

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 393 В

А-646

9 - 10107

553/1-77

Н.Г.Анищенко, Г.И.Долбилова, Ю.А.Шишов

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И КОНСТРУКЦИЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ
ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1976

9 - 10107

Н.Г.Анищенко, Г.И.Долбилова, Ю.А.Шишов

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И КОНСТРУКЦИЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ
ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*Направлено на Международный симпозиум по высоко-
вольтной электрической изоляции для низкотемператур-
ных применений, Вроцлав, ПНР, 1976.*

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Анищенко Н.Г., Долбилова Г.И., Шишов Ю.А.

9 - 10107

Исследование некоторых электроизоляционных материалов и конструкций, применяемых в сверхпроводящих магнитах физики высоких энергий

Изложены основные требования к электрической изоляции и неметаллическим конструкционным материалам, используемым при создании сверхпроводящих магнитов в ускорительной технике. Дан краткий обзор литературы по механическим и теплофизическим свойствам и радиационной стойкости электроизоляционных материалов, применяемых в сверхпроводящих магнитах физики высоких энергий. Приводятся результаты проведенных в ОИЯИ исследований механических и электрических свойств в криогенных условиях некоторых электроизоляционных материалов и конструкций.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1976

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс физики высоких энергий решающим образом связан с использованием в этой области технической сверхпроводимости. В настоящее время во всех промышленно развитых странах разработаны и осуществляются крупные и дорогостоящие проекты, предусматривающие применение сверхпроводящих магнитных систем (СПМС) в качестве практически всех магнитных устройств ускорительной техники^{/1-3/}. Сюда относятся: 1) импульсные сверхпроводящие (СП) магниты (отклоняющие и фокусирующие) для ускорителей на сверхвысокие энергии; 2) СП магниты постоянного тока для циклотронов; 3) дипольные и квадрупольные СП магниты постоянного тока для транспортировки пучков вторичных частиц; 4) импульсные СП накопители энергии и СП выключатели для электропитания и защиты обмоток СП ускорителей.

Специально для импульсных СПМС ускорительной техники разработаны и освоены промышленностью мелкодисперсные внутренне-стабилизированные сверхпроводники на токи до 5 кА (в поле 5 Т), содержащие несколько десятков тысяч тонких Nb-Ti нитей (ϕ 5-10 мкм), twistированных в медно-никелевой матрице с шагом в несколько миллиметров. На сегодняшний день можно считать решенными основные принципиальные вопросы, связанные с созданием СП ускорителей: обеспечены

требуемая однородность поля, идентичность магнитов между собой, отсутствие "тренировки" магнитов, изучена радиационная стойкость материалов в криогенных условиях и т.п.

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК СПМС В УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ, ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ ЭТИХ ОБМОТОК

Наряду с цилиндрической формой обмоток СПМС, в устройствах ускорительной техники, как правило, будут применяться СП обмотки седлообразной конструкции (дипольные и квадрупольные магниты) с использованием железных магнитопроводов или без них. Например, длина дипольных магнитов составляет $4 \div 6$ м, "теплая" апертура ~ 10 см.

Известно, что любое СП устройство включает в себя ряд электроизоляционных конструкций (ЭИК), каждая из которых выполняет свои особые функции, работая в специфических условиях. Для рассматриваемых СПМС можно выделить следующие наиболее типичные ЭИК: а) элементы продольной изоляции (т.е. изоляции между разными точками одной и той же цепи, - например, межвитковая, межслоевая и т.п.); б) корпусная изоляция; в) изоляция электрических тоководов (из области с комнатной температурой в жидкий гелий).

В соответствии с приведенными типами ЭИК СПМС можно говорить о различии в основных требованиях к изоляции, о разнообразии самих применяемых электроизоляционных и конструкционных (нематаллических) материалов.

Несколько слов об общих требованиях к электрической изоляции и о величине и форме воздействующих на нее электрических напряжений - применительно к СПМС ускорительной техники. По сравнению с СП электротехническими устройствами (кабели, генераторы, накопители для энергосистем и т.п.) диэлектрические свойства изо-

ляции рассматриваемых СПМС приобретают второстепенный характер, уступая место требованиям высокой механической прочности, хороших теплофизических свойств, радиационной стойкости. Уровень воздействующих на изоляцию электрических напряжений в перечисленных во введении СПМС ускорительной техники (исключая импульсные СП накопители) не высок. Номинальное напряжение источников питания, например, крупных импульсных дипольных СП магнитов, обычно ~ 100 В. Однако в условиях аварийной эвакуации энергии напряжение на концах обмоток, согласно существующим проектам, может достигать $3 \text{ кВ}^{2/}$. Форма воздействующего на изоляцию напряжения при эвакуации может быть как экспоненциальной (разряд на омическую нагрузку), так и прямоугольной (разряд на нелинейную нагрузку, например, на ряд последовательно включенных коротких электрических дуг /4/). При этом крутизна фронтов воздействующих напряжений определяется работой коммутирующих устройств схемы эвакуации энергии и может находиться в пределах $2 \div 100$ мс в зависимости от их типа и быстродействия.

