

Д. П. Бабкина¹✉, Г. В. Симонова¹, П. Н. Бурдин²

Анализ методов формирования торцов сердечника магнитопровода

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: D.P. Babkina@inp.nsk.su

Аннотация. В данной статье рассмотрены методы формирования торцов сердечника на примере дипольного магнита. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью создания синхротронного излучения с минимальным диаметром сечением пучка. Анализ проводился на основе требований конструкторской документации с учетом допустимой погрешности геометрических параметров сердечника магнитопровода. Результаты работы предназначены для выбора необходимого метода формирования торцов сердечника магнита марки BDA для магнитной системы накопительного кольца Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ). В основной части приведено описание рассматриваемых методов, рассмотрен производственный цикл изготовления сердечников для дипольных магнитов. В результате проведенных исследований обоснован выбор метода формирования торцов сердечника дипольных магнитов марки BDA. Показано, что оптимальным решением для достижения требований конструкторской документации является механический метод последующей обработки.

Ключевые слова: сердечник, пластина, торцы, дипольный магнит, измерение, обработка, пакет

D. P. Babkina¹✉, G. V. Simonova¹, P. N. Burdin²

Analysis of methods for forming the ends of a magnetic core.

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Nuclear Physics named after G.I. Budker, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: D.P. Babkina@inp.nsk.su

Abstract. This article discusses the methods for forming the ends of the core using a dipole magnet as an example. The relevance of this work is due to the need to create synchrotron radiation with a minimum beam cross-section diameter. The analysis was carried out based on the requirements of the design documentation, taking into account the permissible error in the geometric parameters of the magnetic circuit core. The results of the work are intended to select the required method for forming the ends of the BDA magnet core for the magnetic system of the storage ring of the Siberian Ring Photon Source (SKIF). The main part describes the methods under consideration, considers the production cycle for manufacturing cores for dipole magnets. As a result of the studies, the choice of the method for forming the ends of the BDA dipole magnet core is substantiated. It is shown that the optimal solution for achieving the requirements of the design documentation is a mechanical method of subsequent processing.

Keywords: core, plate, ends, dipole magnet, measurement, processing, package

Введение

Повышение требований, предъявляемых к физическим параметрам научного оборудования, и как следствие изменение точностных, геометрических и весогабаритных характеристик требует динамичного изменения технологии изготовления узлов и деталей, входящих в состав изделия, применения новых материалов, используемых при производстве, совершенствования стратегии испытания и контроля на всех этапах производства.

Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) – это уникальный научный инструмент, который позволит проводить передовые исследования в различных областях науки с помощью синхротронного излучения.

Актуальность анализа методов формирования торцов сердечников дипольных магнитов для СКИФ обусловлена необходимостью обеспечения высокой точности и стабильности магнитного поля, что критически важно для эффективной работы всего комплекса.

Для создания излучения с заданными характеристиками необходимо сформировать минимальный размер пучка, что обеспечивается параметрами поля, которое формируется благодаря магнитной структуре ускорителя, включающей дипольные магниты. Основная функция таких магнитов – управлять траекторией заряженных частиц, в данном случае электронов.

Важной задачей предприятия, производящего такое оборудование, является выбор определенного технологического процесса. Правильный выбор позволит снизить выпуск дефектной продукции, модернизировать производственную систему, уменьшить длительность производственного цикла, снизить затраты [1–7].

Методы и материалы

Дипольные магниты трудоемки в проектировании и изготовлении. Актуальным вопросом остаётся формирование торцов сердечника магнитопровода. Сердечник состоит из набора склеенных между собой пластин. Каждая пластина имеет отличающуюся толщину из-за нанесенного на нее клеевого покрытия. Склеивание проходит под давлением в стапеле, и торцы получаются не параллельными. Для того, чтобы достичь требований конструкторской документации к торцам сердечника, используются два метода последующей обработки: слесарный и механический [8–10].

Дипольный магнит состоит из верхней и нижней половин сердечника с закрепленными на них катушками. На первом этапе изготовления сердечника выполняется контроль пластин на наличие дефектов. Затем поддоны с пластинами располагаются согласно схеме шихтовки, для каждого сердечника она индивидуальна. Пакет состоит из 25 листов. Каждая половина сердечника собирается из штампованных пластин толщиной 1 мм в специально изготовленном точном стапеле.

Следующим этапом является шихтовка сердечника. На этом этапе контролируется зазор между базовыми поверхностями сердечника и базовыми поверхностями стапеля. Зазор должен быть не более 0,02 мм. Через каждые 500 мм шихтовки производится опрессовка сердечника усилием 20 тонн.

Размер общей длины сердечника составляет $1200 \pm 0,2$ мм. Отклонение от перпендикулярности торцевых поверхностей сердечника относительно базы D должно быть не более 0,2 мм, а шероховатость обработки торцевых поверхностей сердечника Ra3,2 (рис 1).

