



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2023–20

Э.А. Людмирский, С.А. Никитин, П.П. Подлесный

**Опыт разработки технологии намотки обмоток
магнитооптических элементов,
эксплуатируемых в радиационных условиях (полях)**

Протвино 2023

Аннотация

Никитин С.А. и др. Опыт разработки технологии намотки обмоток магнитооптических элементов, эксплуатируемых в радиационных условиях (полях): Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2023–20. – Протвино, 2023. – 16 с., 8 рис., 2 табл., библиогр.: 3.

В работе кратко описаны разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ технологические операции, по формированию обмоток для магнито-оптических элементов, применяемых в ускорительной технике.

Представлены отечественные изоляционные материалы для обмоток магнитооптических элементов, рассчитанные на применение при высоких уровнях радиационных нагрузок (до 107 Гр за 20 лет работы) и удовлетворяющие требованиям международных стандартов IEC 544 и ISO 178.

Abstract

Nikitin S.A. et al. Experience in developing winding technology for coils of magneto-optical elements operated in severe radiation conditions (fields): NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2023–20. – Protvino, 2023. – p. 16, fig. 8, tables 2, refs.: 3.

The article describes the technological operations developed at the National Research Center «Kurchatov Institute» – IHEP for the formation of windings for magneto-optical elements used in accelerator technology.

Presented are insulating materials produced in Russia for windings of magneto-optical elements, designed for use at high levels of radiation loads (up to 107 Gy over 20 years of operation) and meeting the requirements of international standards IEC 544 and ISO 178.

Введение

Магнитооптические элементы (далее - МОЭ), являются основными элементами ускорителей заряженных частиц. Вследствие неизбежных потерь части пучка на различных стадиях рабочего цикла ускорителя (инжекция пучка, ускорение, вывод) некоторые элементы ускорителя будут работать при высоких радиационных нагрузках.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ накоплен опыт в создании магнитооптических элементов, как для собственного ускорительного комплекса У-70 (более 40 МОЭ), так и для Большого адронного коллайдера (далее - БАК), работающего в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева) с 2009 г.

На каналах комплекса У-70 в эксплуатации находятся более 40 магнитов. В рамках международного научного сотрудничества НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ – ЦЕРН для ускорителя БАК было изготовлено 15 септум-магнитов.

Значительная часть этих МОЭ предназначена для работы при высоких радиационных нагрузках. Требования к таким элементам – срок службы до 20 лет при уровнях поглощенной дозы до 107 грей (10 МГр.). Наименьшую радиационную стойкость, как правило, имеют материалы, используемые при изготовлении обмоток МОЭ (см. ниже).

Вопрос о радиационной стойкости отечественных материалов наиболее остро встал при изготовлении септум-магнитов для систем инжекции и поглощения пучка БАК. Одним из требований было то, что отечественные материалы, применяемые для изготовления МОЭ, должны соответствовать стандарту IEC 544 (стандарт Международной Электротехнической комиссии, который рассматривает воздействия ионизирующего излучения на различные виды

органических изоляционных материалов), и стандарту ISO 178 (механические свойства материалов, в т.ч. при изгибе).

В работе:

- на основе литературных данных обоснован выбор отечественных материалов, используемых при изготовлении обмоток МОЭ;

- кратко описаны основные технологические операции при формировании обмоток магнитных элементов, а также разработанное и изготовленное устройство для формирования обмоток магнитов;

- приведены основные физико-механические свойства отечественных материалов, применяемых при изготовлении МОЭ в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

1. Изолирующие материалы, используемые в намоточно-изолировочной технологической операции

Литературные данные в вопросе о радиационной стойкости материалов дают большой разброс в результатах, поскольку радиационная стойкость материалов может существенно зависеть от конкретных условий их изготовления и испытания. Некоторые литературные данные о радиационной стойкости эпоксидных смол изложены в справочнике под общей редакцией В.Б. Дубровского «Радиационная стойкость материалов» [1].

Одним из источников, заслуживающим доверия, послужил каталог [2], в котором представлены данные результатов испытаний материалов на стойкость к ионизирующему излучению, проведённые в Европейской организации по ядерным исследованиям. В этом каталоге приводятся результаты испытаний термореактивных и термопластичных смол и композитов на стойкость к ионизирующему излучению. Материалы облучали либо источником $Co\ 60$ в дозах от 200 кГу (кГр) до нескольких МГрей при мощности дозы порядка от 1 Gy/s (Гр/с), или в ядерном реакторе до доз 100 МГу (МГр) при мощности дозы 50 Gy/s (Гр/с).

На странице 65 [2] представлены результаты испытания эпоксидной смолы, использованной для заливки обмоток диполя для канала перевода пучка из ускорителя SPS в ускоритель LEP (ЦЕРН). Результаты тестирования, соответствующие международным стандартам по воздействию ионизирующего излучения на различные виды органических изоляционных

материалов (стандарт Электротехникой комиссии IEC 544 и стандарту ISO 178 - свойства пластмасс при изгибе), представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты радиационных испытаний в соответствии со стандартами IEC 544 и ISO 178 [2].

