

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

Д.С. Гуров, В.В. Зуев, П.В. Мартышкин, В.В. Петров,
М. Масузава (КЕК)

РАЗРАБОТКА КОРРЕКТОРОВ
ДЛЯ СУПЕР Б-ФАБРИКИ КЕК

ИЯФ 2013-8

Новосибирск
2013

Разработка корректоров для Супер Б-фабрики КЕК

*Д.С. Гуров, В.В. Зуев, П.В. Мартышкин, В.В. Петров,
М. Масузава (КЕК)*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Для основного кольца Супер Б-фабрики КЕК были изготовлены вертикальные корректирующие дипольные магниты двух типов. В работе описывается конструкция вертикальных корректоров и процесс магнитных измерений. Приведены основные результаты измерения магнитных полей.

Development of Super B-factory correctors

*D.S. Gurov, V.V. Zuev, P.V. Martyshkin, V.V. Petrov
M. Masuzawa (KEK)*

Abstract

Two types of vertical dipole correctors for the main ring of Super B-factory KEK had been fabricated. Design of vertical correctors and process of magnetic field measurements are described. Basic results of magnetic field measurement are included.

Введение

В 2011-2012 г. в рамках контракта №BSU 0037 между Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера (Россия) и Тойота Цешо (Япония) осуществлялось проектирование и изготовление партии вертикальных дипольных корректоров и поставок для Супер Б-фабрики КЕК. Данная работа продолжалась в течение 15 месяцев. В ходе работы были изготовлены два типа корректоров и подставок к ним в количестве 220 штук. Первый тип корректоров изготавливался для криволинейных участков основного кольца Супер Б-фабрики, второй – для прямолинейных промежутков. Также для каждого типа корректоров были изготовлены подставки разной высоты.

1. Параметры корректоров

Основные параметры вертикальных корректоров, взятые за основу для разработки, приведены в таблице 1. Данные параметры были предоставлены специалистами КЕК как некоторая предварительная спецификация на корректора в рамках контракта. Общая длина изделия вместе с катушкой не должна превышать 320 мм.

Таблица 1

	Секторный Arc V-Corrector	Прямолинейный Straight V-Corrector
Размеры	400×440 мм	410×440 мм
Число катушек	2	2
Число витков	896	1024
Тип провода	круглый 2 мм	круглый 2 мм
Расстояние между полюсами	280 мм	290 мм
Длина магнитопровода	200 мм	200 мм
Ток возбуждения	4,2 А	4,2 А
Число корректоров	190	30

Как видно из таблицы параметров, оба типа корректоров имеют большое межполюсное расстояние 280 и 290 мм, что примерно в 1,5 раза превышает длину магнитопровода, которая составляет 200 мм для обоих типов. В данном случае влияние краевых полей на конфигурацию поля в рабочей центральной части корректора становится весьма значительным и должно быть учтено при численном моделировании топологии поля. Таким образом, магнитная система становится практически открытой.

Расчеты геометрических параметров магнитопроводов и катушек для них вначале проводились двумерным вариантом программы MERMAID, но потом, в силу указанных выше причин, базовые параметры были пересчитаны с помощью трехмерного варианта той же программы.

В результате двухмерного численного моделирования было выяснено, что использование шимов для магнитопровода практически не сказывается на однородность магнитного поля в рабочей области корректора. Зато при этом, значительно усложняет конструкцию штампа для изготовления пластин магнитопровода. Принимая во внимание данные причины, было решено отказаться от шимов магнитопровода, чем значительно упростить конструкцию штампа, его стоимость и соответственно финальную себестоимость всех изделий.

2. Конструкция корректоров

Изготовление штампа для С-образного сердечника корректора с характерными размерами 410×440 мм и шириной пластин 60 мм является весьма трудоемким делом. Основная трудность состоит в том, что С-образная пластина при штамповке будет расходиться. Таким образом, межполюсное расстояние будет различно по вертикали пластины. Чтобы избежать данного эффекта нужно либо изготавливать два штампа черновой и чистовой для каждого типа размера корректора, либо предусматривать специальную компенсацию в конструкции штампа.

