

В. М. Амосков¹, В. А. Беляков¹, Т. Ф. Белякова¹,
Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекян, С. Н. Дмитриев,
И. А. Иваненко, О. В. Илясов¹, В. А. Костырев,
В. Г. Кучинский¹, В. П. Кухтин¹, М. С. Ларионов¹,
Е. А. Ламзин¹, Б. П. Максимов¹, А. Г. Семченков,
О. В. Семченкова, С. Е. Сычевский¹, О. Г. Филатов¹,
А. А. Фирсов¹, И. Франко

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИНДУКЦИЙ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург

Амосков В. М. и др.

P13-2004-158

Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик магнитных материалов в широком диапазоне индукций

В работе описывается предложенная авторами методика измерения статических нелинейных магнитных свойств ферромагнитных материалов, в первую очередь основной кривой намагничивания (ОКН), на базе разработанной в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова автоматизированной измерительной системы. Разработанная гибкая архитектура программно-измерительного комплекса позволяет получать различные характеристики магнитных материалов. Методика предполагает измерение характеристик сталей в двух перекрывающихся диапазонах величин магнитных полей, практически полностью охватывающих диапазон значений, важных для расчетов магнитного поля.

Измерения в области слабых полей ($|\mathbf{B}| \leq 1,9$ Тл) проводятся с использованием «традиционных» кольцевых образцов. Измерения в области сильных полей ($|\mathbf{B}| > 1,5$ Тл) проводятся с использованием цилиндрических образцов с применением лабораторного дипольного магнита. Приводятся оценки точности результатов измерений.

Результаты в виде сглаженных зависимостей автоматически пополняют базу данных свойств магнитных материалов, используемую в комплексе программ COMPOT для численного моделирования пространственных прецизионных магнитных полей.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Amoskov V. M. et al.

P13-2004-158

Computer-Based System for Magnetic Measurements on Ferromagnetics over Typical Field Ranges

A new technique is described to measure static non-linear properties of ferromagnetics, primarily, the normal magnetization curves. The studies were carried out on the basis of the computerized measurement system developed at the Efremov Scientific Research Institute (NIIEFA). Due to flexible software architecture the system is capable of measuring a variety of magnetic characteristics. The measurement technique provides determination of steel properties over two overlapped field ranges covering a typical computation range.

The measurements are performed on conventional ring-shaped samples in low fields ($|\mathbf{B}| \leq 1.9$ T) and cylindrical samples in high fields ($|\mathbf{B}| > 1.5$ T). The cylindrical samples are magnetized with the use of a laboratory dipole magnet. Estimations of the measurement uncertainty are presented.

Measured data in the form of smoothed curves are automatically added to a material property database and used as inputs for a precision 3D field reconstruction with the use of the COMPOT code.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование пространственного распределения магнитного поля в настоящее время является одним из важнейших этапов в процессе разработки сложных электрофизических устройств, таких как томографы, экспериментальные термоядерные установки, ускорители заряженных частиц, электродвигатели и другие устройства медицинского и промышленного назначения.

Развитые программные средства [2, 3, 8] позволяют создавать пространственные модели магнитных систем и выполнять с необходимой точностью расчет магнитного поля, а на его основе анализ и оптимизацию с целью обеспечения требуемых технических характеристик конструкции. Очевидно, что такой анализ требует знания магнитных свойств материалов как необходимых условий для замыкания системы уравнений Максвелла. Магнитные свойства материалов выражаются зависимостью между векторами напряженности магнитного поля \mathbf{H} и плотности магнитного потока \mathbf{B} : $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, где коэффициент μ — магнитная проницаемость. Характерными особенностями этой зависимости, особенно для ферромагнитных материалов, являются: 1) существенная нелинейность; 2) свойство гистерезиса, т. е. зависимость от предыстории намагничивания материала; 3) магнитная проницаемость в общем случае, которая есть тензор, т. е. векторы \mathbf{B} и \mathbf{H} могут быть непараллельны.

Однако при решении большинства задач магнитостатики обычно в качестве магнитных свойств материалов достаточно знания основной кривой намагничивания, т. е. кривой $B(H)$, образованной множеством вершин симметричных петель гистерезиса разной амплитуды. В этих случаях, для того чтобы фактические характеристики соответствовали основной кривой намагничивания, необходим специальный режим намагничивания системы для вывода ее на номинальный режим работы, который включает в себя размагничивание (периодическое перемагничивание с убывающей амплитудой) и последующее перемагничивание с постоянной амплитудой, соответствующее номинальному режиму работы.