а) Продольная электрическая изоляция обмоток

Сначала отметим следующие четыре основных требования к обмоткам импульсных СПМС ускорителей:

- 1) необходимость замоноличивания уложенных с особой точностью витков обмоток; это диктуется высокими требованиями к однородности магнитного поля ($\Delta B/B < 10^{-3}$) и недопустимостью малейшего перемещения витков обмотки под действием пондеромоторных сил, что могло бы привести к заметным локальным скачкам температуры и соответствующему снижению критического тока (I_c) сверхпроводника; 2) уменьшение джоулевых потерь в обмотках, с одной стороны, и максимально возможное улучшение теплоотдачи от обмотки к жидкому гелию (с помощью "фитилей" и охлаждающих каналов), - с другой; в результате должна быть обеспечена возможность работать с незначительным (не более $0,3 \div 0,5$ К) превышением температуры сверхпроводника обмотки

над температурой жидкого гелия; 3) сведение к минимуму эффекта "тренировки", при наличии которого СПМС выходят на рабочие параметры по току только после многократных (до ста и более раз) искусственных переводов магнитов в нормальное состояние; 4) высокая радиационная стойкость как самого сверхпроводника (без снижения его I_c), так и конструкционных и электроизоляционных материалов обмоток.

Часть из названных выше требований приводит к необходимости пропитки (или послойного замоноличивания) обмоток СП магнитов для ускорителей эпоксидными смолами (или компаундами). В таком применении эпоксидные компаунды (ЭПК) служат как конструкционный материал и как материал для продольной электрической изоляции. Правда, некоторые проекты, например, МОВУ (Франция)^{/2/}, предусматривают дополнительную органическую изоляцию самого сверхпроводника. Однако, как последующие модели импульсных СПМС, разработанных во Франции (проект АЛЕС), так и другие магниты (АС-4, АС-5, D2^a, D2^b) по программе коллаборации GESSS, имеют витковую изоляцию из пленки окиси меди.

В СП магнитах постоянного тока материалом для продольной изоляции, наряду с ЭПК, часто служат полимерные пленки. Витковая же изоляция может осуществляться с помощью различных лаков^{/5/}.

Разработкой подходящих составов ЭПК для рассматриваемых СПМС уже несколько лет занимаются во многих научных лабораториях мира при ускорительных центрах^{/1,6-8/}.

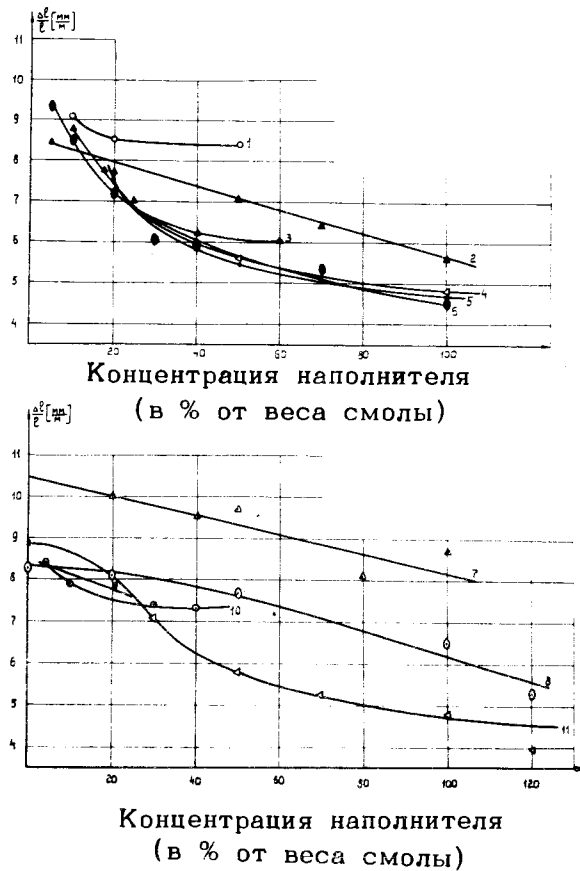
Исследования различных ЭПК в криогенных условиях проводились и в ОИЯИ^{/9,10/}. Изучались составы на основе диановых смол ЭД-5 и ЭД-6 в сочетании с алифатической смолой ДЭГ-1. Теплопроводность λ при комнатной температуре такого ненаполненного компаунда составляет $0,18 \div 0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м.К}}$ ^{/11/}. Чаще всего в ЭПК в качестве наполнителя применяется пылевидный кварцевый песок. ЭПК с таким наполнителем имеют теплопроводность до $0,5 \div 0,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м.К}}$ (при комнатной температуре).