Оба типа корректоров практически близки по конструкции и технология их изготовления совершенно одинакова. Конструктивно магниты состоят из дипольного корректора и регулируемой подставки (рис. 1). Оба типа корректора состоят из шихтованного С-образного магнитопровода (1) и двух катушек возбуждения (2). Отличие между ними состоит в том, что межполюсное расстояние отличается на 10 мм, соответственно ширина магнитопровода так же различна на 10 мм если ширина пластин будет одинакова. Для того чтобы минимизировать расходы по изготовлению двух различных штампов было принято решения собирать магнитное ядро из трех разных пластин. Вертикальные пластины изготавливались двух типоразмеров для обоих типов корректоров длиной 440 мм, 380 мм и шириной 60 мм. Горизонтальные пластины изготавливались длиной 340 мм, 350 мм и шириной 60 мм. Для обеспечения надежной склейки пластин в магнитопроводе, пластины укладывались в шахматном порядке с чередованием четный-нечетный слой.

Магнитопроводы собирались из штампованных пластин электро-технической стали марки M940-50A (*ThyssenKrupp AG Company*) толщиной 0.5 мм с клеевым покрытием Stabalit-70 на специальном стапеле.

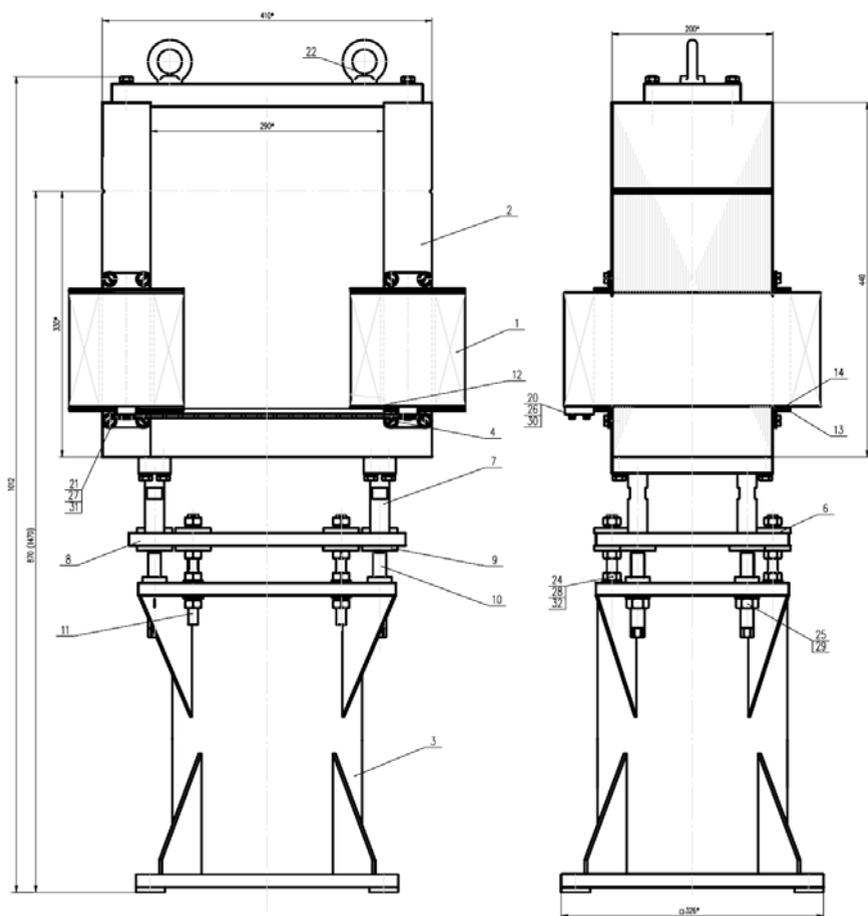


Рис. 1. Общий вид корректора Straight V-Corrector вместе с подставкой.