Организация вычислительного процесса программных комплексов при решении систем нелинейных алгебраических уравнений, к которым сводится дискретизированная полевая задача, требует знания ряда зависимостей (например, $\partial\mu/\partial H$), получаемых из исходной кривой намагничивания. Это налагает определенные требования на степень гладкости функций, описывающих исходную кривую.

Магнитная система электрофизического устройства может состоять из ряда конструктивных элементов, имеющих принципиально различные кривые намагничивания, что обусловлено как конструктивными и стоимостными требованиями (например, различными материалами магнитопровода и полюса), так и технологическими факторами (например, изготовлением элементов магнитной системы из разных отливок сталей). Поэтому существует необходимость как создания соответствующих средств работы с базами данных свойств магнитных материалов [8, 9], так и пополнения базы данных путем задания зависимости $B(H)$ в виде файла заданного формата в качестве входных данных.

С целью обеспечения технологически замкнутого процесса расчета магнитных систем в ФГУП НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова был разработан аппаратно-программный комплекс для измерения магнитных свойств материалов, в первую очередь основной кривой намагничивания. Методика измерения базируется на известных схемах измерения магнитных свойств материалов и соответствует требованиям ГОСТа 8.377-80 [1]. С целью повышения продуктивности, точности измерений и расширения диапазона применимости схем измерений был принят ряд технических и методологических решений.

Методика предполагает измерения магнитных свойств в двух перекрывающихся диапазонах магнитных полей, каждый со своей схемой измерения. В сумме они охватывают практически весь значимый для расчетов магнитных систем диапазон полей. Перекрывание диапазонов позволяет дополнительно контролировать точность измерений по степени совпадения кривых.

Измерения в области малых полей (ориентировочно $0,05 < H < 15$ кА/м, $B < 1,9$ Тл) проводятся с использованием кольцевых образцов с намотанными на них вторичной (измерительной) и первичной (возбуждающей) обмотками. Напряженность поля внутри образца определяется по величине тока в первичной обмотке.

Измерения в области сильных полей (ориентировочно $1 < H < 600$ кА/м, $B > 1,5$ Тл) проводятся с использованием цилиндрических образцов, вставленных в оправку с измерительной обмоткой вокруг образца и помещенных между полюсами лабораторного магнита, создающего продольное поле в образце. Напряженность поля внутри образца определяется с помощью экстраполяционной процедуры по показаниям нескольких датчиков Холла (закрепленных в оправке), расположенных в непосредственной близости на разных расстояниях от образца.

Величина индукции в обеих схемах определяется с помощью вторичной (измерительной) обмотки путем измерения э. д. с. электромагнитной индукции на ней, возникающей вследствие изменения потокосцепления через витки вторичной обмотки. Переменное магнитное поле в обоих случаях создается за счет переменного тока в первичной обмотке, в первом случае вокруг самого

кольцевого образца, во втором — в возбуждающей обмотке лабораторного магнита. Форма и частота импульса тока выбираются такими, чтобы в равной степени исключить влияние как вихревых токов в образце, так и шумов в измерительном канале.

Показания всех измерительных устройств (ток в возбуждающей обмотке, напряжение в измерительной обмотке, показания датчиков Холла) посредством электронной системы сбора информации в непрерывном режиме подаются на вход компьютерной программы автоматизированной системы управления процессом измерений и обработки их результатов. Эта же программа по данным, введенным персоналом до начала измерений, управляет всем процессом измерений в автономном режиме, что позволяет в значительной степени автоматизировать процесс получения основной кривой намагничивания, который заключается в последовательном формировании ряда симметричных петель гистерезиса различной амплитуды (обычно 10–20 точек в каждом диапазоне) и получении для каждой из них соответствующей точки $B(H)$ основной кривой намагничивания. Одно измерение (формирование одной петли и получение одной точки на кривой) занимает от 2 до 20 мин, в зависимости от уровня поля в образце. Для получения полной кривой (в двух диапазонах) требуется от 0,5–1,5 ч с учетом магнитной подготовки образцов и теста аппаратуры.