Material: Type	Epoxy resin (based on Bisphenol A) + Methyl Hexahydrophthal Anhydride	TIS No. R 434
Supplier:	Elin Union	UL 94: n.m.
Remarks:	Dipole for SPS-LEP transfer lines	LOI:

Radiation test results according to IEC Standard 544 (and ISO 178)

Dose rate (kGy/h)	Dose (MGy)	Ultim. strength (MPa)	Deformation ϵ (%)	Modulus (GPa)
0	0	78±22	2.2±0.5	3.6±0.5
0.1	1	47±9	1.5±0.2	3.0±0.3
170	5.2	76±15	2.2±0.4	3.6±0.2
170	10	57±4	1.6±0.1	3.5±0.1

Как видно из таблицы 1, при мощности дозы 170 kGy/h (кГр/час) и поглощённой дозы 10 MGy (МГр) предел прочности уменьшается с 78 МПа (МПа) до 57 МПа (МПа), относительное удлинение уменьшается с 2,2% до 1,6%, модуль Юнга практически не меняется. Представленный эпоксидный компаунд получил коммерческое наименование ETAL-50 [2]. Отечественный аналог этого эпоксидного компаунда – эпоксидный компаунд Этал-50, который производится ЗАО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ» в соответствии с ТУ 2257-050-18826195-99.

Радиационные испытания стеклотекстолитов и анализ отечественных изоляционных материалов представлены в работе [3]. Некоторые результаты испытаний стеклотекстолитов и эпоксидных компаундов российского производства и США показаны на рисунках 1 и 2.

Химические, механические и электрические свойства российских электроизоляционных материалов, применявшихся при испытаниях, представлены в работе [3] в Приложении 2, стр. 23.

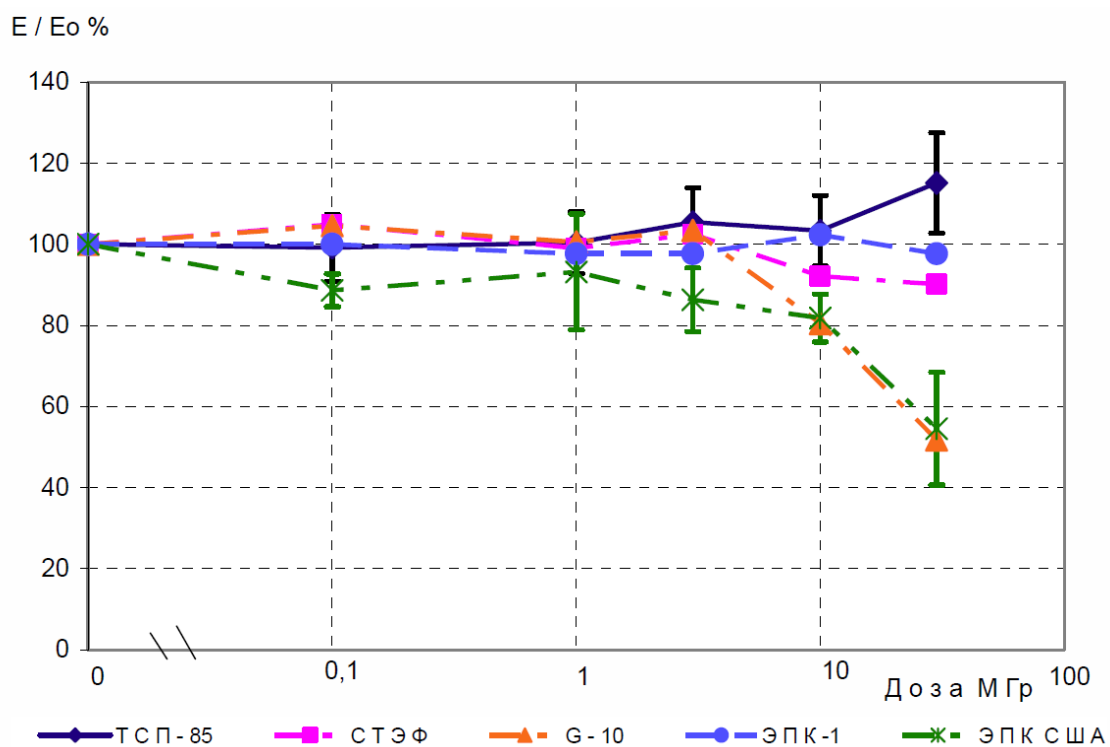


Рис. 1. Относительное изменение модуля упругости в зависимости от дозы ([3] стр. 6). Стеклотекстолиты: ТСП-85 (отечественный с пропиткой стеклоткани полиаминоимидным связующим); СТЭФ; G-10 (США).

Эпоксидные пропиточные компаунды: ЭПК-1 (ИЯФ); ЭПК (США).

