликоля.

1.1.4. **Ускоритель ТЭа** – триэтаноламин.

- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 1) Химическая формула                | $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CH}_2)_3\text{N}$ |
| 2) Молекулярная масса                | 149.2   |
| 3) Физические свойства               |   |
| • Температура кипения                | 335°С   |
| • Температура плавления              | 20 – 21°С                                     |
| • Относительная плотность (вода = 1) | 1.1   |
| • Растворимость в воде               | смешивается                                   |
| • Давление паров, Па при 20°С        | 1.33  |
| • Температура вспышки                | 179°С с.с.                                    |
| • Температура самовоспламенения      | 324°С   |

### 1.2. Физико-механические свойства компаунда ЭПК-1:

Удельный вес, кг/м <sup>3</sup>	1230
Предел прочности при статическом изгибе, кг/см <sup>2</sup>	1100
Предел прочности при сжатии, кг/см <sup>2</sup>	1470
Удельная ударная вязкость, кг· м/см <sup>2</sup>	16
Предел прочности на разрыв, кг/см <sup>2</sup>	700 ÷ 800
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-6</sup> / °С	60
Коэффициент теплопроводности, Вт/см·град	0.0017
Пропитывающая способность числа слоев батиста	170
Усадка, %	1.5
Теплостойкость по Мартенсу, °С	70 ÷ 80
Жизнеспособность при 70 °С, мин	240

### 1.3. Электроизоляционные свойства компаунда ЭПК-1.

Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 50 Гц, при 20°С	0.025
Удельное объемное сопротивление, Ом·см не менее	10 <sup>14</sup>
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 Гц	4.2
Электрическая прочность при частоте 50 Гц, кВ/мм	25 ÷ 30

## **2. Стеклотекстолит СТЭФ и СТЭФ-1.**

Стеклотекстолит марки СТЭФ ГОСТ-12652-74 (эквивалент американскому G10/G11) изготавливается толщиной от 0.5 до 50 мм.

Стеклотекстолит СТЭФ /СТЭФ-1/ получен прессованием стеклоткани с эпоксидно-фенолформальдегидным связующим. Содержание связующего – 30 – 35%, режим прессования – 160 °С, давление – 4 МПа.

Предназначен для работы на воздухе в условиях нормальной относительной влажности окружающей среды при напряжении свыше 1000 В и частоте тока 50 Гц, а также для работы на воздухе в условиях повышенной влажности окружающей среды (93+2)%, при температуре (40+2)°С, при напряжении до 1000 В и частоте тока 50 Гц. Высокая механическая прочность и электрическая стабильность позволяют проводить механическую обработку материала и использовать его для конструктивных деталей электрооборудования.

Стеклотекстолит марки СТЭФ-1 изготавливается толщиной от 0,2 до 50 мм. Обладает теми же свойствами, что и СТЭФ, но имеет более однородную мелкую внутреннюю структуру, что позволяет изготавливать из него мелкие детали электрооборудования.

Расшифровка условного обозначения стеклотекстолита марки СТЭФ: СТ – стеклотекстолит; ЭФ – эпоксиднофенольное связующее.

Механические и электроизоляционные характеристики  
стеклотекстолитов СТЭФ, СТЭФ-1

Наименование показателя	Норма	
	Марка СТЭФ	Марка СТЭФ-1
Композиционный состав	Стеклоткань, эпоксифенольное связующее	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1600 – 1900	
Длительно допустимая рабочая температура	От –65°С до +155°С	
Теплостойкость по Мартенсу, °С	185 – 200	
Нагревостойкость в течение 24 часов, °С, не менее	200	
Теплопроводность, Вт/м·°С	0.3	
Удельная теплоемкость, кДж/кг·°С	0.92 ÷ 1.45	
Температурный коэффициент линейного расширения, °С	$(4\div 8) \times 10^{-6}$	
Модуль упругости, МПа: - вдоль листа - поперек листа	20000 15000	21000 16000
Водопоглощаемость за 24 часа, %	1 ÷ 0.2	
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, МПа, не менее	350	
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	220	
Ударная вязкость по Шарпи параллельно слоям на образцах с надрезом, кДж/м <sup>2</sup> , не менее	50	
Электрическое сопротивление: - удельное объемное, Ом·м - внутреннее, Ом	$10^{11}$ $10^{11} \div 10^{12}$	$10^{11}$ $10^{11} \div 10^{12}$
Пробивное напряжение параллельно слоям (одноминутное проверочное испытание) в условиях М/90°С/трансформаторное масло, кВ <sub>эфф</sub> , не менее	35	
Сопротивление изоляции после кондиционирования в условиях 24ч/23°С/дистиллированная вода, МОм, не менее	$5 \cdot 10^4$	

Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1·10 <sup>6</sup> , после кондиционирования в условиях 24ч/23°С/дистиллированная вода, не более	0,04	
Тангенс угла диэлектрических потерь перпендикулярно слоям при 50 Гц	0.003±0.005	0.03±0.05
Кратковременная электрическая прочность: - перпендикулярно слоям, МВ/м - параллельно слоям, кВ/10мм	30±20 45±30	30±20 50±30

### 3. Пленка полиимидная (каптон).

Электрическая прочность, кВ/мм, не менее 200

### 4. Стеклолента.

Стеклолента предназначена для вторичной межвитковой изоляции и изоляции от корпуса шин катушек магнитов.

4.1. Используется стеклолента марки ЛЭС – из нитей алюмоборосиликатного стекла, с полотняным переплетением.

Используется лента толщиной 0.2 + 0.025 мм, шириной 20 +1мм

Замасливателъ – парафиновая эмульсия, удаляемая при прокаливании.

Массовая доля веществ, удаляемая при прокаливании,

%, не более 1.9

Разрывная нагрузка по основе, кг, не менее 90

Линейная плотность, г/100м 440

Плотность, кг/м<sup>3</sup> 2540

Прочность при растяжении, Па  $2.8 \times 10^9$

Модуль упругости, Па  $7.4 \times 10^{10}$

Удельное электрическое сопротивление при 200 °С, Ом·см  $4 \times 10^{12}$

**Некоторые литературные данные  
о радиационной стойкости эпоксидных смол [1]**

**Эпоксидные смолы** получают конденсацией эпихлоргидрина с двух- и многоатомными фенолами, либо прямым эпоксидированием ненасыщенных соединений надкислотами. Процесс отверждения заключается в образовании нерастворимого продукта – эпоксидной смолы, обладающей сетчатой трехмерной структурой.

Радиационная стойкость эпоксидных смол существенно зависит от используемых отверждающих реагентов, наличия или отсутствия пластификаторов и наполнителей. Наибольшей радиационной стойкостью обладают смолы, отвержденные ароматическими, а не алифатическими соединениями. Облучение первых – при 70°C до дозы 10<sup>9</sup> рад привело к снижению прочности при изгибе до 60% исходного значения, а облучение вторых – привело к снижению прочности до 25 – 30% исходного значения уже при 4·10<sup>8</sup> рад.

При облучении эпоксидные смолы изменяют цвет от желтого до темно-красного (5·10<sup>8</sup> рад), при более высоких дозах становятся коричневыми, охрупчиваются и рассыпаются в порошок. Более устойчивы по отношению к облучению эпоксиды с более высокой температурой термического разрушения. Заметно также, что при облучении на воздухе тонкие пленки эпоксидных смол обладают меньшей радиационной стойкостью, чем толстые образцы.

Таблица ПЗ.1. Относительная устойчивость к облучению эпоксидных компаундов в зависимости от наполнителя [1].

Наполнитель	Доза облучения, рад			
	Пороговое разрушение	Разрушение на 25%	Разрушение на 50%	Разрушение на 90%
Без наполнителя	2·10 <sup>8</sup>	3,2·10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>	7·10 <sup>10</sup>
Со стеклотканью	2,5·10 <sup>9</sup>	2,65·10 <sup>10</sup>	7,4·10 <sup>10</sup>	2·10 <sup>11</sup>
С минеральным наполнителем (окись алюминия)	7·10 <sup>8</sup>	5·10 <sup>9</sup>	3·10 <sup>10</sup>	10 <sup>11</sup>
Со стеклотканью и минеральным наполнителем	8·10 <sup>9</sup>	5·10 <sup>10</sup>	1,25·10 <sup>11</sup>	3,5·10 <sup>12</sup>

Таблица ПЗ.2. Изменение прочности на изгиб эпоксидных смол на разных отвердителях при облучении [1].