Для предотвращения изменения межполюсного расстояния корректора во время работы и для возможности подъема корректора во время транспортировки и установки сверху ярмо корректора стягивалось пластиной – стяжкой, выполненной из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Катушки возбуждения корректоров рассчитывались и проектировались исходя из основных параметров корректоров указанных в спецификации контракта. При использовании провода круглого сечения необходимо применять межслоевую изоляцию, что не является слишком удобным и технологичным приемом. Поэтому было принято решение использовать провод прямоугольного сечения 1х4 мм марки ПСДКТ со стекловолкнистой

изоляция и пропиткой электроизоляционным глифталевым лаком. Класс нагревостойкости данного провода F (155 °С). При использовании провода прямоугольного сечения витки ложатся ровно и плотно, при этом отпадает необходимость в применении межслойных прокладок. Сечение медного провода является увеличенным в $4/\pi$ раз, что уменьшает энерговыделение в катушках во столько же раз. Для сохранения полного числа ампер витков в катушках и четного числа слоев обмотки число витков было увеличено по сравнению с базовой спецификацией (таблица 1). Число витков катушек составило 902 для корректора типа Arc V-Corrector и 1034 для Straight V-Corrector.

Обмотки мотаются целым проводом без промежуточной пайки на специальном намоточном приспособлении. Устройство имеет систему натяжения провода. Пропитка осуществляется эпоксидным компаундом в вакуумном объеме с последующим запечением в печи в специально изготовленной форме. После остывания катушки зачищаются и покрываются эпоксидным лаком. Далее отправляются в группу контроля и электрических испытаний.

Катушки имеют колодки для крепления провода от источника электропитания магнита. Для обеспечения надежности крепления провода питания и предохранения провода катушек от поломок колодки так же залиты в эпоксидный компаунд. Обмотки фиксируются на ярме корректора с помощью специального крепления. В конструкции катушек предусмотрены вставки из стеклотекстолита для обеспечения их четкой фиксации на ярме корректора.

Регулируемая подставка (3) выполнена в виде стальной цилиндрической трубы с верхней и нижней стальными плитами. Корректор опирается на плиту – подставку (8) на четырех стойках (7) из нержавеющей стали диаметром 16 мм. Юстировочный механизм состоит из регулировочного болта (10), стойки (7), и фиксирующей шпильки (11) и позволяет производить выставку корректора в пределах ± 20 мм по высоте и ± 10 мм в горизонтальной плоскости.

3. Изготовление ярма корректоров и катушек

Сборка магнитопровода корректора осуществлялась на специальном стапеле для обеспечения требуемого допуска на межполюсное расстояние $\pm 0,2$ мм. Во время сборки магнитопровода контролировалось число слоев шихтовки, плоскостность поверхностей. Для равномерного сжатия собранного в стапеле ярма применялись специальные тарельчатые шайбы. Усилие сжатия составляло 15 кг/см^2 и контролировалось с помощью динамометрического ключа.



Рис. 2 . Намоточное устройство и изготовленные катушки.

После спекания магнитопровода проводились измерение его основных геометрических размеров: расстояние между полюсами измерялось в трех местах на передней плоскости, в центре и на задней плоскости в центральной части полюсов, длина магнитопровода измерялась в трех местах. Отклонение длины магнитопровода от 200 мм должно составлять не более ± 0.2 мм.

После изготовления катушек проводились электрические измерения и испытания. Сопротивление катушек нормировалось на 20 °С. Проверялось отсутствие короткозамкнутых витков в обмотках. Проводилось испытание межвитковой изоляции.

После окончательного сбора корректоров проводились измерения наружной электрической изоляции между ярмом корректора и катушками (более 50 МОм). Так же проводились измерения индуктивности всего корректора. В течение проводился изоляционный тест – одной минуты между катушками и ярмом корректора прикладывалось постоянное напряжение 500 V. К каждому изготовленному корректору прилагался технический паспорт контроля, в котором указывались все результаты измерения параметров магнитопровода и катушек, а так же результаты электрических тестов.

