

Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

П.А.Дурнов, В.Х.Лев, С.Ф.Михайлов,
В.В.Петров, М.Масузава

ОПЫТ КРУПНОСЕРИЙНОГО
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ
МАГНИТОВ ДЛЯ В-ФАБРИКИ КЕК

ИЯФ 2000-13

Новосибирск
2000

Опыт крупносерийного изготовления корректирующих магнитов для В-фабрики КЕК

П.А.Дурнов, В.Х.Лев, С.Ф.Михайлов, В.В.Петров

Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера
630090 Новосибирск, Россия

М.Масузава

(КЕК, Цукуба, Япония)

Аннотация

Для В-фабрики КЕКВ (Цукуба, Япония) изготовлена крупная серия корректирующих магнитов. В работе подробно описывается процесс изготовления и измерений корректоров. Приводятся результаты магнитных измерений с анализом возможных причин разбросов параметров магнитов.

Abstract

**Experience of mass-scale production
of КЕК В-factory correction magnets**

P.Durnov, V.Lev, S.Mikhailov, V.Petrov

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

M.Masuzawa

КЕК High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Japan

A large batch of correction magnets for the КЕКВ В-factory (Tsukuba, Japan) has been manufactured at BINP. The process of manufacturing and measuring these magnets is described in detail. The results of magnetic measurements and possible reasons causing the dispersion of magnetic parameters are described.

Введение

В 1996–97 гг. ИЯФ осуществил проектирование и изготовление горизонтальных корректирующих магнитов для В-фабрики КЕКВ (Япония). Работа продолжалась в течение полутора лет. За время работы были изготовлены четыре типа корректоров, общим количеством 831 магнит. Эти магниты были установлены на позитронном кольце (LER) с энергией 3.5 ГэВ и электронном кольце (HER) с энергией 8 ГэВ В-фабрики КЕКВ. Для каждого из колец изготавливалось по два типа магнитов - один тип магнитов для установки на прямолинейном промежутке с ускоряющими резонаторами, другой тип - для остальных мест кольца. В соответствии с типами магнитов были утверждены их названия LER_ARC, LER_RF, HER_ARC и HER_RF. Этими обозначениями мы и будем пользоваться в дальнейшем.

Впервые в институте проводилась столь растянутая во времени работа по изготовлению такой многочисленной партии изделий, которая требовала сохранения стабильности магнитных параметров с высокой абсолютной точностью. Поэтому опыт этой работы, по мнению авторов, может быть полезен в будущем.

1. Параметры магнитов

Основные параметры корректирующих магнитов, взятые за основу при проектировании магнитов, приведены в Таблице 1.

Расчёты геометрии магнитов проводились сначала двухмерным вариантом программы MERMAID(2D), а затем трёхмерным вариантом MERMAID(3D).

В данном случае двухмерный расчёт поля оказался недостаточным из-за того, что, во-первых, все четыре типа магнитов имеют большие апертуры относительно их длин, поэтому весьма существенным становится влияние краевых полей на конфигурацию поля в рабочей части, что не может учитывать двухмерная модель; во-вторых, при двухмерном расчёте не учитывается наличие шихтовки железа в магните, что существенно сказывается на результате расчёта, особенно при больших апертурах магнитов.

С помощью математического моделирования были выбраны форма и размеры шимов таким образом, чтобы обеспечить максимальную однородность интеграла магнитного поля вдоль оси пучка в рабочей области магнита.

В процессе проектирования было проведено исследование влияния шихтовки магнитопровода на величину интеграла магнитного поля. Результаты показали, что при малых величинах отношения длины магнита к магнитному зазору весьма существенным становится влияние отличия магнитного сопротивления ярма в продольном и поперечном направлениях на интеграл поля магнита. Такое отличие возникает из-за отличия коэффициента заполнения магнитопровода железом от единицы.