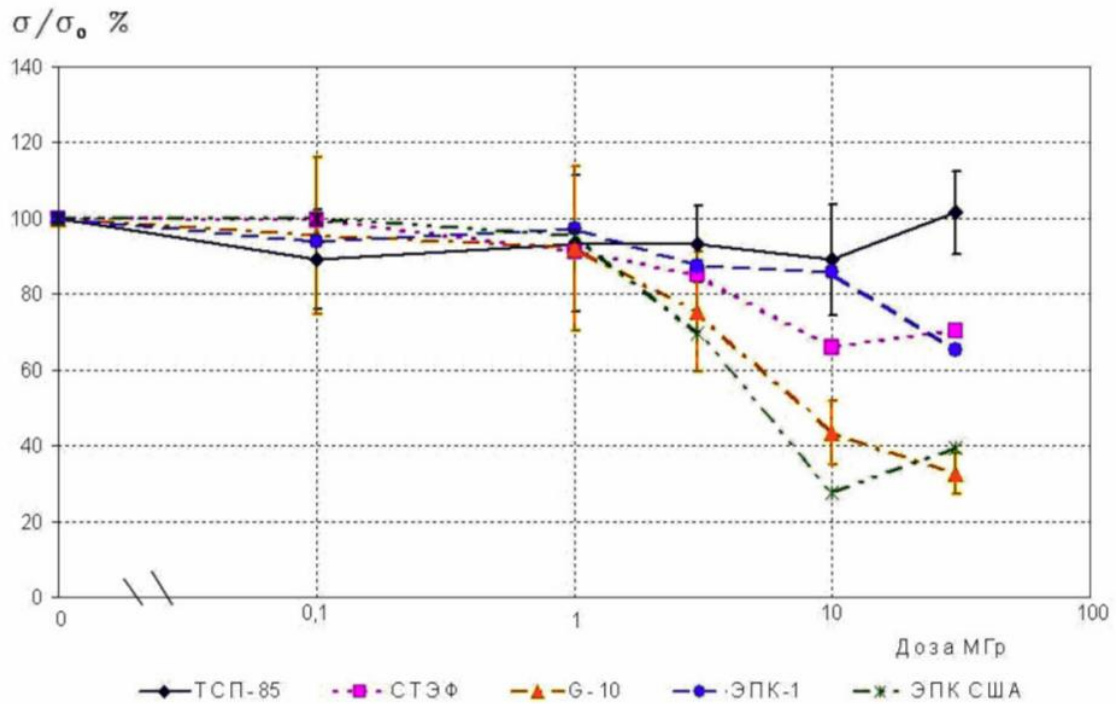


Рис. 2. Относительное изменение предела прочности в зависимости от дозы ([3] стр. 6). Стеклотекстолиты: ТСП-85 (отечественный с пропиткой стеклоткани полиаминоимидным связующим); СТЭФ; G-10 (США).

Эпоксидные пропиточные компаунды: ЭПК-1 (ИЯФ); ЭПК - пропиточный компаунд (США).

Следует обратить внимание на испытание несколько типов шин, используемых для изготовления корректирующих обмоток магнитов [3]. Основные свойства изоляции шин представлены ниже.

Таблица 2. Основные свойства изоляции шин [3].

Тип образца	Поперечные размеры шины по меди, мм×мм	Толщина шины с изоляцией, мм	Усилие прижатия шины к заземленной пластине, кг/см ²	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

Изоляция выше указанных шин:

шина ПСДТ (ТУ 16.К71-129-91) – утонённая изоляция из двух слоёв стеклянных нитей, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком;

шина ПСДТ-Л (ТУ 16.К71-129-91) – утонённая изоляция из двух слоёв стеклянных нитей, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком, с поверхностным лаковым слоем;

шина ПСД (ГОСТ 7019-80) – изоляция из двух слоёв стеклянных нитей, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком.

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. На рисунке 3 представлено напряжение пробоя изоляции в зависимости от дозы облучения [3].