4. Магнитные измерения

Программа стандартных измерений корректоров состояла в измерении кривой возбуждения в зависимости от тока от 0 А до 5 А и обратно в центральной точке корректора. Шаг измерения кривой составлял 0,5 А. Данное измерение проводилось для каждого из двух типов корректоров. Кроме того, для случайно выбранных 5 корректоров каждого типа проводилось измерение карты поля в вертикальной плоскости с шагом 5 мм в интервале ± 50 мм от центра магнита.

Измерения проводились датчиками Холла, конструктивно выполненными в виде каретки. Для измерения полей использовались две каретки. Широко апертурная каретка содержала 19 датчиков Холла и позволяла за один проход снять карту поля в диапазоне 100 мм в вертикальном направлении.

Мало апертурная каретка содержала 5 датчиков Холла и применялась для измерения кривой возбуждения. Данная каретка содержала систему термостабилизации, что позволяло проводить ее калибровку раз в неделю.

Оба типа корректоров имеют длину меньше чем расстояние между полюсами, поэтому краевые поля оказывают большое влияние на измеряемые поля и на величину интеграла магнитного поля. Необходимо было обеспечить относительную точность измерения полей порядка 10^{-3} . Абсолютная точность составляет примерно 0,35 Гс, что является предельной величиной для датчиков Холла. Для достижения заданной точности ежедневно перед началом измерений проводился прогрев датчиков Холла в течение 1 – 1,5 часов. Для измерения поля в центре корректора была изготовлена специальная оправка, которая позволяла быстро устанавливать датчики Холла всегда в одну и ту же позицию. Таким образом, обеспечивалась высокая повторяемость измеряемых результатов.

Перед измерением каждого корректора обязательно проводился стандартный нормализационный цикл, состоящий из 4-х 5-кратного медленного подъема тока возбуждения от 0 А до 6 А и медленного опускания обратно.

Измерение кривой возбуждения в зависимости от тока проводилось в диапазоне от 0 А до 5 А с шагом 0,5 А. После проведения стандартного цикла нормализации ток возбуждения медленно поднимался до требуемого уровня. В течение 35 секунд значение тока выдерживалось на заданном значении, во время которого проводилось измерение значения поля. Далее значение тока возбуждения автоматически поднималось до следующего уровня, и весь цикл измерения повторялся. По достижению тока 5 А и проведения измерений поля, весь цикл измерений повторялся в обратном порядке автоматически до достижения значения тока 0 А.

Одновременно при измерении значения магнитного поля проводилось измерение тока возбуждения. Одновременное измерение значений поля и тока позволяет избавиться от ошибок измерения, обусловленных нестабильностью источника питания корректора. Имея два значения, можно производить перенормировку значений поля на заранее фиксированное значение тока возбуждения.

Вторая причина возникновения ошибок измерения состоит в том, что необходимо измерять значения полей с абсолютной точностью практически равной предельной точности, которую могут обеспечить датчики Холла. Для того чтобы исключить флуктуации измерений датчиков Холла, измерения поля проводились в течение 35 секунд для каждого значения тока

возбуждения. После этого проводилась процедура нормализации измеренных значений поля к некоторому фиксированному значению тока возбуждения. Следующий этап – вычисление среднего значения поля при каждом фиксированном значении тока возбуждения. Усреднение проводилось примерно по 40 измеренным точкам, причем первые 7 измеренных значений отбрасывались.

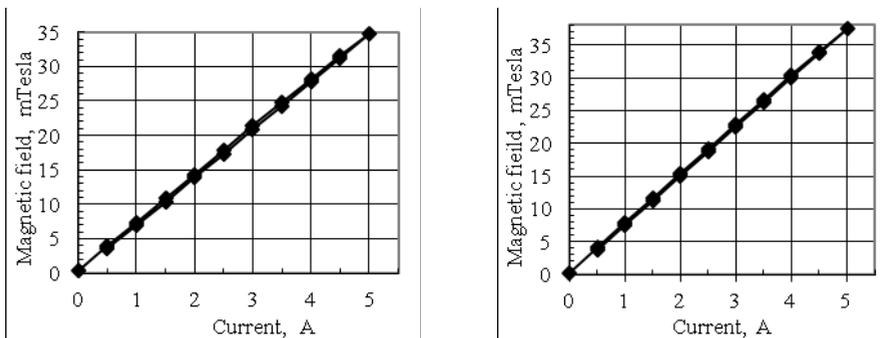


Рис. 3. Кривая возбуждения корректора типа Arc V-corrector и Straight V-Corrector.

