

# Разработка квадруполя с высоким градиентом поля на основе Nb<sub>3</sub>Sn\*

И.В.Богданов, Л.М.Васильев, В.И.Гридасов, К.П.Мызников, П.И. Слабодчиков,  
В.В.Сытник, Л.М.Ткаченко, П.А.Щербаков  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия  
А.Д.Никулин, А.К.Шиков, А.Г.Силаев, А.Е.Воробьева  
Институт неорганических материалов им. А.А.Бочвара, Москва, Россия  
Е.Ю.Клименко, С.И.Новиков, М.С.Новиков  
Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва, Россия

**Введение.** Для повышения светимости в коллайдерах требуется уменьшить бета-функцию в месте встречи пучков. Это приводит к необходимости увеличения силы фокусирующих квадрупольных магнитов. При использовании квадруполей с токнесущим элементом из NbTi приходится понижать рабочую температуру до 1.8 К, что приводит к усложнению криогенной системы и повышению ее энергопотребления. Дальнейшее повышение градиента поля возможно при переходе на другой СП-материал с более высокими характеристиками по критическому току, например использование сплава Nb<sub>3</sub>Sn при 4.6 К.

В ИФВЭ разработана конструкция СП-квадруполя с высоким градиентом поля, обмотка которого основана на СП-материал Nb<sub>3</sub>Sn [1]. Основные требования, предъявляемые к магниту — максимальный градиент 220 Тл/м, максимальная температура 4.6 К, диаметр апертуры обмотки 70 мм, низшие нелинейности поля и интеграла поля на радиусе нормализации 25 мм — не должны превышать 10<sup>-4</sup>.

Для изготовления обмоточного блока выбран СП-материал Nb<sub>3</sub>Sn марки МКНОС-08-25531 [2], имеющий медную оболочку. Основные характеристики СП-провода: диаметр провода 0.8 мм, число волокон 25531, диаметр волокон 1.96 мкм, шаг твиста 10 мм, объемное содержание меди 36%, отношение Nb/бронза без меди 1:2.38. Критическая плотность тока этого провода в поле 12 Тл и температуре 4.2 К равна 550 А/мм<sup>2</sup> без меди. Для изготовления СП-квадруполя будет использоваться СП-провод с критической плотностью тока, на 10% превышающей существующую. В расчетах использовалась реальная величина 550 А/мм<sup>2</sup>.

**1. Выбор формы поперечного сечения.** Расчеты по оптимизации геометрии как поперечного сечения, так и лобовых частей, проводились с помощью программы HARM-3D [3] в приближении бесконечно большой магнитной проницаемости магнитопровода конечной длины с цилиндрической внутренней поверхностью. Реальная зависимость  $\mu(B)$  в магнитопроводе учитывалась с помощью программы MULTIC [4] для определения толщины магнитопровода и различных вырезов в нем.

На первом этапе были рассмотрены два типа геометрии поперечного сечения: арочная конструкция с трапецевидным сечением кабеля (рис.1а) и геометрия с с уменьшенной разностью между основаниями трапеции (не полностью кистоунированный кабель, рис.1б). После проведения цикла расчетов оказалось, что обе геометрии дают практически одинаковые как качество поля, так и все остальные магнитные характеристики. Арочная конструкция обладает более надежными механическими свойствами и имеет более простую технологию изготовления. Однако СП-провод в кабеле арочной конструкции сильно деформируется. Величину деформации определим как  $\delta_h = (2d - h_1)/2d$ , где  $d$  — диаметр СП-провода,  $h_1$  — меньшее основание витка трапецевидного сечения. В арочной конструкции  $\delta_h$  достигает величины 30%, что может привести к деградации критического тока.

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ и частичном финансировании FNAL.

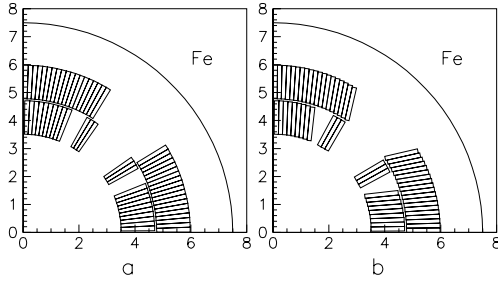


Рис. 1: Поперечное сечение квадруполя; а — арочная конструкция, б — конструкция с неполностью кистунированным кабелем.