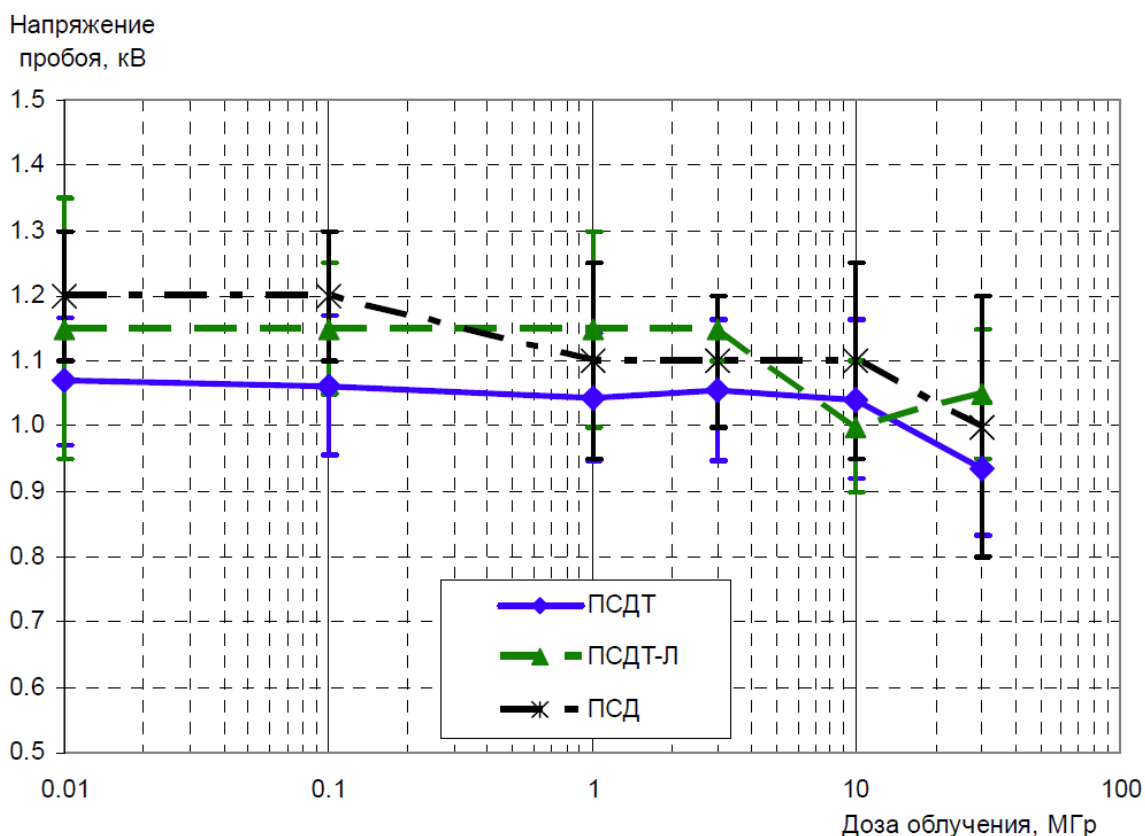


Рис. 3. Напряжение пробоя изоляции в зависимости от дозы облучения ([3] стр. 16).

Вывод: радиационная стойкость отечественных материалов, применяемых при изготовлении МОЭ, не уступает соответствующим зарубежным материалам и соответствует стандартам IEC 544 и стандарту ISO 178. Отечественные материалы могут использоваться для изготовления обмоток МОЭ, рассчитанных на стабильную работу в полях ионизирующего излучения вплоть до накопленных доз облучения в 10 - 30 МГр.

2. Намоточно-изолировочная операция при изготовлении обмоток МОЭ

Намоточно-изолировочная операция состоит из двух технологических переходов - нанесения изоляционного материала (стеклоленты) на проводник и укладки проводника на оправку, размеры которой в точности соответствуют внутренней поверхности обмотки МОЭ. Данные переходы выполняются следующим образом: изоляционный материал (стеклолента)

наносится на участок проводника в один слой вполнахлеста вращением бобины со стеклотентой прямоугольного сечения вокруг проводника, с последующей намоткой этого заизолированного участка на оправку. Намотка обмотки происходит за счет вращательного движения планшайбы установки для намотки. При намотке в местах перехода витков и на лобовых частях обмотки устанавливаются вкладыши и прокладки из стеклотекстолита. После намотки необходимого числа витков выводной конец закрепляют и обрезают, а концы изоляции фиксируют.

На рисунке 4 изображен фрагмент чертежа обмотки 9582-02-01-00 СБ магнита дипольного.