Для наполнителя кварца можно принять $\lambda = 1,34 \frac{\text{Вт}}{\text{м.К}}$ ^{/11/}.

В изготовленных с помощью заливочных ЭПК системах неизбежно возникают внутренние напряжения - в силу большой разницы в физико-механических свойствах элементов, составляющих такие системы. Модификация компаундов пластификаторами - один из способов снижения внутренних напряжений. В наших исследованиях функции пластификатора выполняла упомянутая выше смола ДЭГ-1 (до 20 вес.част. на 100 част. основной смолы). У пластифицированных компаундов в несколько раз увеличивается (достигая 5÷8% при комнатной температуре) относительное удлинение при разрыве - по сравнению с непластифицированными ЭПК (до 2%). Это повышает стойкость компаундов к растрескиванию. Отвердителем в наших компаундах служил полиэтиленполиамин (ПЭПА). В качестве наполнителей нами испытаны: а) порошки металлов (меди, алюминия, бронзы); б) окислы металлов (окись меди, алюминия, магния), тальк, кварцевый песок; в) окислы металлов в различных сочетаниях друг с другом; г) вольфрамат кальция; д) нитрид бора, карбиды бора и кремния; е) микропорошки. Наполненные ЭПК испытывались на тепловое сжатие (в жидком азоте), а также стойкость к тепловому удару (СТУ) и электрическую прочность (в жидком гелии).

В качестве образцов служили стержни ϕ 10 мм, длиной 100 мм, диски диаметром до 70 мм, модели проходных изоляторов (длиной до 100 мм, диаметром до 45 мм), монолитные цилиндры (высотой до 50 мм, диаметром 80 мм). Лучше других из испытанных образцов вели себя в криогенных условиях ЭПК с наполнителями: тальк; тальк+кварцевый песок; окись алюминия.

На рис. 1^{/9/} приведены зависимости термической интегральной усадки некоторых из перечисленных образцов ЭПК (на основе ЭД-5 + 10% ДЭГ-1) от концентрации и типа наполнителя (при охлаждении от комнатной до азотной температуры). Следует отметить, что указанные значения термической усадки $\Delta l/l$ исследуемых ЭПК снижаются до величин, близких к $\Delta l/l$ меди и стали X18N10T (~ 3,2 мм/м) или алюминия (~ 4,1 мм/м)



- Обозначения:
- 1 - окись магния (MgO)
 - 2 - окись алюминия (Al_2O_3)
 - 3 - нитрид бора (BN) с отвердителем "ПЭПА"
 - 4 - карбид бора (B_4C)
 - 5 - карбид кремния (SiC)
 - 6 - тальк ($4SiO_2 \cdot 3MgO \cdot H_2O$)
 - 7 - нитрид бора (BN) с отвердителем Л-20
 - 9 - алюминий
 - 10 - бронза
 - 11 - карбид бора (B_4C с отвердителем "ПЭПА"

Рис. 1

только при значительных количествах наполнителя ($\geq 100\%$ по весу смолы), когда компаунд уже становится нетехнологичным для заливки, а может быть рекомендован только как шпатлевка. Так, ЭПК, наполненный тальком, технологичен до концентрации не выше 70% (от веса смолы). Для определения термических усадок ЭПК на основе упомянутых выше смол с комбинированными наполнителями (тальк+кварцевый песок; тальк+окись алюминия; окись алюминия+кварцевый песок; тальк+нитрид бора) проведены исследования на многочисленных образцах, по результатам которых построены соответствующие диаграммы (рис.2), где дана зависимость величины интегральной усадки (при охлаждении