Аппаратно-программный комплекс и методика измерений были разработаны и отлажены в ходе работ по измерению свойств электротехнических сталей, произведенных на Краматорском заводе, для изготовления магнитной системы циклотрона ДЦ-72 (центр ядерной физики и медицины Словацкого института метрологии, Братислава, Словакия), разработанного и созданного в ЛЯР им. Г. Н. Флерова ОИЯИ [11]. Результаты измерений были использованы для моделирования магнитного поля в циклотроне и оптимизации его магнитной системы с целью формирования требуемой структуры магнитного поля.

Хотя разработанная методика и соответствующая аппаратура нацелены в первую очередь на получение основной кривой намагничивания, с их помощью можно получить или, по крайней мере, оценить и другие характеристики магнитных свойств материалов, такие как предельная намагниченность, начальная и максимальная магнитная проницаемость, коэрцитивная сила (как по индукции, так и по намагниченности) и др. Кроме того, несколько видоизменив сценарий формирования поля во времени, можно настроить методику на получение других характеристических зависимостей $B(H)$, таких как, например, идеальная кривая намагничивания (множество точек, к которым стремится в пределе B при перемагничивании с убывающей амплитудой вокруг фиксированного значения N) или начальная кривая намагничивания (зависимость $B(H)$ с полностью размагниченного состояния).

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

Методика измерений магнитных свойств материалов с использованием кольцевых образцов базируется на индукционно-непрерывном методе измерения переменной э. д. с., возникающей в измерительной обмотке при изменении потокосцепления, вызываемого переменным током в намагничивающей обмотке. Схема измерения приведена на рис. 1. Магнитное поле внутри образца создается током I_1 в первичной обмотке, равномерно намотанной вокруг сечения образца по всей окружности. Изменяющееся во времени магнитное поле внутри образца индуцирует э. д. с. магнитной индукции во вторичной (измерительной) обмотке, также равномерно намотанной на этом образце.

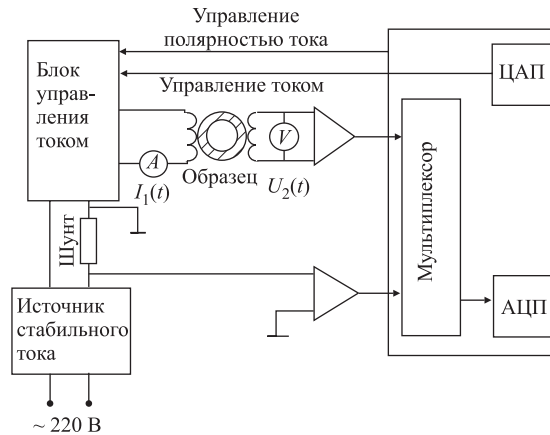


Рис. 1. Схема магнитоизмерительной установки с кольцевым образцом

Напряженность магнитного поля внутри образца определяется по величине тока в первичной обмотке. При условии, что витки первичной обмотки намотаны достаточно плотно и равномерно, в образце формируется аксиально-симметричное поле, единственная азимутальная компонента которого на расстоянии R от оси определяется из условия

$$W_1 I_1 = \oint_L H_1 dl = H 2\pi R,$$

где W_1 — полное число витков намагничивающей обмотки. Таким образом,

напряженность поля в образце на радиусе R

$$H(R) = \frac{W_1 I_1}{2\pi R} = \frac{I}{2\pi R}. \quad (1)$$

Соответствующая величина индукции

$$B = \mu_0 \mu H = \mu_0 \mu \frac{W_1 I_1}{2\pi R}.$$

При условии, что образец имеет прямоугольное сечение, задающееся размерами R_1 — внутреннего радиуса, R_2 — внешнего радиуса, D — толщины в аксиальном направлении, и в предположении, что μ постоянно по сечению образца, поток магнитной индукции через сечение образца равен

$$\Phi = \int_S B dS = \mu_0 \mu \frac{W_1 I_1}{2\pi} \int_0^D dz \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{R} dR = \mu_0 \mu \frac{W_1 I_1}{2\pi} D \left(\ln \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (2)$$

Тогда среднее по сечению поле

$$B_{\text{ср}} = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{D(R_2 - R_1)} = \mu_0 \mu \frac{W_1 I_1}{2\pi} \frac{\ln(R_2/R_1)}{R_2 - R_1}, \quad (3)$$