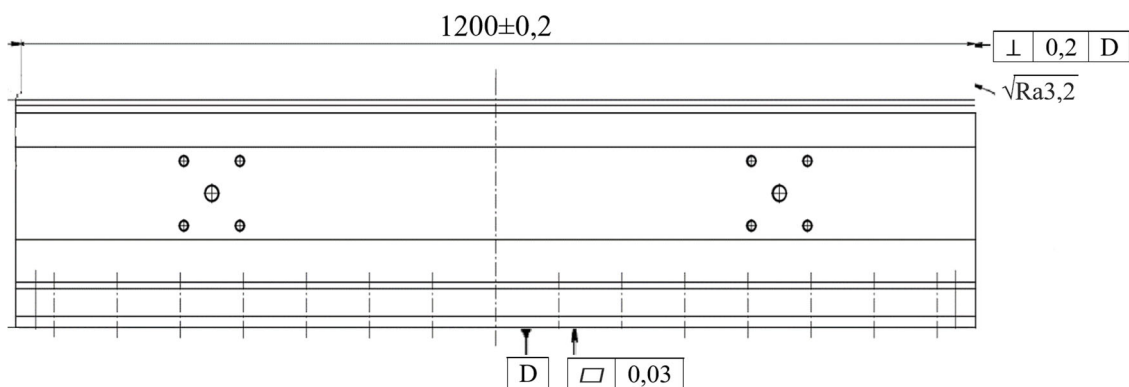


Рис. 1. Сердечник дипольного магнита марки BDA

Если размер после опрессовки получается меньше, чем нужно, то добавляется нужное количество пластин, которые предварительно взвешиваются.

После подбора нужного количества пластин механическими воздействиями обеспечивается наилучшее прилегания базовых поверхностей к стапелю, затем весь сердечник опрессовывается усилием 40 тонн. После опрессовки выполняется контроль зазора между базовыми поверхностями сердечника и базовыми поверхностями стапеля. Зазор должен быть не более 0,02 мм. Длина измеряется в четырех противоположных точках торцов сердечника, пример таких измерений показан в табл. 1.

Таблица 1

№ сердечника	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4
1	1209,5	1210,0	1210,0	1209,5
2	1209,7	1210,4	1210,2	1209,8
3	1209,5	1210,2	1210,1	1209,5
4	1209,8	1210,2	1210,1	1209,6
5	1209,8	1210,3	1210,3	1209,6
6	1209,7	1210,1	1210,2	1209,7

После сборки стапель с сердечником устанавливается в атмосферную печь. Пластины склеиваются (спекаются) путем плавления лакового покрытия по специальной программе объемного нагрева.

После завершения процесса спекания выполняется контроль геометрических размеров сердечника, результаты проверки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Контролируемый параметр	№ точки	№ сердечника					
		1	2	3	4	5	6
Длина сердечника, мм $1200 \pm 0,2$	1	1204,8	1205,2	1205,2	1205,6	1204,6	1204,5
	2	1204,2	1204,6	1204,5	1205,1	1205,2	1205,4
	3	1204,9	1204,5	1204,4	1204,6	1204,5	1204,6
	4	1204,8	1204,3	1204,3	1204,5	1204,4	1204,3
Перпендикулярность относительно базы, мм		0,30	0,30	0,35	0,25	0,30	0,45

Измерения перпендикулярности относительно базы проводились на координатно-измерительной машине Contura G2 10/21/6 с измерительным датчиком VAST XXT [11].

Результаты

Выбор метода обработки торца зависит от допустимой погрешности, длины спекаемого сердечника и толщины пластины, а также типа магнита. Для выбора оптимального варианта проводилось сравнение двух методов обработки.

Обработка торцов сердечников № 1-3 осуществлялась механическим методом. Для этого сердечник устанавливался на расточной станок и торцы сердечника обрабатывались механически с двух сторон в размер $1200 \pm 0,2$ мм.

Обработка торцов сердечников № 4-6 осуществлялась слесарным методом. Применение данного метода подразумевает снятие лишних пластин с торца сердечника. Для достижения требуемых размеров специально изготовленным острогаченным инструментом формируется зазор между пластинами. После образования зазора пластина скручивается специальным инструментом, который постепенно отделяет её от торца сердечника.

Результаты контроля геометрических параметров полученных сердечников представлены в табл. 3. Представленные результаты позволяют оценить соответствие установленным требованиям для образцов, полученных разными методами.

Механическая обработка обеспечила более стабильные размеры с меньшим отклонением от заданного значения, однако она требует специализированного оборудования и более длительного времени обработки. Слесарный метод не требует сложного оборудования, но характеризуется большей вариативностью результатов и зависимостью от квалификации исполнителя.