Таблица 1

Тип магнита		LER_ ARC	HER_ ARC	LER_ RF	HER_ RF
Полное число магнитов		392	360	25	54
Энергия частиц	ГэВ	3.5	8	3.5	8
Угол поворота	мрад	1	1	1	1
Интеграл поля	Гсхсм	12520	28450	11800	26620
Магнитное поле в центре	Гс	392	1008	323	733
Точность в апертуре ± 50 мм		$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-2}$
Длина шихтованного магнитопровода	мм	198	198	190	190
Зазор в центре магнита	мм	128	80	190	190
Полная длина магнита	мм	292	301	292	332
Зазор между шимами	мм	116	73	172	172
Число обмоток		2	2	2	2
Число витков в обмотке		400	648	500	1152
Ток возбуждения	А	5	5	5	5

С помощью программы MERMAID(3D) проводилось также исследование влияния положения возбуждающих катушек на магнитопроводе на параметры магнитного поля корректоров. В данной конструкции магнитов это влияние оказалось пренебрежимо малым, что позволило значительно снизить требования на сборку этой части магнита.

2. Конструкция магнитов

Все четыре типа магнитов близки по конструкции и технологии изготовления и отличаются друг от друга только размерами. Конструктивно изделие состоит из собственно самого магнита и регулируемой подставки. На Рис.1 изображён для примера общий вид корректирующего магнита HER_RF.

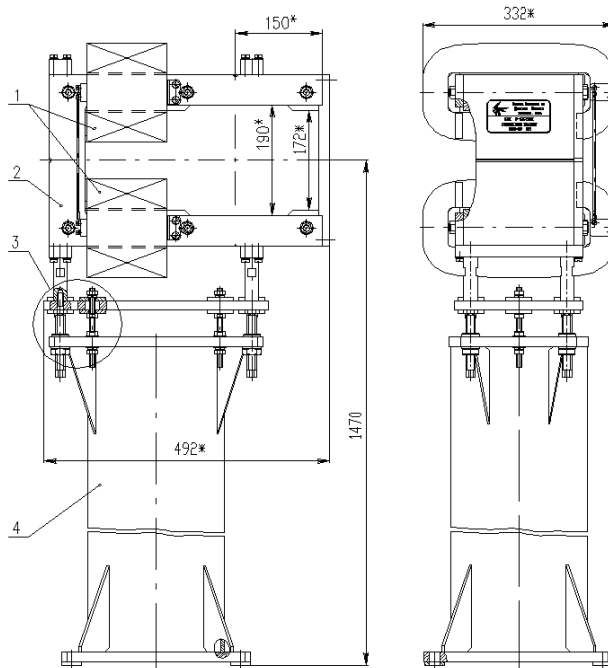


Рис.1. Общий вид магнита типа HER_RF.

Каждый магнит состоит из шихтованного С-образного магнитопровода [2] и двух возбуждающих обмоток [1]. Магнитопровод собран из

С-образных пластин, полученных штамповкой из листов электротехнической стали 2312 толщиной 0.5 мм, ГОСТ 21427.2—83, на специальных прецизионных штампах (завод ЗВИ, г.Москва и завод СИБТЕКСТИЛЬМАШ, г.Новосибирск). По краям магнитопровода устанавливаются концевые пластины из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Магнитопровод собирается на специальном стапеле и стягивается шестью стальными шпильками.

Обмотки возбуждения магнитов рассчитывались и проектировались, исходя из основных параметров корректирующих магнитов. Были определены геометрия обмоток, число витков и их положение на магнитопроводе для каждого типа корректоров. Исходя из величины тока возбуждения 5А и из геометрии обмоток (основная определяющая величина – толщина обмотки), были выбраны диаметр и тип медного провода, которым мотались обмотки.

Обмотки корректоров всех типов намотаны проводом ПЭВ-2, Ø2.12/2, ГОСТ 7262-78, который имеет максимально допустимую рабочую температуру 105°С. Обмотки пропитаны эпоксидным компаундом ЭПК-4Д-88 с максимальной рабочей температурой 85°С. Перепад температур по толщине обмотки составляет $\Delta t \leq 10^\circ\text{C}$ для обмоток типа LER и $\Delta t \leq 15^\circ\text{C}$ для типа HER. Результаты расчётов были подтверждены при испытаниях обмоток с хорошей точностью.