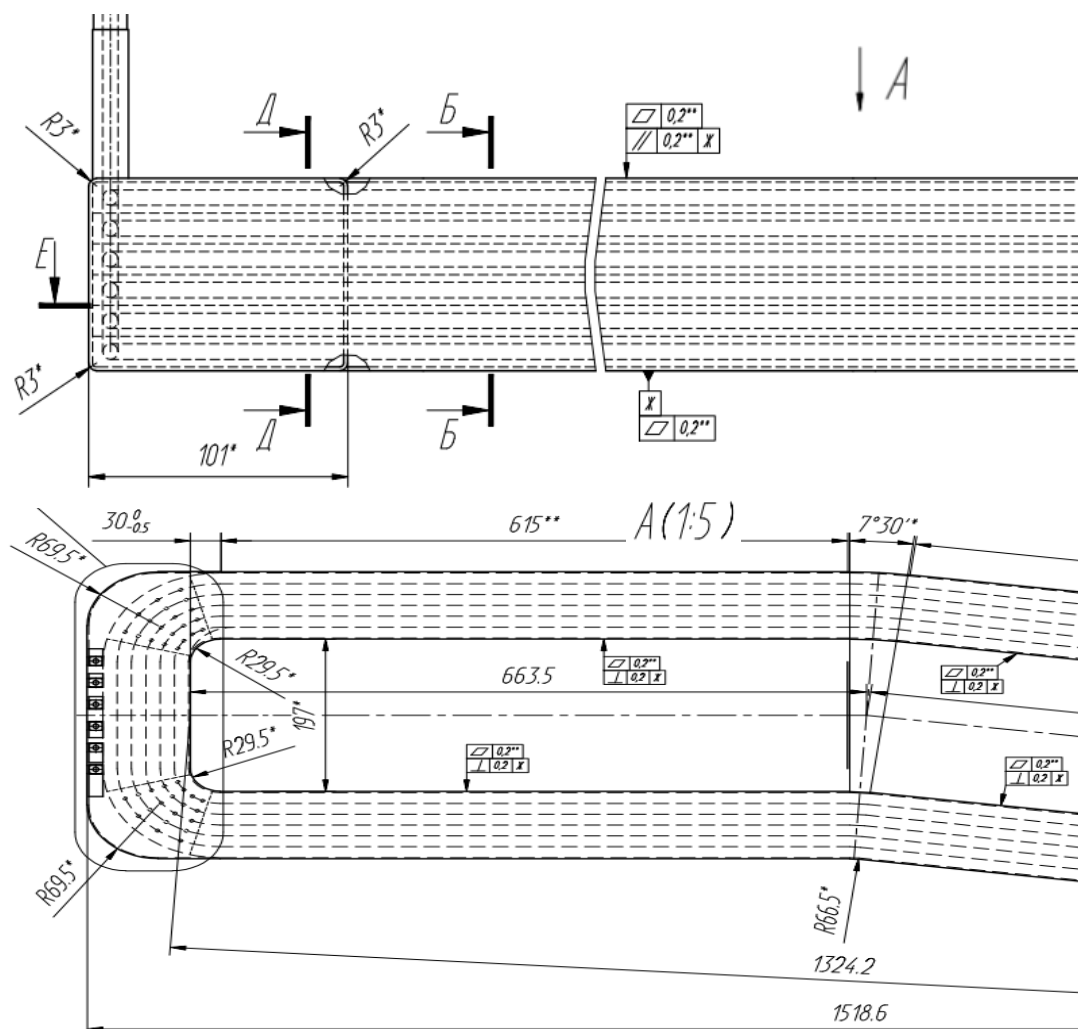


Рис. 4. Фрагмент чертежа обмотки 9582-02-01-00 СБ магнита дипольного.

Намоточно-изолирующая операция технологического процесса является основополагающей операцией для формирования геометрической конфигурации обмотки изготавливаемого МОЭ.

Технологический переход укладки проводника на оправку для формирования обмотки выполняется на специально разработанной для этого установке («Установка для намотки магнитов» КД 9593-00-00-00). Краткое описание установки приведено ниже.

Установка состоит из планшайбы со шпинделем, привода планшайбы, поворотной площадки и стола поворотного с приводом. При разработке установки по намотке был взят стол токарно-карусельного станка 1516 и адаптирован для фиксации площадки и стола поворотного. На рисунке 5 показано устройство стола станка 1516.

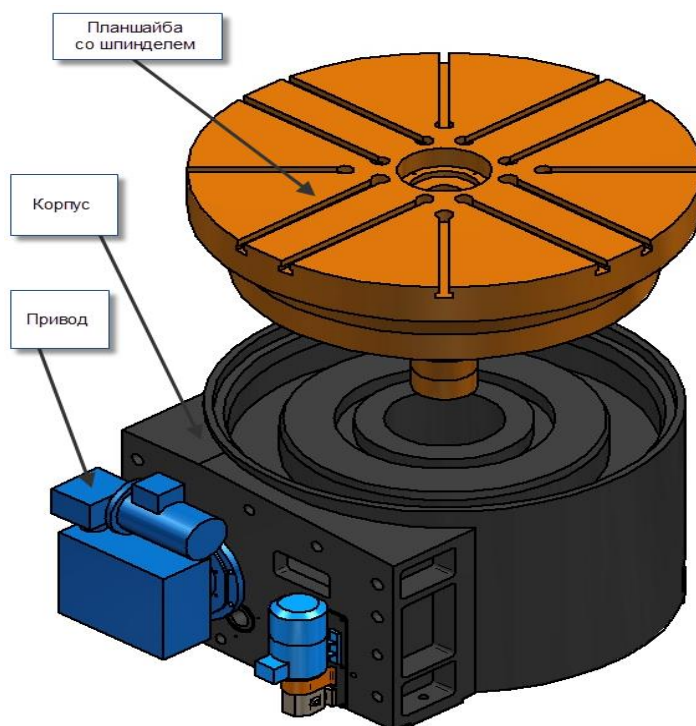


Рис. 5. Устройство стола универсального токарно-карусельного станка 1516.

