

# Исследование СП–диполей с полиимидной изоляцией токонесущего элемента

Н.И. Андреев, А.В. Злобин, С.С. Козуб, Н.Л. Смирнов, В.В. Сытник  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

## Введение

Для стабильности характеристик магнитного поля в процессе запитки током сверхпроводящего (СП) магнита необходимо обеспечить механическую стабильность его обмоточного блока. Это достигается предварительным нагружением СП–обмотки при изготовлении магнита, величина которого определяется механическими свойствами обмотки, зависящими от прочностных характеристик изоляции токонесущего элемента. Используемая изоляция СП–кабеля из-за непрочности стеклоленты может иметь повреждения в процессе изготовления обмоток. Стеклолента передавливается при формовке обмоток, особенно на крайних витках, в результате ухудшается точность обмоток. Полиимидная изоляция прочна и эластична, поэтому формуется без повреждений по наружным поверхностям.

Эта статья посвящена исследованию механических свойств обмотки СП–дипольного магнита с полностью полиимидной изоляцией кабеля, определению величины предварительного нагружения обмотки и ее проверке на коротких и полномасштабных моделях СП–диполя.

## Конструкция обмоточного блока СП–диполя

СП–дипольный магнит УНК имеет двухслойную обмотку оболочечного типа, которая намотана кабелем, транспонированным из 19 проволок диаметром 0,85 мм, изготовленных из ниобий-титанового сплава в медной матрице [1]. Поперечное сечение кабеля выбрано в виде трапеции с размерами оснований 1,30 и 1,62 мм, высотой 8,5 мм для внутреннего слоя и, соответственно, 1,33; 1,59; 8,5 мм для наружного слоя.

В качестве электрической изоляции кабеля использована полиимидная пленка толщиной 20 мкм, намотанная с 50%-ным перекрытием. Для склеивания витков в обмотке поверх полиимидной пленки наматывается с зазором 1 мм между витками эпоксидированная стеклолента толщиной 100 мкм и шириной 10 мм (ПС–изоляция). В этой работе исследована возможность замены стеклоленты на полиимидную пленку толщиной 40 мкм, на которую нанесено клеящее покрытие толщиной 5–10 мкм с каждой стороны (ПП–изоляция).

Для удержания витков обмотки от значительных перемещений под действием ponderomotorных сил обмотка бандажируется под прессом с помощью воротников из нержавеющей стали. Соединение воротников и фиксация предварительной нагрузки на обмотку осуществляется с помощью цилиндрических выступов и отверстий в воротниках, а также шпонок, вставляемых с двух сторон в пазы, расположенные в медианной плоскости. Обмотка охлаждается жидким гелием при температуре 4,4 К.

## Механические свойства СП–обмотки

На рис.1 представлены гистограммы измеренного в интервале давлений 50–100 МПа модуля упругости внутреннего слоя для 10 полномасштабных и 12 коротких

дипольных полуобмоток с ПП-изоляцией и соответственно 40 и 10 полуобмоток с ПС-изоляцией кабеля. Модуль упругости обмоток с ПП-изоляцией находится в пределах 9–13 ГПа, что несколько ниже, чем в обмотках с ПС-изоляцией (12–17 ГПа). Это объясняется тем, что модуль упругости полиимидной пленки при комнатной температуре составляет 1,5 ГПа, тогда как для эпоксидированной стеклоленты он равен 6 ГПа. При понижении температуры до 77 К модуль упругости обмоток с ПП-изоляцией возрастает до 21–23 ГПа, что примерно совпадает со значением, полученным для обмоток с ПС-изоляцией (25 ГПа). При дальнейшем понижении температуры до 4 К модуль упругости обмоток практически не меняется [2].

На рис.2 показаны результаты исследования ползучести СП-обмотки, полученные на прямоугольных пакетных образцах, изготовленных при давлении спекания 100 МПа. Ползучесть обмотки существенно зависит от приложенной нагрузки, времени ее действия, используемых изоляционных материалов.

Проведенные в течение трех лет наблюдения показали, что процесс ползучести обмотки в течение первых двух месяцев носит логарифмический характер (за это время ползучесть реализуется на 2/3 от общей величины), затем зависимость деформации от времени становится линейной. При замене изоляции кабеля с ПС на ПП происходит увеличение ползучести обмотки (кривые 1 и 3). При повышении нагрузки на образец с 50 до 100 МПа ползучесть обмотки с ПП-изоляцией в течение года увеличилась с 0,18 до 0,55% (кривые 2 и 4). Снижение давления запечки образца со 100 до 50 МПа увеличило его ползучесть (кривые 3 и 5).