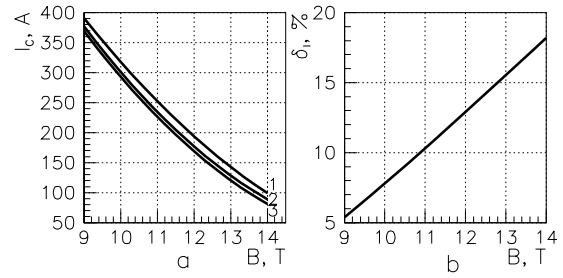


Рис. 2: Зависимости критического тока для проволоки с различной деформацией (а) (1 — 0%, 2 — 20%, 3 — 30%) и деградации критического тока в проволоке с деформацией 30% (б) от магнитного поля.

**2. СП-кабель и СП-проволока.** Для исследования влияния деформации провода на его токонесущие характеристики изготовлены кабель прямоугольного сечения с нулевой деформацией проволоки и два образца трапециевидального кабеля с  $\delta_h$  20 и 30%. Образцы этих кабелей, извлеченные из них проволоки, а также недеформированная проволока подвергались одновременному термодиффузионному отжигу с целью образования СП-соединения  $Nb_3Sn$ . Измерения токонесущей способности кабелей и единичных проводов проводились в поле соленоида с максимальной индукцией 15 Тл при температуре 4.2 К.

На рис.2а представлены зависимости критического тока от магнитного поля для исходной проволоки (1) и проволоки, извлеченных из кабелей с величиной  $\delta_h$ , равной 20% (2) и 30% (3). Рис.2б показывает зависимость деградации критического тока в проволоке с деформацией 30%:  $\delta_I = (I_{30} - I_0)/I_0$  ( $I_{30}$  — критический ток деформированной проволоки,  $I_0$  — исходной) от магнитного поля. Из рис.2б видно, что для максимального расчетного поля в обмотке 8.8 Тл уменьшение токонесущей способности извлеченных из кабеля проволоки составляет приблизительно 5% по сравнению с исходной проволокой.

Полные результаты исследований токонесущей способности проводов и кабелей из  $Nb_3Sn$  представлены в [5], где показано, что при прочих равных условиях значения деградации критического тока в кабеле не превышают соответствующих величин в проводе. Деградация критического тока, равная 5%, вполне приемлема, поэтому за основу выбрана именно арочная конструкция. В процессе производства кабеля измерялась толщина кабеля по средней линии во время калибровки и после термообработки под давлением до 70 МПа. Результаты этих измерений, а также результаты измерений высоты пакетов, состоящих из 10 отрезков кабеля, показали, что в процессе термодиффузионного отжига изменяется толщина кабеля. Уменьшение толщины кабеля с  $\delta_h = 20\%$  до и после термодиффузионного отжига составляет 13.5 мкм, а для кабеля с  $\delta_h = 30\%$  — примерно 11 мкм. Величины этих изменений необходимо учитывать при проектировании.

**3. Оптимизация поперечного сечения.** Двухслойная обмотка позволяет получить необходимый градиент поля и удовлетворяет прочим требованиям. Увеличение числа слоев усложняет конструкцию и не дает ощутимого выигрыша по всем параметрам поля.

Далее мы будем пользоваться стандартным представлением поля в апертуре магнита:

$$B_y + iB_x = B_0 \sum_{n=1}^{\infty} W_n \left( \frac{r}{r_0} e^{i\Theta} \right)^{n-1}, \quad (1)$$

где  $B_0 = G_0 r_0$  — поле на радиусе нормализации  $r_0 = 25$  мм;  $G_0$  — градиент поля в центре квадруполя;  $W_n = C_n + iS_n$  — нелинейности поля  $n - 1$  порядка. Для нормализации удобно

выбрать  $G_0$  при бесконечно большой магнитной проницаемости ярма, тогда разность  $1 - C_2$  будет характеризовать величину насыщения магнитопровода.

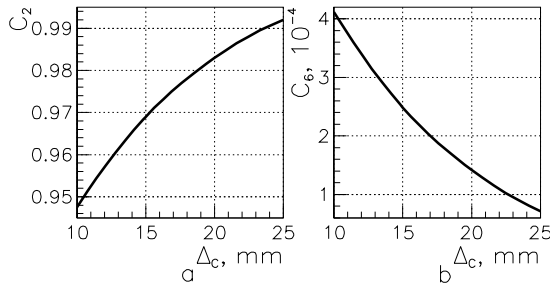


Рис. 3: Зависимости  $C_2$  (a) и  $C_6$  (b) от толщины бандажа.