Обмотки мотаются цельным проводом (без промежуточных паяк) на специальном намоточном приспособлении, которое имеет устройство для натяжения провода и датчик измерения полного числа намотанных витков. На стальной керн предварительно укладывается стеклотекстолит ЛЭС 0.15×20 ГОСТ 5937-81 в два слоя, а от боковых щёк приспособления обмотка изолирована специальными прокладками из стеклотекстолита СТЭФ-1 ГОСТ 12652-74 толщиной 0.5 мм. В качестве межслоевой изоляции используется кабельная бумага К-012.

Обычно при намотке такого рода обмоток происходит значительное «распушение», увеличение толщины обмотки, особенно по длинной ее стороне. Поскольку габариты обмотки жёстко ограничены, то для уменьшения распушения применяется устройство для натяжения провода, при котором напряжение в проводе при намотке больше предела текучести материала на 5-8%. Сила натяжения контролируется специальным динамометром и выборочными измерениями. Уменьшение диаметра провода в процессе намотки практически составляет 0.10 – 0.12 мм. После намотки

на наружной поверхности обмотки укладываются ещё два слоя стеклотенты; затем измеряются сопротивление обмотки и её габариты.

Горячая пропитка обмотки осуществляется эпоксидным компаундом методом «Монолит» (технологическая инструкция ПТО.054.008). После пропитки изделие зачищается, покрывается эпоксидным лаком ЭП-730 ГОСТ 20824-81 и отправляется в группу испытания и контроля, где окончательно проверяются геометрические, механические и электрические свойства изделия, а также производится проверка на отсутствие короткозамкнутых витков.

Обмотки жёстко крепятся на магнитопроводе с помощью специальных изоляционных вкладышей так, чтобы обеспечить максимальную теплоотдачу с наружных поверхностей обмоток.

Регулируемая подставка [4] выполнена в виде стальной цилиндрической опоры, базирующейся на стальной пластине. Регулировочный механизм [3], расположенный на верхней плите подставки, обеспечивает геодезическую выставку магнита в пределах ± 20 мм по высоте и ± 7 мм в горизонтальной плоскости. Корректирующий магнит устанавливается на регулируемую подставку на четырёх стойках из нержавеющей стали диаметром 24 мм и высотой 50 мм. Таким образом осуществляется разрыв магнитного потока между магнитопроводом и стальной конструкцией регулируемой подставки.

3. Технический контроль при изготовлении

Технический контроль в процессе изготовления магнитов включал в себя целый ряд мероприятий.

Ввиду большого количества изделий с максимально близкими характеристиками на производстве была организована специальная технологическая линия с проверкой эксплуатационных свойств изделий на каждом этапе изготовления.

Перед штамповкой пластин для изготовления магнитопроводов проводилась проверка магнитных характеристик и качества электроизоляционного покрытия рулонов электротехнической стали. Рулоны стали или их части, не удовлетворяющие установленным требованиям, не допускались к штамповке. Во время штамповки проводился непрерывный контроль качества штампа, с периодической перешлифовкой. После штамповки пластины проверялись на отсутствие заусенец, а также контролировались их механические размеры.

Сборка магнитопровода осуществлялась на специально изготовленном стапеле в рамках жёстких механических допусков. Во время сборки контролировалось число листов шихтовки и полный вес шихтованных пластин, постоянно контролировались геометрические размеры, отклонение от прямолинейности и плоскостности поверхностей, формирующих магнитное поле, усилие сжатия шихтованного магнитопровода. Для магнитопроводов подобного типа рекомендуется обеспечить удельное давление сжатия $5\div 7$ кг/см². Кроме того, необходимо было обеспечить отклонение от номинальной длины магнита не более ± 0.2 мм и коэффициент заполнения 98%. Необходимое усилие сжатия обеспечивалось и контролировалось с помощью динамометрического ключа.