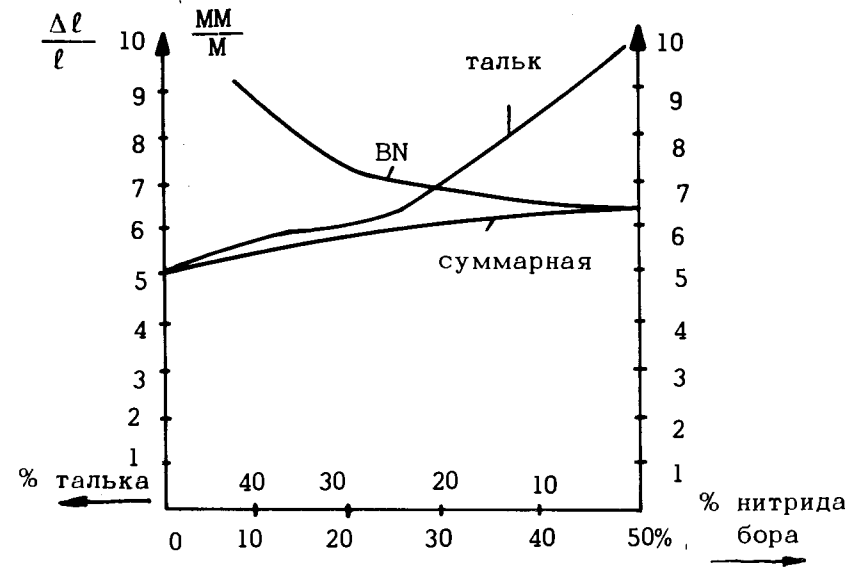


Рис. 2. Диаграмма "Состав эпоксидного компаунда - интегральная усадка при охлаждении от 293 К до 77 К". Наполнители: тальк, нитрид бора или их смеси, отвердитель - ПЭПА.

до 77 К) от концентрации наполнителей. Интересно отметить, что усадочная кривая для смешанной композиции лежит почти всегда ниже "индивидуальных" кривых, т.е. по показателю термической усадки предпочтительнее вариант со смешанным наполнителем. Наименьшие усадки получены при следующих соотношениях наполнителей (для ЭД-5 + 10% ДЭГ-1 + ПЭПА): тальк (80%) + Al_2O_3 (20%) - $\Delta l/l = 4,6$ мм/м (охлаждение до 77 К); тальк (90%) + Al_2O_3 (10%) - $\Delta l/l = 4,2$ мм/м.

Особенно перспективен в качестве наполнителя нитрид бора (BN). ЭПК с BN (40% к весу смолы), хотя и имеют термическую усадку, большую, чем ЭПК с тальком, обладают, однако, высокой механической прочностью и не растрескиваются при 4 К (в сравнительно небольших по объему конструкциях). Согласно этой рекомендации, прошла неоднократные успешные испытания в жид-

ком гелии модель сверхпроводящего выключателя на 0,9 кА (цилиндр ϕ 224/216 мм, высотой 20 мм), залитого эпоксидным составом с ВН^{12/}

Отбор ЭПК для криогенных применений только по величине термической усадки провести невозможно. Такой выбор является комплексным и так же, как и для других полимерных материалов (в том числе пленочных), может быть осуществлен, например, по методике, данной в^{9/}. Заслуживает внимания также ЭПК горячего отверждения (с МГТФА) на основе смолы ЭД-6 + 20% ДЭГ-1 с наполнителем - кварцевый песок. Этот состав обладает высокой электрической прочностью в жидком гелии ($32 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$), так же как и ЭПК на основе ЭД-5 с наполнителем тальк (45%) + кварцевый песок (45% от веса смолы).

Механические, теплофизические и электрические свойства некоторых пленочных полимерных материалов, которые также могут быть использованы в качестве продольной изоляции СПМС, довольно полно представлены, например, в^{13/}.

Результаты некоторых исследований полимерных пленок, полученные в ОИЯИ, представлены в^{14-16/} и табл. 1, 2^{9/}.

б) Корпусная изоляция обмоток

Электрическая многослойная изоляция обмоток рассматриваемых СПМС от металлических каркасов может быть выполнена из полимерной пленки, например, лавсановой (ПЭТФ) или полиимидной. Как правило, бывает достаточно 3 слоев пленки толщиной 20-50 мкм. При этом меньшее количество слоев из-за наличия локальных дефектов структуры пленки не может считаться приемлемым. По нашим измерениям^{16/} кратковременной электрической прочности лавсановой пленки толщиной 10 мкм можно ориентировочно считать, что на 1 м² такой пленки приходится, по крайней мере, до 200+250 точечных дефектов. Электроизоляция от каркаса и фланцев (и других металлических частей) может быть выполнена также несколь-

Таблица 1

Статические механические свойства полимерных пленок и кабельной бумаги (ширина образцов 15 мм)

материал толщина (мм)	температура испытаний (К)	разрывная сила (кг)	прочность при разрыве (кг/мм)	относительное удлинение при разрыве (%)
		среднее значение из пяти измерений		
фторопласт 0,025	296	1,44	3,86	138
	77	4,42	12	2,28
лавсан 0,01	296	2,06	13,8	169
	77	2,87	19,1	6
лавсан 0,05	296	14	19,8	131
	77	17,4	23,2	4,25
кабельная бумага 0,135	296	16,3	8,15	5,6
	77	15,9	7,9	1,44
мелинекс 0,1	296	29,7	19,7	109
	77	37,8	25,0	4,86

кими слоями стеклоленты, пропитанной наполненным эпоксидным компаундом - с последующей обработкой каркаса на токарном станке. Последний способ предпочтительнее, так как позволяет легче выполнить высокие требования к укладке витков обмотки. К тому же такой каркас более жесткий, чем с пленочной изоляцией.