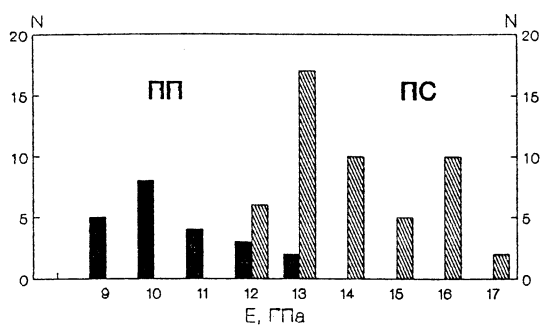


Рис. 1: Распределение значений модуля упругости при изготовлении партии СП-обмоток с ПП- и ПС-изоляцией.

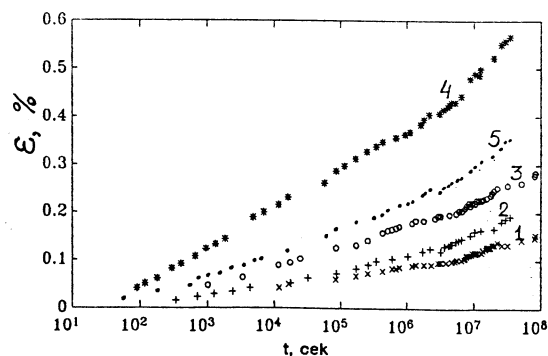


Рис. 2: Ползучесть образцов при различной нагрузке. ПС-изоляция: 1 —  $p = 80$  МПа. ПП-изоляция: 2 —  $p = 50$  МПа; 3 —  $p = 80$  МПа; 4 —  $p = 100$  МПа; 5 —  $p = 80$  МПа (давление спекания 50 МПа).

Температурная деформация обмотки в азимутальном направлении при захлаждении больше, чем у воротников, изготовленных из нержавеющей стали, что приводит к падению предварительного давления в обмотке при рабочей температуре. В этом направлении температурная деформация обмотки с ПП-изоляцией несколько выше, чем с ПС-изоляцией кабеля (0,43 и 0,32% соответственно) [3].

Для определения формуемости полиимидной изоляции было изготовлено несколько обмоток, при формовке которых использовались прокладки различной толщины. Установлено, что формуемость ПП- и ПС-изоляции практически одинакова и размеры обмотки могут быть изменены в диапазоне до 1,5 мм.

Изучение разброса азимутальных размеров обмоток при давлении 70 МПа показало его схожесть для ПП- и ПС-изоляции, что обусловлено использованием общей формирующей оснастки. Среднеквадратичный разброс отклонений размеров обмоток от калибровочного значения составил  $\pm 60$  мкм.

### **Выбор предварительного нагружения СП-обмотки**

Значение предварительной нагрузки должно быть достаточным для компенсации падения давления в обмоточном блоке при отпуживании воротников после снятия прессовой нагрузки, при ползучести обмотки, ее захлаживании и запитки током. Зная зависимость модуля упругости обмотки от температуры, а также деформацию обмотки при ее захлаживании и ползучести, можно определить падение давления в каждом из этих процессов.

Падение давления между граничными витками обмотки и бандажом под действием пондеромоторных сил при запитке током до получения поля в апертуре 6 Тл, согласно расчетам, составляет для внутреннего слоя 50 МПа, для наружного слоя 25 МПа и не зависит от модуля упругости. Расчетное падение давления в обмотке при захлаживании вследствие различной термической деформации обмотки и бандажа составит 28 МПа при ПП-изоляции кабеля и 10 МПа при ПС-изоляции.

Исходя из рассмотренных выше результатов измерения ползучести образцов обмотки при комнатной температуре, уменьшение предварительного давления в обмотке, обусловленное этим процессом, составит около 20 МПа. Эта величина была подтверждена результатами измерения ползучести в течение 9 месяцев, полученными на обмотке с ПП-изоляцией.

Суммируя изменение давления в слоях в результате действия перечисленных выше факторов, а также учитывая колебания размеров обмотки, воротников и шпонок, получаем величину предварительного давления при комнатной температуре 100 МПа для внутреннего слоя и 85 МПа для наружного слоя обмотки с ПП-изоляцией. При использовании ПС-изоляции указанные величины необходимо уменьшить примерно на 20 МПа.