где S — площадь поперечного сечения кольцевого образца. А соответствующая ему напряженность должна рассчитываться как

$$H_{\text{ср}} = \frac{B_{\text{ср}}}{\mu_0 \mu} = \frac{W_1 I_1}{2\pi} \frac{\ln(R_2/R_1)}{R_2 - R_1}. \quad (4)$$

Для определения величины магнитной индукции служит вторичная обмотка. Используется соотношение

$$U_2 = \frac{d\Psi_2}{dt_2}, \quad (5)$$

где U_2 — напряжение на вторичной обмотке, $\Psi_2 = W_2 \Phi$ — потокосцепление через витки вторичной обмотки, W_2 — число витков вторичной обмотки, Φ — магнитный поток через сечение образца. Предполагается, что поток через сечение образца и поток через сечение, охватываемое одним витком вторичной обмотки, одинаковы. Это условие выполняется в том случае, если вторичная обмотка намотана максимально близко к контуру сечения образца (для этого вторичная обмотка наматывается непосредственно на образец, а первичная — поверх нее), а толщина изоляции и провода вторичной обмотки существенно меньше характерных размеров сечения образца, либо магнитная проницаемость материала образца (при измеряемом уровне поля) существенно

больше магнитной проницаемости воздуха. Тогда среднее значение индукции в образце находится как интеграл:

$$B_{\text{cp}} = \frac{\Phi}{S} = B_0 + \frac{1}{W_2 S} \int_0^t U_2(t) dt \approx B_0 + \frac{1}{W_2 S} \sum_i U_2(t_i) \Delta t. \quad (6)$$

Показания $U_2(t_i)$ непрерывно снимаются со вторичной обмотки с периодичностью t и затем суммируются специальной обрабатывающей вычислительной процедурой. Начальная величина индукции B_0 либо должна быть известна заранее, либо вычисляется по специальной методике. В первом случае, приняв $B_0 = 0$, можно получить начальную кривую намагничивания. При этом образец перед началом измерений должен быть полностью размагничен. В случае измерения основной кривой намагничивания начальное значение B_0 находится с привлечением свойства симметричной петли гистерезиса:

$$B_{\text{max}} = -B_{\text{min}}.$$

Для обеспечения этого условия образец должен быть перед началом измерений многократно перемагничен (обычно 5–10 раз) с постоянной амплитудой. Тогда, представив (6) в виде

$$B_{\text{cp}}(t) = B_0 + \Delta B(t),$$

где

$$\Delta B(t) = -\frac{1}{W_2 S} \int_0^t U_2(t) dt \approx \frac{1}{W_2 S} \sum_i U_2(t_i) \Delta t,$$

получим

$$B_0 = -\frac{1}{2}(\Delta B_{\text{max}} + \Delta B_{\text{min}}).$$

Соотношение размеров образцов должно удовлетворять требованиям [1]. Образцы подвергаются отжигу в соответствии с требованиями нормативно-технической документации на испытуемый материал. После термической обработки на кольцевые образцы наматываются медным изолированным проводом измерительная и намагничивающая обмотки, при этом последняя располагается равномерно по длине окружности образца виток к витку поверх измерительной обмотки. Обмотки друг от друга и образец от обмоток изолируются лавсановой пленкой. Число витков намагничивающей обмотки составляет в данном случае $W_1 = 230$, измерительной — $W_2 = 330$. Максимальная величина тока в намагничивающей обмотке не превышает $I \leq 8$ А (ограничивается в данном случае мощностью источника питания).

Приведенная на рис. 1 схема магнитоизмерительной установки построена на базе ПВМ с использованием 16-разрядной платы аналого-цифрового сбора данных (ПСД) А-826РG, ICP_DAS Inc. с частотой сбора информации до 100 кГц в одноканальном режиме. Использование вычислительной и аналого-цифровой измерительной техники позволяет автоматизировать процесс измерений, регистрацию и обработку результатов, повысить точность измерений, в том числе за счет динамического регулирования изменения величины тока в намагничивающей обмотке в зависимости от отношения сигнал/шум в канале измерения напряжения.

Источник стабильного тока (с нестабильностью $\approx 10^{-3}$ и лучше, в зависимости от величины тока) подключен к намагничивающей обмотке кольцевого образца и управляется программно с ПВМ от 12-разрядного цифроаналогового преобразователя, позволяющего формировать импульс тока заданной формы.

16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в составе ПСД, управляемый также программно от ПВМ, используется для измерения и передачи текущих значений намагничивающего тока и напряжения на измерительной обмотке по каналам АЦП в ПВМ.