Для расширения технических возможностей установки для намотки магнитов, а именно: возможности наматывать не только ортогональные обмотки, но и секторальные обмотки и обмотки с отогнутыми лобовыми частями используется стол поворотный с углом поворота от центра ± 90 градусов и оснащенного приводом. На рисунках 6 и 7 изображены вид установки и фрагмент сборочного чертежа установки 9593-00-00-00СБ.

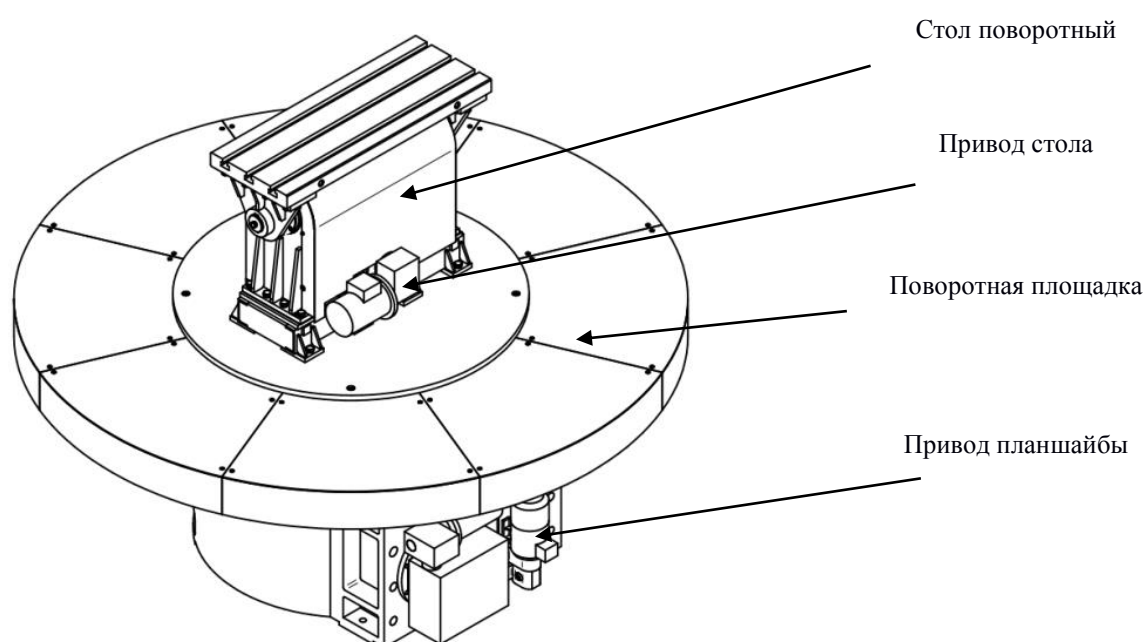


Рис. 6. Вид установки для намотки магнитов.