На рисунке 3 представлены обработанные кривые возбуждения корректора типов Arc V-Corrector и Straight V-Corrector.

При измерении карты магнитных полей каретка перемещается по специальной направляющей вдоль продольной оси корректора с шагом 10 мм в пределах ± 800 мм от центра магнита. Измерения карты поля проводилось при токе возбуждения 5 А. Предварительно направляющая центрировалась относительно корректора, тщательно проверялась правильность совместной горизонтальность выставки корректора и направляющей по уровню.

На рисунке 4 представлены результаты измерения магнитного поля корректора типа Arc V-Corrector в вертикальной плоскости в центре магнита. Там же приведена однородность магнитного поля определенная как

$$\Delta B = 1 - \frac{B(\varphi)}{B(0)}$$

Видно, что область однородности поля не менее 1% лежит в пределах ± 25 мм в вертикальном направлении.

Подобные же распределения, только для интеграла поля корректора приведены на рис. 5. Из приведенных зависимостей видно, что осевая линия магнита не совпадает с магнитной осью на 2,5 мм. Данное значение получено по средневзвешенному значению магнитного поля и интеграла.

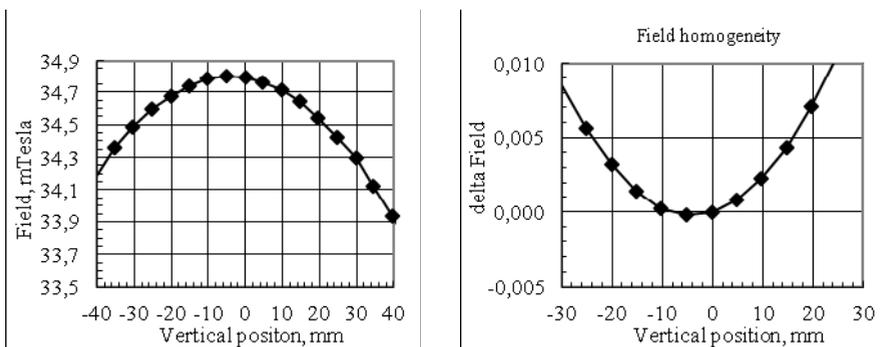


Рис. 4. Вертикальное распределение магнитного поля корректора и однородность магнитного поля.

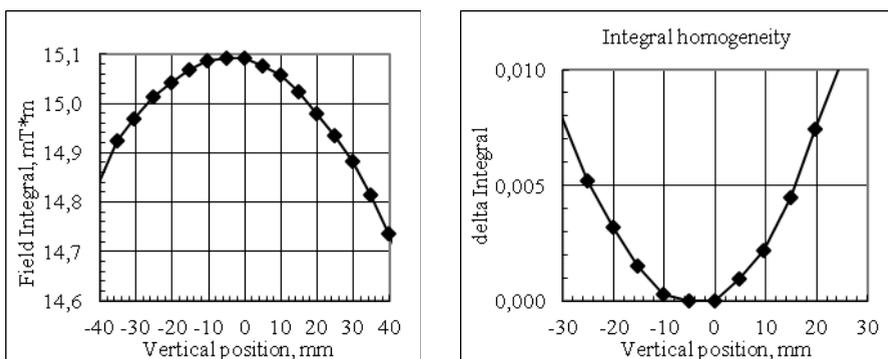


Рис. 5. Вертикальное распределение интеграла магнитного поля корректора и однородность интеграла магнитного поля.

При изготовлении большой партии корректоров весьма важным является повторяемость параметров изделий, т.е. среднее значение и средне-квадратичный разброс. С точки зрения динами заряженных частиц, важным параметром корректора является, конечно, продольный интеграл магнитного поля. Поэтому знание среднего значения интеграла поля и его дисперсии было бы весьма важным. Карта поля промерялась только для 5 корректоров каждого типа.