Электрическая изоляция магнита от криостата может выполняться в виде опорных и проставочных конструкций из армированного ЭПК, стеклотекстолита. В некоторых случаях может и здесь применяться многослойная пленочная изоляция. Однако из условий необходимости хорошего теплоотвода от обмотки к хладагенту, могут быть рекомендованы ЭИК, где функции корпусной изоляции, наряду с опорными конструкциями, выполняет сам жидкий гелий. Свойства его как диэлектрика уже достаточно полно описаны в литературе^{17/}.

Таблица 2.

Влияние среды, формы и скорости подъема напряжения на кратковременную прочность слоистой изоляции^{/9/}.

материал	$E_{0,3 \sim ж N_2}$	$E_{ж N_2 \sim 0,3}$	$E_{0,3 \sim ж N_2}$	$E_{ж N_2 \sim 0,3}$
	$E_{2,5 \sim ж N_2}$	$E_{воздух \sim 0,3}$	$E_{\sim 0,3 \sim ж N_2}$	$E_{воздух \sim 0,3}$
ПИ 40 мкм × 1	$\frac{250}{310} = 0,8$	$\frac{250}{250} = 1,0$	$\frac{335}{250} = 1,3$	$\frac{335}{410} = 0,8$
ПЭТФ 10 мкм × 2	$\frac{235}{325} = 0,7$ 0,6	$\frac{235}{275} = 0,8$ 0,9	$\frac{400}{235} = 1,7$ 2	$\frac{400}{370} = 1,1$ 1,3
ПТФЭ 20 мкм × 1	$\frac{280}{290} = 0,9$	$\frac{280}{390} = 0,7$	$\frac{445}{280} = 1,6$	$\frac{445}{630} = 0,7$
КВ 90 мкм × 1	$\frac{90}{90} = 1,0$	$\frac{90}{17} = 5,4$	$\frac{175}{90} = 1,9$	$\frac{175}{20} = 8,6$

$E_{0,3 \sim ж N_2}$ -пробивная напряженность при скорости подъема 0,3 кВ/с, 50 Гц, в жидком азоте, кВ макс/мм.
 $E_{воздух \sim 0,3}$ - пробивная напряженность в воздухе при напряжении постоянного тока, скорость подъема напряжения 0,3 кВ/с, кВ/мм
 * - средой являлся жидкий гелий, а не жидкий азот.

Послойное и наружное бандажирование обмоток, например, дипольных магнитов, иногда осуществляется как послойным эпоксидированием, так и наложением наружных неметаллических бандажей (например, фиберглассовых в диполе Д2^b/2/). Следует иметь в виду, что бандаж в таких конструкциях диполей воспринимают магнитное давление до 130 т (в диполе Д2^a).

в) Изоляция токовводов

Достаточно полный обзор по токовводам в жидкий гелий, в том числе по применяемым конструкциям, дан в /18/.

Особенностями гелия, в значительной степени определяющими требования к ЭИК токовводов, являются, во-

первых, очень низкая электрическая прочность газообразного теплого гелия ($\sim 0,8 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$) и, во-вторых, низкая электрическая прочность газообразного гелия вдоль поверхности диэлектриков, особенно в условиях неоднородного электрического поля. Однако для рассматриваемых СПМС ускорительной техники создание ЭИК токовводов не является проблемой с электроизоляционной точки зрения.

ЭИК токовводов выполняются, как правило, с применением многослойной изоляции из полимерной пленки (лавсан, фторопласт), стеклоленты, пропитанной наполненным ЭПК, заливочных эпоксидных компаундов с различными наполнителями (например, нитрид бора, тальк, кварцевый песок). Для исключения опасности поверхностных перекрытий токовводов, особенно в области теплого газообразного гелия, может быть рекомендована конструкция с "закрытой" боковой поверхностью изоляционного остова токоввода и "навесом", оканчивающимся экранирующим кольцом^{/19/} (рис. 3).