Отвердитель	Исходное значение, кг/см <sup>2</sup>	Толщина образца, мм	Доля (%) исходного значения, сохраняющаяся после облучения до дозы, рад		
			10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>
Ароматический амин	1190	3	80	50 – 80	–
Алифатический амин	1295	3	50 – 80	10	–
Ангидрид кислоты	1295	3	80	50 – 80	–
Ангидрид кислоты (с длинной боковой цепью)	805	3	50 – 80	10	–
Аральдит, тип В, литой (сопротивление сдвигу), кг/см <sup>2</sup>	560	4.1	–	80	50 – 80

На рис. ПЗ.1 – ПЗ.2 показана относительная радиационная стойкость большинства используемых пластиков и эластомеров. Начальный участок полоски (светлый) для каждого материала представляет диапазон доз, в котором радиационные повреждения выражены очень слабо, т.е. материал в таких условиях почти всегда можно использовать. Следующий участок полоски (заштрихован) характеризует диапазон доз, соответствующих слабым и умеренным (до 25%) радиационным повреждениям, чаще всего материал ведет себя удовлетворительно. Последний участок полоски (темный) охватывает дозы облучения, вызывающие умеренные и сильные радиационные повреждения в материале (допустимо лишь ограниченное использование). Эти оценки основаны на анализе изменений наиболее важных физических свойств: для пластмасс – прочности на растяжение, для эластомеров – удлинения.

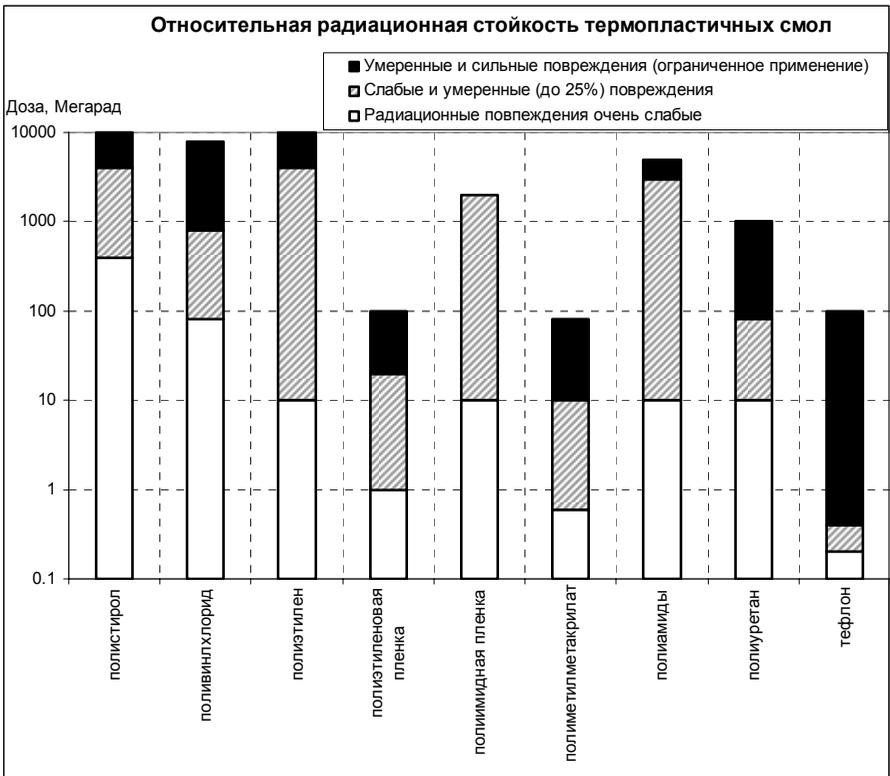


Рис. ПЗ.1. Относительная радиационная стойкость термопластичных смол [1].