Поэтому вычислять средние значения и дисперсию по столь малому количеству данных не имеет большого смысла. Максимальное значение поля корректора в центре было измерено для всех магнитов обоих типов. Таким образом, для вычисления статистических параметров будем брать значения магнитного поля в центре магнита при токе возбуждения 5 А.

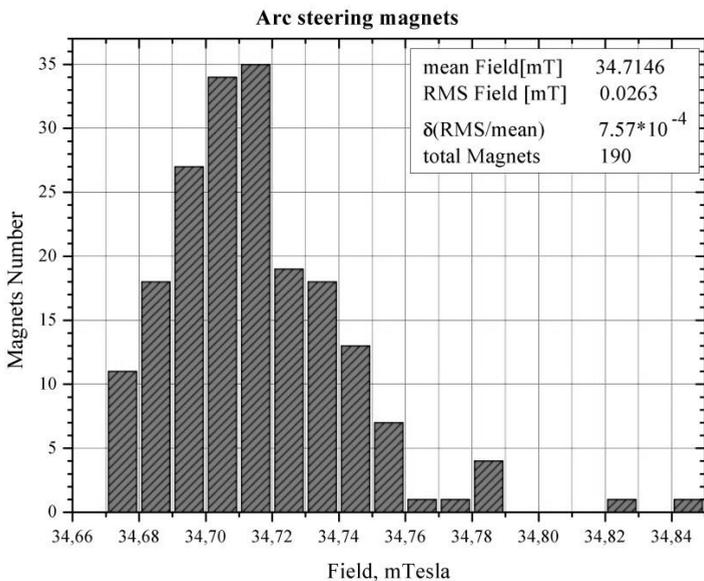


Рис. 6. Гистограмма распределения магнитного поля корректоров типа Arc V-Corrector.

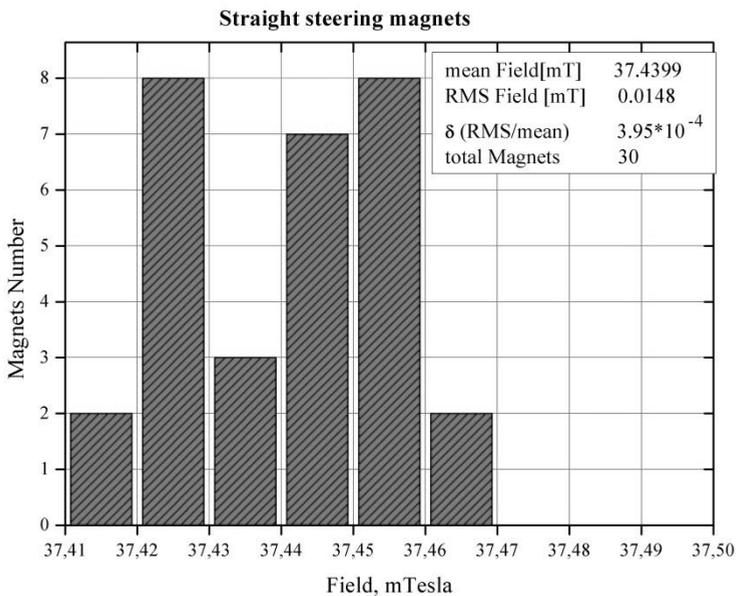


Рис. 7. Гистограмма распределения магнитного поля корректоров типа Straight V-Corrector.