3. О РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЭИК СПМС УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Вопросы радиационной стойкости следует рассматривать особо, и в этом - одно из принципиальных отличий в требованиях к электрической изоляции СПМС ускорителей и электротехнических устройств. Результаты некоторых исследований свойств электроизоляционных материалов, облученных при низких температурах, приведены в /8,17,20-22/ и на рис. 4-7.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный выше обзор позволяет сделать следующие выводы:

1. Электрическая изоляция в СП магнитах, предназначенных для ускорительной техники, является важным

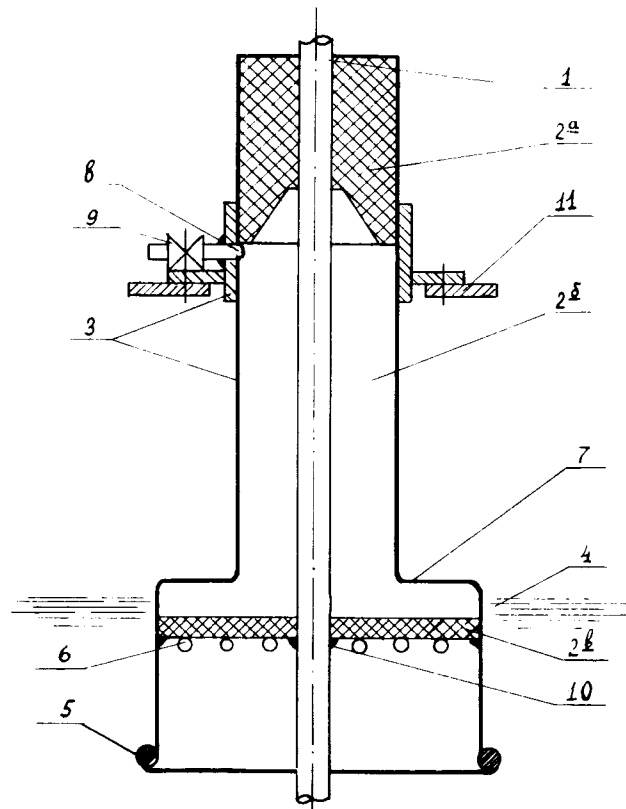


Рис. 3. Высоковольтный вакуумный ввод в ванну с жидким гелием^{/19/}: 1 - токоведущий стержень; 2 - составной изоляционный остов (2а и 2в - твердая изоляция, 2б - вакуум); 3 - заземленный фланец с удлиненной в сторону жидкого гелия стенкой из нержавеющей стали; 4 - уровень жидкого гелия; 5 - экранирующее кольцо; 6 - отверстия для выхода газообразного гелия, скапливающегося у холодного торца изоляционного остова; 7 - сильфонный термокомпенсатор; 8 - отверстие для откачки вакуумного пространства 2б; 9 - вакуумный вентиль; 10 - вакуумное уплотнение; 11 - крышка гелиевого криостата.

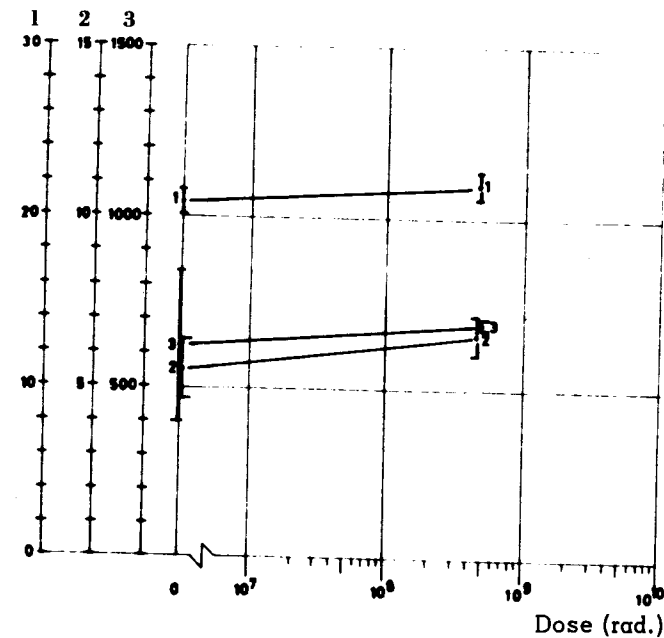


Рис. 4. Влияние радиации на механические свойства полиимида (Vespel SP1) при 77 К^{/20/}: 1-предел прочности на разрыв, кг/мм²; 2-относительное удлинение при разрыве, %; 3-модуль упругости при растяжении, кг/мм².

конструкционным элементом обмоток; к электрической прочности изоляции предъявляются умеренные требования.