Толщина бандажа  $\Delta_c$  определяет расстояние между внешним радиусом наружного слоя и внутренней поверхностью магнитопровода. На рис.3 показаны зависимости  $C_2$  и  $C_6$  от  $\Delta_c$ , из которых следует, что для высокого качества поля на всех уровнях тока минимальная толщина  $\Delta_c$  должна быть 25 мм.

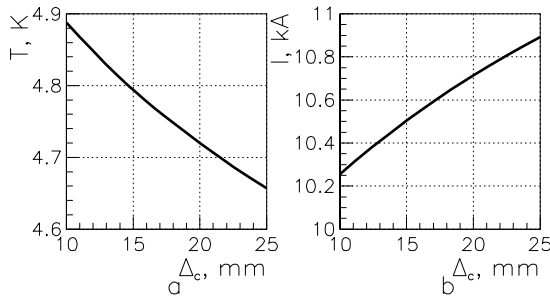


Рис. 4: Зависимости температуры перехода в нормальное состояние квадрупольа (a) и тока в витке (b) от  $\Delta_c$ .

**4. Выбор геометрии лобовых частей.** Для уменьшения деформации кабеля на лобовых частях каждый слой делится на три блока, между ними устанавливаются прокладки. Средний виток в блоке укладывается по форме “постоянного периметра”, соседние витки плотно поджимаются к нему и т.д. (рис.5).

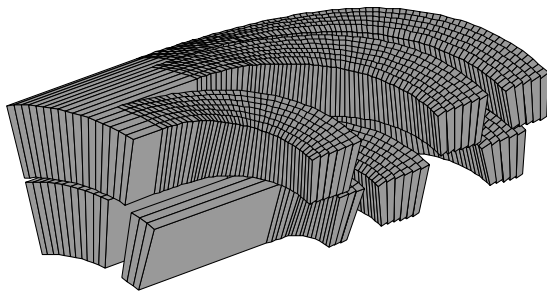


Рис. 5: Общий вид оптимизированных лобовых частей квадрупольа.

Из технологических соображений оба слоя должны быть выровнены по полным длинам обмоток. Толщины прокладок в первом слое выбираются из условия подавления низших краевых нелинейностей поля  $C_6$  и  $C_{10}$ . При определении местоположения первой прокладки, отсчитывая от края магнита, учитывалось дополнительное условие получения максимальной эффективной длины квадрупольа. Вторая прокладка была продолжением межвитковой прокладки в центральном сечении, подавляющей нелинейность поля  $C_{10}$ . Очевидно, что при независимом подавлении нелинейностей поля в центральном сечении и краевых нелинейностей поля, интегральные нелинейности также будут подавлены. Прокладки во втором слое были использованы для минимизации превышения

Высокое качество поля достигается путем соответствующего выбора углов слоев, при этом подавляется нелинейность  $C_6$ , а для подавления нелинейности  $C_{10}$  необходимо ввести межвитковую прокладку в первый слой. Из технологических соображений угол второго слоя должен быть меньше, чем угол первого слоя. Расчеты показали, что для обеспечения необходимого температурного запаса квадрупольа достаточно 28 проволок в СП-кабеле.

Толщина бандажа  $\Delta_c$  определяет расстояние между внешним радиусом наружного слоя и внутренней поверхностью магнитопровода. На рис.3 показаны зависимости  $C_2$  и  $C_6$  от  $\Delta_c$ , из которых следует, что для высокого качества поля на всех уровнях тока минимальная толщина  $\Delta_c$  должна быть 25 мм.

Расчеты механической прочности бандажа также показывают, что минимальная его толщина должна быть 25 мм. С другой стороны, отодвигая магнитопровод от обмотки, мы тем самым уменьшаем его вклад в градиент поля, что приводит к увеличению тока в витке и к уменьшению температурного запаса квадрупольа, как это показано на рис.4. Из этих рисунков следует, что для обеспечения рабочей температуры 4.6 К максимальная толщина бандажа не должна превышать 25 мм. Поэтому толщина бандажа квадрупольа выбрана равной 25 мм. Расчеты зависимостей магнитных характеристик от толщины магнитопровода показали, что она должна быть не менее 80 мм.

Расчеты зависимостей магнитных характеристик от толщины магнитопровода показали, что она должна быть не менее 80 мм.