На рис. 6 приведено статистическое распределение корректоров Arc V-Corrector по максимальному полю в центре магнита. Среднее значение поля составляет 347,1 Гс с относительным среднеквадратичным отклонением $7,6 \times 10^{-4}$. Наличие несимметрии распределения в правой части гистограммы объясняется тем, что первые 8 корректоров из этой серии были измерены широко апертурной кареткой с 19 датчиками Холла, а остальные измерялись другой кареткой, содержащей 5 датчиков Холла. Если пренебречь несимметричными измерениями в правой части гистограммы, то видно, что наибольшая разница от среднего значения составляет примерно 0,5 Гс (0,15%)

Статистическое распределение полей для корректора типа Straight V-Corrector представлено на рис. 7. Среднее значение поля составляет 374,4 Гс с относительным среднеквадратичным отклонением 4×10^{-4} . Наибольшая разница от среднего значения составляет примерно 0,3 Гс (менее 0,1%). Статистический провал при среднем значении поля объясняется тем, что зависимость приведена только для 30 изготовленных корректоров второго типа. В принципе, на столь малом значении статистической выборки распределение может отличаться от нормального закона. Значения среднеквадратичных отклонений для обоих типов корректоров показывают весьма хорошую повторяемость в изготовлении магнитов.

5. Дефекты при изготовлении

В июне 2012 г. последняя партия корректоров была отправлена в КЕК (Япония). В конце лета того же года все корректора были установлены в тоннеле основного кольца ускорительного комплекса. При установке в тоннель все корректора осматривались сотрудниками КЕК, никаких видимых повреждений и дефектов замечено не было.

В конце сентября при очередной инспекции тоннеля сотрудники КЕК обнаружили один корректор с отслоившейся крайней пластиной (рис. 8). При осмотре остальных корректоров был обнаружен еще один с аналогичным дефектом. Таким образом, между изготовлением сердечников корректоров и обнаружением отслоения пластин сердечника прошло примерно 8 месяцев. Для обнаружения возможной причины отрыва крайних пластин корректоров для Супер Б-фабрики КЕК в начале октября был проведен осмотр сердечников в тоннеле кольца. Осмотр проводился Стешовым А.Г.

Японская сторона продемонстрировала 2 магнита с частично отошедшими крайними пластинами. В ходе осмотра остальных магнитов был найден еще один с аналогичным дефектом. Примерно через две недели после осмотра (18 октября) был обнаружен четвертый дефектный корректор.

Таким образом, за все время обнаружено 4 корректора с отошедшими краевыми пластинами. Все отслоение краевых пластин наблюдается на корректорах одного и того же типа с межполюсным расстоянием 280 мм. (ARC V-Corrector). Отслоение наблюдается на сердечниках № 003, 048, 069, 172.



Рис. 8. Фотографии корректоров с отслоившейся краевой пластиной.

Характер наблюдаемого дефекта несколько отличается для разных корректоров. Пластина на первом обнаруженном японцами корректоре (сердечник №003) легко отделяется от остального сердечника руками. На остальных корректорах наблюдается частичное отслоение пластин, которые невозможно отделить вручную. Установить точное количество отслоившихся краевых пластин в ходе осмотра в КЕК не удалось.

В качестве одной из возможных причин отслоения была рассмотрена следующая – оставление технологических пластин, применяемых при спекании ярма. Для подтверждения данной причины был проведен осмотр сердечников, оставшихся в 8 корпусе (Валов, Егорычев, Мартышкин). Технологические пластины визуально не имели отслоения от остального сердечника. При помощи специального инструмента они отщеплялись от сердечника на длину 30 – 40 мм и в дальнейшем отделялись либо вручную, либо остро отточенным ножом без ощутимых усилий. Отделить регулярные пластины (следующие за технологической) без специального инструмента не было возможно.

Другая возможная причина – отслоение механически обрабатываемой пластины. Технологически при изготовлении ярма его одна плоскость была базовая, имеющая хорошую плоскостность и перпендикулярность, а вторая после удаления лишних пластин механически обрабатывалась. Обработка проводилась на фрезерном станке быстрорежущей головкой без эмульсии. На оставшихся сердечниках была проведена механическая обработка в соответствии с применяемым ранее режимом.

Осмотр обработанных пластин (Валов, Егорычев, Мартышкин, Стешов) показал, что пластины обработанные головкой и имеющие после обработки толщину меньше 0,2 мм могут быть отделены вручную. Отделить пластины ножом не возможно. Пластины с большей толщиной отделяются с помощью плоскогубцев. При этом заметно, что чем толще пластина, тем труднее она отделяется. При толщине пластины 0,35 мм отделение плоскогубцами становится весьма затруднительным. Во всех случаях пластина сначала отщеплялась от ярма при помощи специального инструмента на длину 30 – 40 мм. Только после этого проводились попытки ее полного отделения.