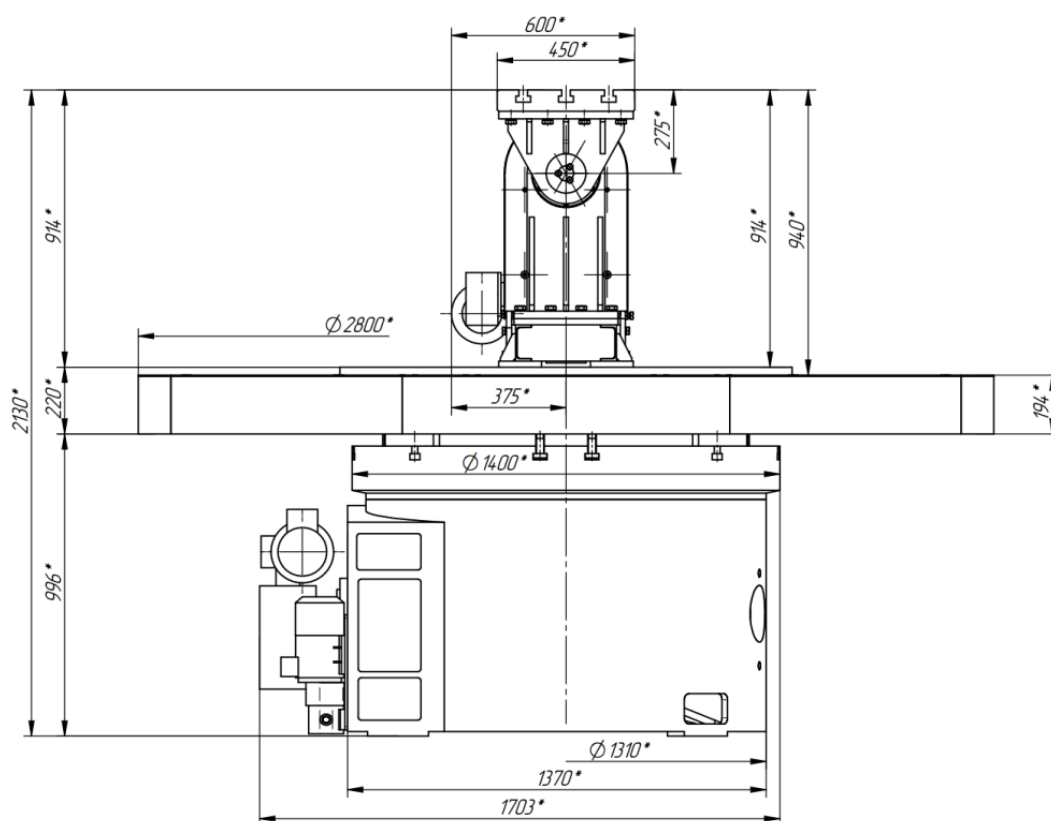


Рис. 7. Фрагмент сборочного чертежа 9593-00-00-00СБ
«Установка для намотки магнитов».

Для выполнения требования к допускам номинальных размеров обмотки, отклонения от перпендикулярности и плоскостности (см. рис. 4), разрабатывается приспособление для намотки обмотки, размеры которой в точности соответствуют внутренней поверхности обмотки и удовлетворяют требованиям по отклонениям от номинальных размеров.

За намоточно-изолирующей операцией идет технологическая операция по нанесению корпусной изоляции на намотанную и изолированную обмотку, для этого обмотку устанавливают в оправку и вручную наносят корпусную изоляцию намоткой трех слоев стеклотенты вполнахлеста.

После нанесения корпусной изоляции идет подготовка к вакуумной заливке.

3. Технологическая операция подготовки к вакуумной заливке

Полученная обмотка устанавливается в пресс-форму, основная функция которой заключается в обеспечении заданных размеров и равномерного обжатия междувитковой и корпусной изоляции с целью придания ей постоянной пористости, то есть равномерного распределения зазора. Постоянная пористость обеспечивает равномерную скорость пропитки и однородность ее структуры. Проницаемость изоляции была измерена экспериментально в условиях одномерного течения компаунда с известной вязкостью.

Пресс-форма с обмоткой устанавливается в вакуумную печь для полимеризации изделий, к ней присоединяются шланги для подачи компаунда от бака установки приготовления компаунда. После закрытия двери печи, включают вакуумные насосы поста вакуумной откачки и вакуумируют печь с формой до 10^{-3} мм.рт.ст. Подогретый до 50°C эпоксидный компаунд из бака установки приготовления компаунда под действием атмосферного давления поступает по трубопроводу в обмотку и пропитывает стеклотенту междувитковой и корпусной изоляции.

Важнейшей характеристикой технологического процесса является скорость пропитки стеклоткани. Необходимые соотношения были получены в модельных опытах с использованием теории фильтрации вязких жидкостей.

При увеличении вязкости компаунда растет количество микропустот в стеклоткани. С другой стороны, слишком малая вязкость компаунда при пропитке под вакуумом приводит к неполной пропитке отдельных участков обмотки.

Специфическая конструкция магнитов и их длительная работа в радиационных полях приводит к высоким требованиям к качеству электрической изоляции обмоток. Большие габаритные размеры обмоток вносят дополнительные проблемы, связанные с вакуумной откачкой, пропиткой эпоксидным компаундом и последующей полимеризацией. В объеме обмотки необходимо максимально уменьшить движущую разность давлений при вакуумной откачке, которая способствует равномерному распределению массы компаунда и перепаду температур по длине обмотки. Объективную опасность для инициации электрического пробоя представляют паро-воздушные пузырьки $\geq 0,5$ мм между проводниками обмотки, образующиеся при смешивании компонентов компаунда.

Для решения упомянутых проблем были исследованы и использованы новые технологические приёмы:

- При изготовлении стеклоленты в качестве замасливателя вместо обычно применяемого парафина используется аminosилан $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}\text{NH}_2$. Это соединение относится к классу силикатов и обеспечивает при пропитке обмотки высокую адгезию, что способствует практически 100% покрытию суммарной поверхности стеклонитей эпоксидным компаундом (обеспечивает высокую смачиваемость, т.е. равновесный контактный угол между поверхностью, образованной волокнами стеклоткани, и каплей эпоксидного компаунда стремится к нулю). Обмотка хорошо пропитывается компаундом, в ней отсутствуют пузырьки, что обеспечивает однородность пропитки.

- Эпоксидный компаунд перед пропиткой проходит стадию вакуумной откачки в специальной механической мешалке, в которой созданы условия перемешивания, способствующие почти полному отделению газовой фазы (т.е. паро-воздушных пузырьков) из объема компаунда. Откачка пресс-формы осуществляется в вакуумной печи;

- После установки обмотки в пресс-форму тщательно измеряется и регулируется перепад давления в точках подвода к пресс-форме эпоксидного компаунда, что обеспечивает равномерность заполнения объема обмотки и устраняет образование газовых мешков.