Из технологических соображений оба слоя должны быть выровнены по полным длинам обмоток. Толщины прокладок в первом слое выбираются из условия подавления низших краевых нелинейностей поля  $C_6$  и  $C_{10}$ . При определении местоположения первой прокладки, отсчитывая от края магнита, учитывалось дополнительное условие получения максимальной эффективной длины квадрупольа. Вторая прокладка была продолжением межвитковой прокладки в центральном сечении, подавляющей нелинейность поля  $C_{10}$ . Очевидно, что при независимом подавлении нелинейностей поля в центральном сечении и краевых нелинейностей поля, интегральные нелинейности также будут подавлены. Прокладки во втором слое были использованы для минимизации превышения

поля на лобовых частях. Максимальное поле на лобовых частях первого слоя после установки прокладок, подавляющих низшие краевые нелинейности  $C_6$  и  $C_{10}$  в первом слое и при нулевых толщинах межблочных прокладок во втором слое, на 12% выше максимального поля в центральном сечении при длине магнитопровода, равной полной длине обмоток.

Как видно из рис.6а, укорачиванием магнитопровода  $\Delta L_F$  не удается полностью выровнять эти значения. Вертикальной линией на этом рисунке показана граница минимальной прямолинейной длины блоков. Для дальнейшего снижения превышения поля наиболее эффективно увеличить толщину второй, отсчитывая от края магнита, межблочной прокладки во втором слое  $S_{22}$  (первый индекс обозначает номер слоя, второй — номер прокладки). Рис.6б показывает, что при толщине этой прокладки  $S_{22} = 17$  мм величина максимального поля на лобовой части первого слоя  $B_1$  равна величине максимального поля в центральном сечении  $B_0$ . Поле на лобовой части первого слоя всегда меньше  $B_0$ . Результаты, представленные на рис.6б, получены при длине ярма, равной минимальной длине прямолинейной части блоков, подавленных низших краевых нелинейностей поля и толщине прокладки  $S_{21} = 4$  мм.

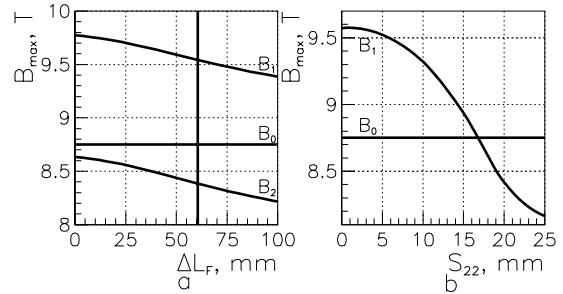


Рис. 6: Зависимость максимального поля на лобовых частях от укорачивания магнитопровода (а) и толщины второй прокладки во втором слое (б);  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_0$  — максимальные поля на лобовых частях первого и второго слоев и в центральном сечении.

ярма, равной минимальной длине прямолинейной части блоков, подавленных низших краевых нелинейностей поля и толщине прокладки  $S_{21} = 4$  мм.

**Заключение.** В результате оптимизации геометрических параметров, влияющих на качество поля, была разработана конструкция сверхпроводящего квадрупольного магнита с номинальным градиентом поля 220 Тл/м, использующая имеющийся СП-провод из  $Nb_3Sn$ . Учитывая возможность увеличения  $j_c$ , можно рассчитывать на повышение градиента до 250 Тл/м. Арочная конструкция обмоточного блока и выбор достаточной толщины бандажа из нержавеющей стали обеспечивают механическую прочность квадрупольного магнита. Оптимальное распределение витков в центральной и краевой частях обмоток подавляет низшие нелинейности поля и интеграла поля и минимизирует превышение поля на лобовых частях. При оптимизации лобовых частей учитывалась возможность получения максимальной эффективной длины магнита. Разработки проведены с учетом существующей в ИФВЭ технологии изготовления СП-квадрупольных магнитов.

## Список литературы

- [1] I.V.Bogdanov et al. Geometry Optimization of a High Gradient Quadrupole Magnet. — In: Proc. of XV Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, 1997.
- [2] I.Davidov et al. Development and investigation of multifilamentary  $Nb_3Sn$  conductors to be used in the ITER. — IEEE Trans. Magn., vol.30, No.4, p.2316, July 1994.
- [3] S.V.Purtov, L.M.Tkachenko. HARM-3D — a Code to Calculate magnetic characteristics of SC-magnets. — In: Proc. of XV Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, 1997.
- [4] Л.М.Ткаченко. Пакет программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной конфигурации. Препринт ИФВЭ 98-28, Протвино, 1998.
- [5] I.V. Bogdanov et al. Study of the  $Nb_3Sn$  cable characteristics for SC-quadrupole with high gradient. — In: Proc. of XV Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, 1997.