При толщине обрабатываемой пластины 0,3 мм и менее на обратной стороне пластины появляется профиль соответствующий профилю режущего инструмента. Выдавливание материала на обратной стороне отсутствует. Создается впечатление, что профиль появляется в клеевом слое.

Пластины обработанные «цилиндром» отделялись с заметным усилием только плоскогубцами при толщине даже меньшей 0,2 мм. На обратной стороне пластины профиль не наблюдается.

В дальнейшем была увеличена скорость подачи быстрорежущей головки. Если толщина срезаемого за один проход слоя больше толщины одной пластины, то в этом случае наблюдается постоянный отрыв всего обрабатываемого слоя (толщина обрабатываемого слоя более 1,4 толщины пластины). На ярме наблюдается чистая матовая клеевая поверхность пластины, следующей за обрабатываемой.

При механической обработке менее чем толщина пластины результаты проверки на отрыв приблизительно такие же, как и при нормальной скорости подачи. Одним из важных аспектов, наблюдаемых при увеличенной скорости обработки, является тот факт, что иногда появляется четко

видимый частичный *механический отрыв края пластины* на глубину примерно 10–15 мм. Отрыв наблюдается со стороны входа режущего инструмента, длина отрыва 40–70 мм вдоль края пластины. По всей видимости, появление четко видимого отрыва края пластины зависит от толщины обрабатываемого слоя.

Подобный дефект – частичный отрыв края пластины так же наблюдается на поврежденных корректорах в КЕК. Из выше приведенного можно сделать следующее предположение – причиной отслоения краевых пластин нескольких корректоров послужило повреждение клеевого слоя в момент механической обработки со стороны входа режущего инструмента. Хотя, в момент обработки и дальнейшего изготовления корректоров частичный отрыв обрабатываемых пластин и не наблюдался, но данный дефект проявился в дальнейшем по истечению некоторого времени.

Третья возможная причина – термическое повреждение клеевого слоя. Сказать что-либо конкретное про термическое повреждение клеевого слоя в момент механической обработки между обрабатываемой пластиной и следующей за ней не представляется возможным. Четко зафиксированного перегрева обрабатываемой пластины, что могло бы привести к повреждению клеевого слоя, не наблюдалось.

Таким образом, в качестве причины отслоения краевых пластин следует рассматривать две выше приведенные. Скорее всего, на первом обнаруженном сотрудниками КЕК корректоре (ядро №003) была оставлена технологическая пластина. На остальных трех корректорах (ядро №048, 069, 172) отслоение наблюдается из-за механической обработки крайних пластин. Для более четкого установления причин отслоения необходимо полное отделение пластин и дальнейший их осмотр совместно с осмотром сердечника. Провести такое исследование в КЕК не представлялось возможным.

Дальнейшие осмотры корректоров в тоннеле не выявили новых с дефектами. В поставляемой партии магнитов было несколько штук запасных, поэтому дефектные корректора были заменены на запасные.

Оглавление

Введение	3
1. Параметры корректоров	3
2. Конструкция корректоров	4
3. Изготовление ярма корректоров и катушек.....	6
4. Магнитные измерения	7
5. Дефекты при изготовлении	12

Д.С. Гуров, В.В. Зуев, П.В. Мартышкин, В.В. Петров
М. Масузава (КЕК)

Разработка корректоров для Супер Б-фабрики КЕК

D.S. Gurov, V.V. Zuev, P.V. Martyshkin, V.V. Petrov
M. Masuzawa (KEK)

Development of Super B-factory correctors

ИЯФ 2013-8

Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 29.04. 2013 г.

Сдано в набор 30.04. 2013 г.
Подписано в печать 30.04. 2013 г.
Формат 60х90 1/16 Объем 1,0 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.
Тираж 90 экз. Бесплатно. Заказ № 8

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11