Перед проведением магнитных измерений проводится калибровка аналого-цифрового канала (АЦК) магнитоизмерительной установки с помощью зада-

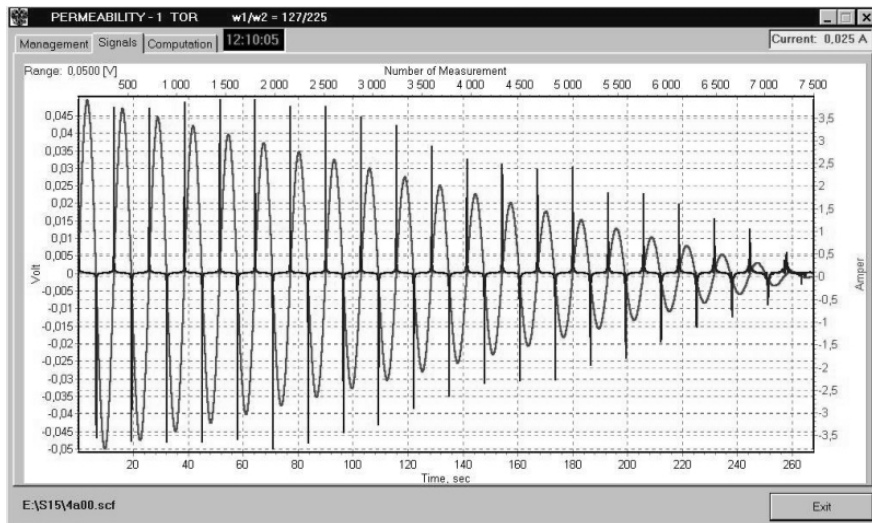


Рис. 2а. Программа PERMEABILITY-1, окно контроля сигналов. Типичная зависимость тока и соответствующее этому току напряжение на измерительной катушке кольцевого образца при его размагничивании

ваемых синусоидального и постоянного напряжений, что позволяет оценить погрешность $\approx 0,1\%$, вносимую всем АЦК в конечный результат измерений.

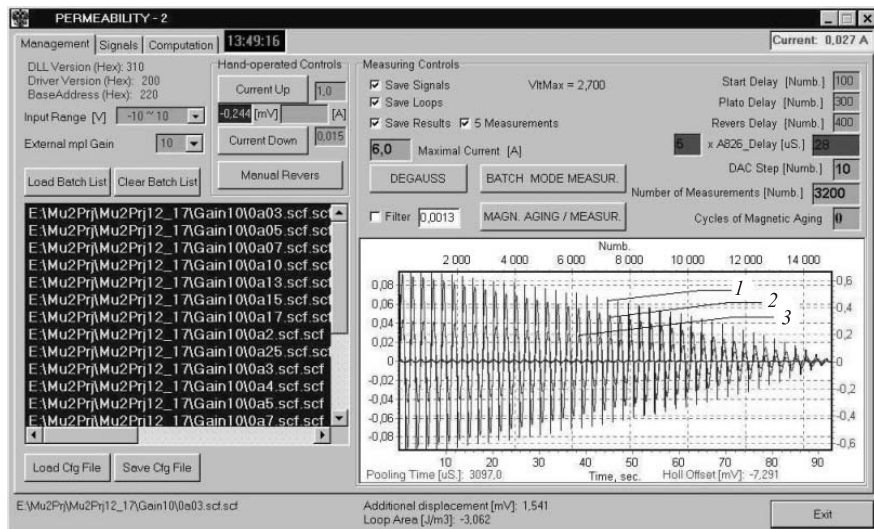


Рис. 26. Программа PERMEABILITY-2, окно управления измерительным процессом. Вид сигналов — на измерительной катушке (1), тока размагничивания (2), напряжения на одном из датчиков Холла (3) — во время размагничивания образца

Непосредственно перед началом магнитных измерений образцы размагничиваются переменным полем с частотой $\cong 0,5$ Гц с убывающей линейно практически до нуля амплитудой (см. рис. 2а, 2б). Время размагничивания составляет 3,5 мин. После размагничивания до начала измерений образцы выдерживаются в течение 15 мин в соответствии с [1] из-за дезаккомодации магнитной проницаемости. На рис. 3 приведены типичная форма импульса тока при динамическом регулировании скорости его изменения и измеряемое напряжение на измерительной обмотке. Скорость изменения намагничивающего тока оптимизируется таким образом, чтобы можно было пренебречь влиянием вихревых токов в образце на точность определения магнитных характеристик. Оптимизация заключается в минимизации площади петли гистерезиса при сохранении величины полезного измеренного сигнала.