Таблица 3

Контролируемый параметр	№ сердечника					
	1	2	3	4	5	6
Длина сердечника L , мм $1200 \pm 0,2$	1200,00	1200,01	1200,00	1201,61	1200,60	1200,52
	1199,90	1200,00	1200,01	1201,15	1201,21	1201,45
	1200,01	1200,00	1999,85	1200,65	1200,50	1200,60
	1200,01	1200,00	1200,01	1200,50	1200,45	1200,31
Перпендикулярность относительно D , мм	0,05	0,01	0,01	0,23	0,31	0,46

Результаты сравнительного анализа методов формирования торцов сердечников представлены в табл. 4.

Таблица 4

Анализируемый метод	Количество изготовленных сердечников, шт	Количество несоответствующей продукции, шт	Время обработки сердечника, ч	Общее время обработки трех сердечников, ч
Механический	3	0	4	12
Слесарный	3	3	3	9

Выбор оптимального метода формирования торцов сердечников дипольных магнитов должен основываться на комплексном анализе требований к точности, экономической целесообразности и доступности необходимого оборудования и персонала.

Исходя из анализа данных табл. 3, можно сделать вывод, что при слесарном методе были выявлены несоответствия требованиям конструкторской документации для сердечников 4 – 6, а именно, нет возможности достичь требуемого размера. Если удалить ещё один лист, то размер станет меньше предельно допустимого размера. Чтобы достичь необходимой точности, необходимо провести повторную обработку с использованием механического метода, затраты времени на обработку возрастут на 12 ч. Из-за необходимости точных расчетных данных усадки пластин при спекании магнитопровода увеличивается риск выпуска дефектной продукции. Необходимо отметить, что для данного метода обработки необходимо наличие высококвалифицированных специалистов для качественного и эффективного производства научного оборудования.

Положительным моментом в слесарном методе является отсутствие станка для обработки торцов магнитопровода. Следует отметить, что на обработку слесарным методом затрачивается меньше времени, чем механическим.

Исходя из данных табл. 4, можно сделать вывод, что для формирования торцов сердечника более оптимальным является механический метод последующей обработки.

Заключение

На основании проведенных экспериментов и анализа полученных результатов было выявлено, что для сердечника дипольного магнита марки BDA оптимальным является метод механической обработки. Применение указанного метода позволяет снизить выпуск дефектной продукции, и, следовательно, снизить затраты на производство изделий.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что слесарная обработка является более простым методом, уменьшает длительность производственного цикла, но не позволяет достичь нужных параметров магнитных элементов.

В результате проведенных исследований было показано, что оптимальным решением для формирования торцов сердечника магнитопровода марки BDA является метод механической обработки. В соответствие с этим результатом был изменен процесс обработки торцов магнитов и соответствующие изменения внесены в технологическую документацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шторм В. В. Приборы и методы линейных измерений при монтаже оборудования ускорителей: дис. канд. тех. наук. М., 1978. – С. 41–57.
2. Дипольный магнит – Dipole magnet – other.wiki [Электронный ресурс]. URL: https://ru.other.wiki/wiki/Dipole_magnet (дата обращения: 13.05.2021).
3. Рябченко К. К., Старостенко А. А. Дипольные магниты с однородным полем проекта СКИФ // Сибирский физический журнал. 2023. № 18 (3). – С. 20–30.
4. Баранов Г. Н., Богомягков А. В., Левичев Е. Б., Синяткин С. В. Оптимизация магнитной структуры источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ в Новосибирске // Сибирский физический журнал. 2020. № 15 (1). – С. 5–23.
5. Синяткин, С., Результаты магнитных измерений дипольных магнитов ускорителя NSLS-II / С. Синяткин, Г. Баранов, А. Батраков [и др.] // IPAC'13, Шанхай, 2013.
6. Косоголов И. И. Совершенствование метрологического надзора на производстве: учеб. пособие для вузов. СПб.: НИУ ИТМО; 2014. – 103 с.
7. Экономика организации (предприятия): учебное пособие/ Т. К. Руткаускас [и др.]; под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. Т. К. Руткаускас. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УМЦУПИ, 2018. – 260 с.
8. Кузнецова Н. М. Управление качеством продукции: учеб. пособие / Н. М. Кузнецова. – М. : Инфра-М, 2019. – С. 175–176.
9. Лифиц И. М. Стандартизация, метрология и подтверждение соответствия: учеб. пособие – 9-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт; 2009. – 315 с. (Высшая школа)
10. Описание типа средств измерений. – Поверка измерительных приборов (технических средств) – Кто Поверит. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/90261-23.pdf?ysclid=lxgch97xdh295129234>
11. CONTURA G2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.uralinco-centr.ru/pdff/KIM/Contura%20G2%20Zeiss%20.pdf>

© Д. П. Бабкина, Г. В. Симонова, П. Н. Бурдин, 2025