2. В настоящее время решены полностью или частично основные проблемы, связанные с применением электроизоляционных материалов в обмотках СПМС: устранены или уменьшены эффекты тренировки СП магнитов; найдены и изучены удовлетворительные изоляционные материалы; исследованы электроизоляционные свойства жидкого гелия. Созданы электроизоляционные конструкции обмоток и тоководов различного типа.

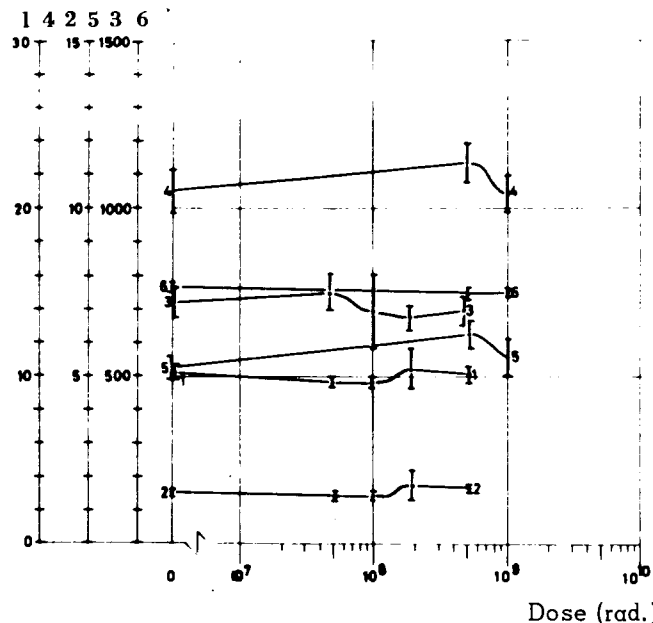


Рис. 5. Влияние радиации на механические свойства эпоксиды на основе ароматической смолы при $77\text{ K}^{/20/}$:
 1 - предел прочности при растяжении, кГ/мм^2 ;
 2 - относительное удлинение при разрыве, %;
 3 - модуль упругости при растяжении, кГ/мм^2 ;
 4 - предел прочности при изгибе, кГ/мм^2 ; 5 - прогиб при поломке, мм; 6 - модуль упругости при изгибе, кГ/мм^2 .

3. Продолжается углубленное изучение ряда вопросов, связанных с использованием СП магнитов в ускорителях на сверхвысокие энергии, например, воздействия радиации на изоляционные материалы.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору А.Г.Зельдовичу за постоянное внимание к работе и участие в обсуждениях результатов исследований, В.Ф.Минеину - за многолетнее и плодотворное сотрудничество, а также П.Г.Смирнову - за помощь в проведении экспериментов.

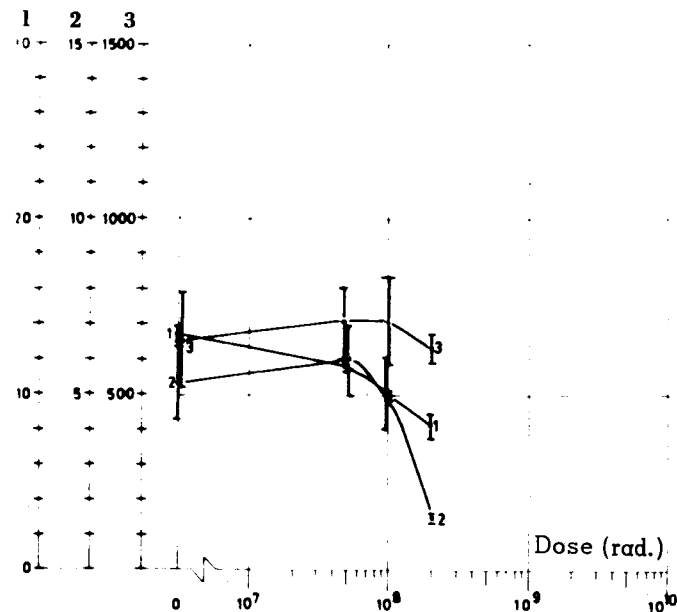


Рис. 6. Влияние радиации на механические свойства политетрафторэтилена (тефлона) при $77\text{ K}^{/20/}$: 1 - предел прочности при растяжении, кГ/мм^2 ; 2 - относительное удлинение при разрыве, %; 3 - модуль упругости при растяжении, кГ/мм^2 .