Для стабилизации и получения симметричной петли гистерезиса при измерениях образцы подвергаются так называемой магнитной подготовке, заключающейся в 10-кратном повторе цикла изменения тока в намагничивающей обмотке с одинаковой амплитудой. Координаты вершины каждой петли гистерезиса определяются в результате усреднения по 5 измерениям. Оценива-

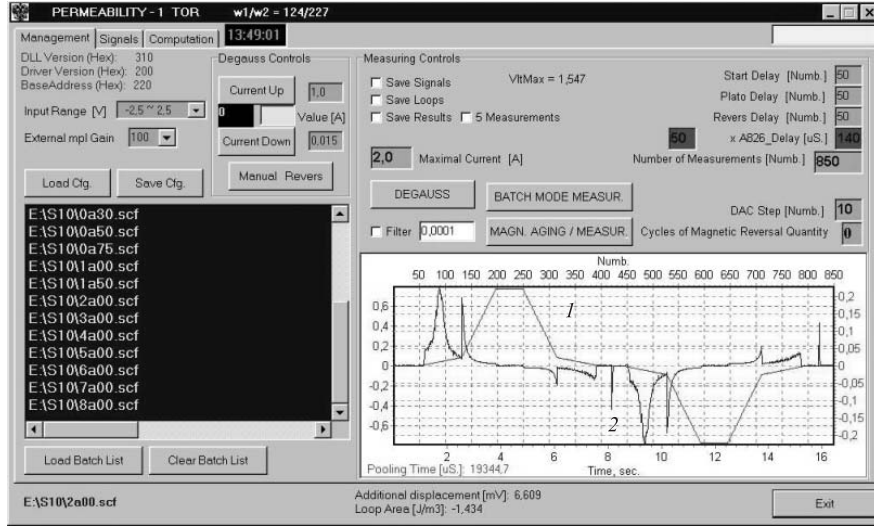


Рис. 3. Программа PERMEABILITY-1, окно управления измерительным процессом. Типичная форма импульса тока при динамическом регулировании изменения его величины и напряжения на измерительной обмотке: 1 — ток; 2 — напряжение

емая погрешность измерений основной кривой намагничивания не хуже 0,5%.

Влияние радиальной неоднородности распределения поля в кольцевом образце на ошибку определения μ можно оценить следующим образом. Представим $\mu(H)$ в виде

$$\mu = \mu^{(0)} + \mu^{(1)}H + \frac{1}{2}\mu^{(2)}H^2 + \dots + \sum \mu^{(i)} \frac{H^i}{i!},$$

где

$$\mu^{(i)} = \left. \frac{\partial^i \mu}{\partial H^i} \right|_{H=0}.$$

Тогда с учетом (1)

$$B = \mu_0 \mu H = \mu_0 \sum \mu^{(i)} \frac{H^{i+1}}{i!} = \mu_0 \sum \frac{\mu^{(i)}}{i!} \left(\frac{I}{2\pi R} \right)^{i+1}.$$

Магнитный поток через сечение образца равен

$$\Phi = \int_0^D dz \int_{R_1}^{R_2} B dR = D \mu_0 \frac{I}{2\pi} \left(\mu^{(0)} \ln \frac{R_2}{R_1} + \sum \frac{\mu^{(i)}}{i!} \left(\frac{I}{2\pi} \right)^i \left(\frac{1}{R_1^i} - \frac{1}{R_2^i} \right) \right).$$

Тогда средняя индукция

$$B_{\text{cp}} = \frac{\Phi}{D(R_2 - R_1)} = \frac{\mu_0 I}{2\pi(R_2 - R_1)} \left(\mu^{(0)} \ln \frac{R_2}{R_1} + \sum \frac{\mu^{(i)}}{ii!} \left(\frac{I}{2\pi} \right)^i \left(\frac{1}{R_1^i} - \frac{1}{R_2^i} \right) \right).$$