- Межвитковая изоляция выполнена из стеклоленты с аminosилановым замасливателем, который в несколько раз увеличивает адгезионные силы, что ускоряет и улучшает процесс пропитки обмотки. Обмотка пропитывается компаундом, устойчивым к воздействию радиации. Процесс пропитки осуществляется в вакууме при давлении 10^{-3} мм.рт.ст. при температуре 50°C , а полимеризация – в течение двух часов при температуре 120°C . В результате получается монолитная структура, способная выдержать воздействие различных внешних факторов.

Изготовленная по описанной выше технологии обмотка прозрачна, имеет янтарно-желтый цвет эпоксидной смолы. На рисунке 8 показана фотография такой обмотки.



Рис. 8. Фотография изготовленной обмотки МОЭ.

4. Некоторые свойства применяемых при изготовлении обмоток материалов

Применяемые в намоточных операциях изоляционные материалы отечественного производства:

- эпоксидный компаунд Этал-50 ТУ 2257-050-18826195-99;
- стеклотента марки ЛЭС ГОСТ 5937-81;
- стеклотекстолит СТЭФ ГОСТ-12652-74.

Эпоксидный компаунд Этал-50

Компаунд представляет собой двухкомпонентную смесь горячего отверждения. Предназначен для пропитки капельным методом обмоток электродвигателей с рабочей температурой от -40°C до $+150^{\circ}\text{C}$, а также для использования в качестве связующего при их изготовлении.

Некоторые физико-механические свойства:

- условная вязкость по вискозиметру типа ВЗ-4 с диаметром сопла $4,00 \pm 0,15$ мм при температуре 20°C – 100-500 с;
- продолжительность высыхания в тонком слое, при температуре $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$ до 10 минут;
- продолжительность высыхания в толстом слое, при температуре $125 \pm 5^{\circ}\text{C}$ до 10 минут;
- твердость НВ при температуре 20°C – 14-16 кг/мм;
- твердость НВ при температуре 100°C – 5-8 кг/мм;
- теплостойкость по Мартенсу 130°C ;
- цементирующая способность 400 Н;
- жизнеспособность при комнатной температуре не менее 4 часов;
- удельное объёмное электрическое сопротивление не менее 10^{14} Ом см.

Стеклотекстолит марки СТЭФ ГОСТ-12652-74 (эквивалент американскому G10/G11)

Стеклотекстолит изготавливается толщиной от 0,5 до 50 мм.

Стеклотекстолиты СТЭФ (СТЭФ-1) получают прессованием стеклоткани с эпокси-но-фенолформальдегидным связующим:

- содержание связующего – 30 - 35%,
- режим прессования – 160°C ,
- давление – 4 МПа.

Стеклотекстолит 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 $(40+2)^{\circ}\text{C}$, при напряжении до 1000 В и частоте тока 50 Гц;

Стеклотекстолит марки СТЭФ-1 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 изоляции электрооборудования.

Стеклолента ЛЭС

Используется лента толщиной $0,15 + 0,025$ мм, шириной $20 + 1$ мм.

Замасливатель – аминосилановый (аминосилан $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}\text{NH}$).

Основные технические характеристики:

- разрывная нагрузка по основе, не менее 90 кг;
- линейная плотность 440 г/100 м;
- плотность 2540 кг/м³;
- прочность при растяжении $2,8 \times 10^9$ Па;
- модуль упругости $7,4 \times 10^{10}$ Па;
- удельное электрическое сопротивление при $t 200^\circ\text{C} - 4 \times 10^{12}$ Ом \times см;
- рабочая температура лент при условии отсутствия дополнительных пропиток и нагрузки от -50°C до $+180^\circ\text{C}$.

Заключение

Магнитооптические элементы, изготовленные из отечественных материалов с применением вышеуказанной технологии, успешно эксплуатируются при высоких радиационных нагрузках в НИЦ Курчатовский институт – ИФВЭ на ускорительном комплексе У-70 (более 40 МОЭ), а также в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева) на Большом адронном коллайдере (15 МОЭ).

Список литературы

- [1] Радиационная стойкость материалов. Справочник. Под общей редакцией В.Б. Дубровского. – Москва, Атомиздат, 1973.
- [2] M. Tavlet, A. Fontaine and H. Schönbacher COMPILATION OF RADIATION DAMAGE TEST DATA PART II, 2nd edition Thermoset and thermoplastic resins, composite materials. CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland, 1998.
- [3] В.В. Петров, Ю.А. Пупков Испытания в ИЯФ радиационной стойкости материалов, используемых при создании магнитных систем ускорителей ИЯФ 2010-1 НОВОСИБИРСК 2010.

Рукопись поступила 19 декабря 2023 г.

С.А. Никитин и др.

Опыт разработки технологии намотки обмоток магнитооптических элементов
эксплуатируемых в радиационных условиях (полях)

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	21.12.2023	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 1, 25.	Уч.– изд.л. 1, 7.	Тираж 60.	Заказ 21.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2023-20,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2023