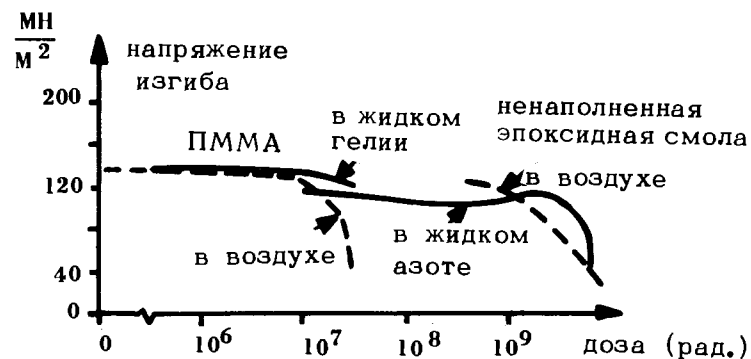


Рис. 7. Влияние радиации на предел прочности при изгибе полиметилметакрилата (ПММА) и эпоксидной смолы, облученных в воздухе или в криогенных жидкостях^{/17/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Trans. on Magnet, Vol.Mag-11, No.2, III.1975 (Proc. of Applied Superconductivity Confer., X.1974, USA), pp. 113, 536.
2. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, "Наука", 1975, стр. 118,96.
3. Proc.of The Fifth Intern. Confer. on Magnet Technology (MT-5), Roma, IV, 1975.
4. А.И.Агеев и др. ОИЯИ 9-9363, Дубна, 1975.
5. Г.Г.Свалов, Д.И.Белый. Сверхпроводящие и криорезистивные обмоточные провода. "Энергия", Москва, 1976.
6. D.Evans et al.Epoxy Resins for Superconducting Magnet Encapsulation,RHEL/R-251,IX,1972.
7. B.Colyer.The Impregnation of Superconducting Windings with Epoxy Resins.Part I. RHEL/R-264, XII.1972.
8. M.Van de Voorde.Results of Physical Tests on Polymer Materials at Cryogenic Temperatures.CERN ISR-MA/73-13,Geneva,II.1973.
9. Н.Г.Анищенко, Э.Яворский. ОИЯИ P8-7663, Дубна,1974.
10. Н.Г.Анищенко, В.Ф.Минеин. Исследование монолитной электрической изоляции на основе эпоксидных компаундов в криогенных условиях. Тезисы докл. на конференции "Сверхпроводники и гиперпроводники в электрических машинах и электроэнергетике", Москва, 1974, стр.44.
11. Э.Ю.Локх, Ю.И.Пийроя. Эпоксидная композиция для изготовления оснастки. Пластмассы, № 2, 1967.
12. Х.Менке, Ю.А.Шишов. Модель высоковольтного сверхпроводящего выключателя. ОИЯИ P8-7855, Дубна, 1974.
13. R.P.Reed et al. Mechanical,Thermal,and-Electrical Properties of Selected Polymers.Cryogenics,Vol.13,№.2,1973, p.67.
14. Н.Г.Анищенко, В.Ф.Минеин. Проблемы электрической изоляции криогенных и сверхпроводящих электротехнических устройств. Электротехническая промышленность (серия "Электротехнические материалы"), вып.1 (42), Москва, 1974, стр.21.
15. В.Ф.Минеин, Ю.С.Пинталь, Н.Г.Анищенко. Длительная электрическая прочность синтетических пленок в криогенных условиях. Доклад на Всесоюзной конференции "Физика диэлектриков и перспективы ее развития", том.II, стр. 222, Ленинград, 1973.
16. Н.Г.Анищенко, В.Ф.Минеин. Исследования кратковременной электрической прочности и сроков службы лавсановой изоляции в криогенных условиях. ПТЭ, № 6, 1973, стр. 176.
Cryogenics, Vol. 14, No. 7, p.409 (1974).
17. B.Fallou. A Review of the Main Properties of Electrical Insulating Materials used at Cryogenic Temperatures.Proc. of The V Intern. Conf. on Magnet Technol. (MT-5), IV. 1975, Roma.
18. Ю.Л.Буянов и др. Токовые вводы для криогенных устройств. ПТЭ, № 4, 1974, стр. 5.
19. В.Ф.Минеин, Н.Г.Анищенко. ОИЯИ P8-8592, Дубна, 1975.
20. M.N.Van de Voorde.Mechanical Properties of Non-Mettalic Materials at 77K in a Radiation Environment.CERN-ISR/72-14, Geneva, III. 1972.
21. D.Evans, G.B.Stapleton. Cryogenic Applications of Epoxy Resins. Paper A.9.RPG Symposium "Reinforced Plastics in Electrical and Electronic Applications", II. 1975.
22. R.D.Hay and E.J.Rapperport. A Review of Electrical Insulation in Superconducting Magnets for Fusion Reactors. Final Report. Oak Ridge National Laboratory, April 21, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 сентября 1976 года.