### **Результаты исследования СП-диполей**

Механическая стабильность витков обмотки обеспечивает постоянство характеристик магнитного поля в апертуре при запитке током и влияет на тренировку СП-диполя. Приведенные выше соображения относительно величины предварительного давления в обмоточном блоке следует рассматривать как оценочные. Для экспериментальной проверки правильности выбора этой величины были проведены измерения конструктивных нелинейностей магнитного поля однометрового обмоточного блока с ПП-изоляцией. Изменение конструктивных нелинейностей при токах до 7,5 кА, связанное с деформацией обмоточного блока, составило менее  $2 \times 10^{-4}$ , что находится в пределах предъявляемых требований. Повторные измерения, проведенные на этом магните через год, показали высокую воспроизводимость магнитных характеристик.

На рис.3а приведена зависимость нормальной нелинейности  $C_5$  при вводе тока для полномасштабных диполей с ПС- и ПП-изоляцией. Декапольная гармоника наиболее чувствительна к движению витков обмотки под действием пондеромоторных сил, и по ее изменению при больших токах можно судить об их движении. Видно, что в диа-

пазоне токов (2000–5000 А) изменение этой гармоники для магнита с ПП-изоляцией, как и для магнита с ПС-изоляцией, составляет всего  $1 \times 10^{-4}$ .

На рис.3б приведены результаты тренировки полномасштабных диполей, из которых следует, что переход с ПС- на ПП-изоляцию не ухудшил тренировку магнита. Таким образом, характер тренировки и качество магнитного поля говорят о том, что механическая стабильность обмоток с ПП-изоляцией не хуже, чем с ПС-изоляцией.

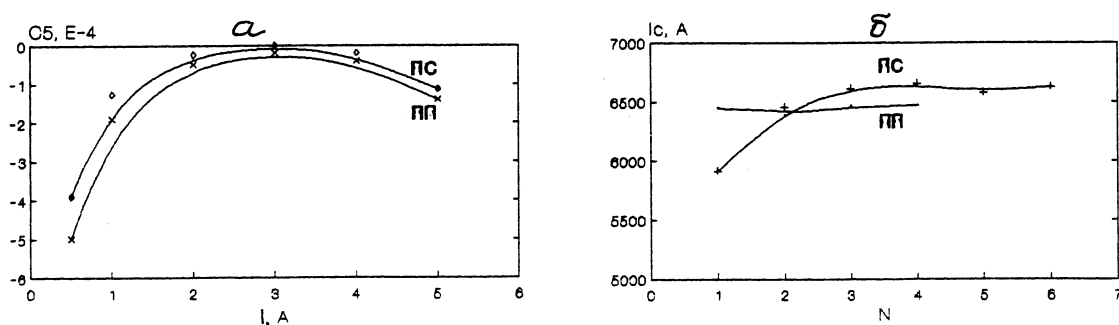


Рис. 3: Результаты испытаний полномасштабных СП-дипольных магнитов с ПС- и ПП-изоляцией: (а) — зависимость нормальной декапольной нелинейности от тока; (б) — зависимость критического тока от количества переходов в нормальное состояние.

## Заключение

Измерены механические свойства обмоток СП-диполей с полностью полиимидной изоляцией кабеля, на основе которых определена величина их предварительного сжатия при сборке. Изготовлена и испытана серия коротких и полномасштабных СП-диполей с данной изоляцией кабеля. В процессе испытаний диполей установлено, что при замене стеклотенты на полиимидную пленку не происходит ухудшение тренировки магнита и обеспечивается постоянство магнитных характеристик в цикле УНК. Результаты проведенных исследований показали, что обмотки с полностью полиимидной изоляцией кабеля менее подвержены механическим повреждениям, чем обмотки со стеклотентой, технологичны при изготовлении, обеспечивают необходимые характеристики диполя и могут быть использованы в производстве СП-магнитов УНК.

## Список литературы

- [1] Ageyev A.I. et al. EPAC-92. Berlin, Germany, 1992, v.2, p.1411.
- [2] Andreev N.I. et al. Preprint ИИЭР 93-61. Protvino, 1993.
- [3] Gladky V.N. et al. Cryogenics, 1995, v.35, №1, p.67.