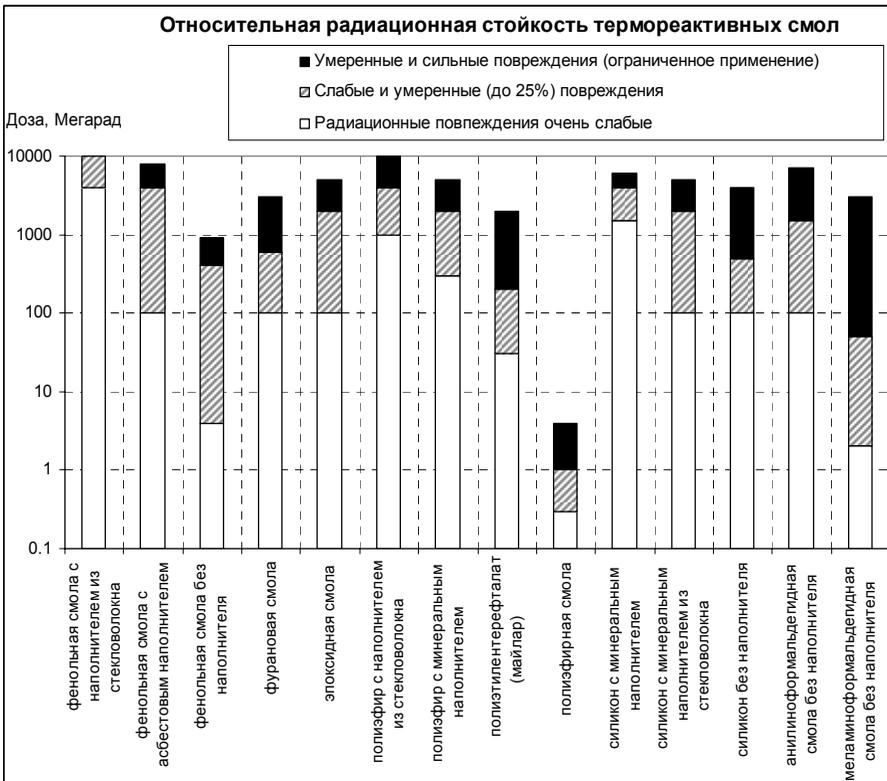


Рис. ПЗ.2. Относительная радиационная стойкость термореактивных смол [1].

Таблица ПЗ.3. Минимальные уровни облучения, вызывающие заметные (20 – 30%) изменения свойств некоторых материалов.

	Доза $\gamma$ -излучения, Гр
<b>Термореактивные смолы</b>	
Фенольная смола с наполнителем	$10^6 - 10^8$
Полиэфир с наполнителем	$10^7 - 3 \cdot 10^7$
Эпоксидная смола	$10^6 - 2 \cdot 10^7$
Полиэфирная смола	$3 \cdot 10^3 - 10^4$
Силикон	$10^6 - 5 \cdot 10^6$
<b>Термопластичные смолы</b>	
Полистирол	$5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$
Поливинилхлорид	$10^6 - 10^7$
Полиэтилен	$10^5 - 10^6$
Полипропилен	$5 \cdot 10^3 - 10^5$
Ацетилцеллюлоза	$10^4 - 3 \cdot 10^5$
Нитроцеллюлоза	$5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$
Полиметилметакрилат	$5 \cdot 10^3 - 10^5$
Полиуретан	$10^5 - 10^6$
Тефлон	$2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5$
<b>Эластомеры</b>	
Натуральный каучук	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$
Полиуретановый каучук	$10^4 - 3 \cdot 10^5$
Акриловые эластомеры	$10^4 - 7 \cdot 10^5$
Кремнийорганические эластомеры	$10^4 - 10^5$
Бутиловые эластомеры	$10^4 - 3 \cdot 10^5$

В.В. Петров, Ю.А. Пупков

**Испытания в ИЯФ  
радиационной стойкости материалов,  
используемых при создании  
магнитных систем ускорителей**

ИЯФ 2010-1

Ответственный за выпуск А.В. Васильев  
Работа поступила 23.01. 2010 г.

---

Сдано в набор 25.01. 2010 г.

Подписано в печать 25.01. 2010 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2.0 печ.л., 1.6 уч.-изд.л.

Тираж 175 экз. Бесплатно. Заказ № 1

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*