После изготовления обмоток магнитов проводились окончательные контрольные испытания. Результаты измерения сопротивления обмотки приводились к стандартной температуре 20°C. Каждая катушка сравнивалась на одинаковость числа витков с эталонной катушкой. Для этой цели был разработан и изготовлен прибор (автор Заруднев Ю.В.), который позволял надёжно контролировать число витков в изготавливаемых катушках с точностью до одного витка. С помощью специально разработанного прибора (автор Литвинов А.А.) проверялось отсутствие короткозамкнутых витков в обмотках.

К каждому магнитопроводу и к каждой обмотке прилагался технический паспорт, где фиксировались результаты контроля параметров на каждом этапе изготовления; на каждом этапе был указан исполнитель и контролёр. Окончательная приёмка каждого изделия проводилась представителем группы контроля и испытаний после комплексной проверки геометрических, механических и электрических свойств изделия.

Комплексный контроль при изготовлении оказался очень эффективным. Подтверждением служит тот факт, что при изготовлении серии корректирующих магнитов четырёх типов и общей численностью 851 шт. (включая 20 запасных магнитов) бракованным оказался только один магнит.

4. Магнитные измерения

Программа стандартных магнитных измерений включала в себя измерение распределения магнитного поля в медианной плоскости с шагом 10 мм в интервале ± 50 мм по радиусу и ± 500 мм вдоль оси пучка при токе возбуждения 5 А – для всех магнитов. Помимо этого, для нескольких

случайно выбранных магнитов из каждой партии в 100 магнитов проводилось измерение распределения магнитного поля в медианной плоскости с шагом 10 мм в интервале ± 50 мм по радиусу и ± 500 мм вдоль оси пучка при токе возбуждения от 0 до 7 А с шагом 1 А.

Измерения проводились датчиками Холла, объединёнными в пространственную матрицу. В матрице собраны 11 датчиков, выстроенных поперёк оси измеряемого элемента с интервалом 10 мм. Таким образом, полный захватываемый диапазон за один проход равен 100 мм. Датчики Холла наклеены на медную каретку, выполненную с высокой механической точностью. В течение измерения каретка перемещается (скользит) вдоль оси измеряемого элемента по специальной направляющей. Механическая точность изготовления направляющих в совокупности с точностью знания координат датчиков в каретке обеспечивает привязку датчиков к опорным поверхностям элементов с точностью не хуже 300 мкм.

Все типы измеряемых магнитов имеют малые длины и большие апертуры. Вследствие этого, сильное влияние на величину интеграла магнитного поля оказывают краевые поля. Поэтому необходимо было обеспечить точное измерение малых величин магнитных полей. Для того, чтобы проводить измерения с хорошей относительной точностью (порядка 10^{-3}), необходимо поддерживать измерительную систему в состоянии, обеспечивающем измерения с абсолютной точностью 0.5 Гс, предельной для датчиков Холла. С этой целью ежедневно перед началом измерений в обязательном порядке осуществлялись следующие технические мероприятия:

- прогрев датчиков Холла запитывающим их током в течение 1 – 2 часов,
- измерение и перезапись нулевых значений датчиков,
- калибровка датчиков с помощью ЯМР на рабочем уровне поля.

Измерения каждого корректора осуществлялись после проведения стандартного нормализационного цикла, состоящего из троекратного медленного подъёма и опускания возбуждающего тока от 0 до 7 ампер. В данном случае такая процедура оказывается достаточной, чтобы, в пределах заданной точности, на магнитные свойства магнитопровода не оказывало влияние предыдущее состояние стали. Изменение верхнего значения тока в цикле нормализации от 5 до 10 ампер изменяет величину поля и интеграл поля в магните на 0.3%. В то же время ширина петли гистерезиса на среднем участке кривой намагничивания достигает $0.5 \pm 1\%$, что вынуждает соблюдать неизменную последовательность при регулировке тока (см. Рис.2 и 3).