Согласно (4) средняя напряженность поля в образце определяется как

$$H_{\text{cp}} = \frac{I}{2\pi(R_2 - R_1)} \ln \frac{R_2}{R_1},$$

тогда величина μ , получающаяся в результате измерений, равна

$$\tilde{\mu} = \frac{B_{\text{cp}}}{\mu_0 H_{\text{cp}}} = \mu^{(0)} + \frac{1}{\ln(R_2/R_1)} \sum \frac{\mu^{(i)}}{ii!} \left(\frac{H_{\text{cp}}(R_2 - R_1)}{\ln(R_2/R_1)} \right)^i \left(\frac{1}{R_1^i} - \frac{1}{R_2^i} \right).$$

Однако в действительности величина μ , соответствующая H_{cp} , равна

$$\mu_H = \mu^{(0)} + \sum \frac{\mu^{(i)}}{i!} H_{\text{cp}}^i.$$

Сравним эти величины. Для этого разложим μ в ряд Тейлора вблизи точки H_{cp} :

$$\mu(H_{\text{cp}} + \Delta H) = \mu_H + \sum_k \mu_H^{(k)} \frac{\Delta H^k}{k!},$$

где

$$\mu_H^{(k)} = \left. \frac{\partial^k \mu}{\partial H^k} \right|_{H_{\text{cp}}}.$$

Коэффициенты $\mu^{(i)}$ находятся как соответствующие производные $\mu(H_{\text{cp}} + \Delta H)$ при $\Delta H = -H_{\text{cp}}$:

$$\mu^{(i)} = \mu_H^{(i)} + \sum \frac{\mu_H^{(i+k)}}{k!} (-H)^k.$$

После подстановок окончательно получаем

$$\begin{aligned} \tilde{\mu} &= \sum_{k=0} \frac{\mu_H^{(k)}}{k!} (-H)^k + \\ &+ \frac{1}{\ln(R_2/R_1)} \sum_{k=1} \mu_H^{(k)} H^k \sum_{i=1}^k \frac{(-1)^{k-i}}{ii!(k-i)!} \left(\frac{R_2 - R_1}{\ln(R_2/R_1)} \right)^i \left(\frac{1}{R_1^i} - \frac{1}{R_2^i} \right). \end{aligned}$$

Для интегральных оценок достаточно использовать три члена разложения:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu} \approx & \mu_H^{(0)} + \mu_H^{(1)} \left[-1 + \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \left(\frac{R_2 - R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right] H + \\ & + \mu_H^{(2)} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \left(\frac{-1}{1} \left(\frac{R_2 - R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{4} \left(\frac{R_2 - R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right)^2 \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \right] H^2 + \\ & + \mu_H^{(3)} \left[-\frac{1}{6} + \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{R_2 - R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{4} \left(\frac{R_2 - R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right)^2 \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) + \frac{1}{18} \left(\frac{R_2 - R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right)^3 \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right) \right] H^3. \end{aligned}$$

Итого, например, для типичных размеров установки $R_1 = 16$ мм, $R_2 = 20$ мм относительная ошибка $\Delta\mu/\mu$ составляет:

- для диапазона $H < 0,2-0,3$ кА/м $\Delta\mu/\mu \leq +1\%$,
- для диапазона $0,3 < H < 100$ кА/м $\Delta\mu/\mu \approx -0,2\%$.

Возможность использования кольцевых образцов в полном требуемом диапазоне H , вплоть до состояния их технического насыщения, ограничена нагреванием намагничивающей обмотки, вызывающей нагревание образца, и, как следствие, проявлением температурной зависимости магнитной проницаемости.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Предложенная авторами методика измерений магнитных характеристик цилиндрического образца базируется на предположении его однородного намагничивания в магнитном поле электромагнита, что было подтверждено расчетами с использованием программного комплекса СОМРОТ [2]. ГОСТ 8.377-80 [1] допускает определение магнитных характеристик и параметров образцов на аппаратуре с различными принципами работы при условии обеспечения магнитных измерений с требуемыми точностями. Методика испытаний основана на индукционно-непрерывном методе, описанном в разд. 1.

Изготовление, отжиг и магнитная подготовка цилиндрических образцов производятся аналогичным для кольцевых образцов способом. Соотношения

размеров образцов определены ГОСТом 8.268-77. Линейные размеры цилиндрических образцов обусловлены зоной однородности магнитного поля, создаваемого дипольным лабораторным магнитом.

В качестве устройства для намагничивания и размагничивания образцов применен дипольный лабораторный электромагнит с регулируемым зазором

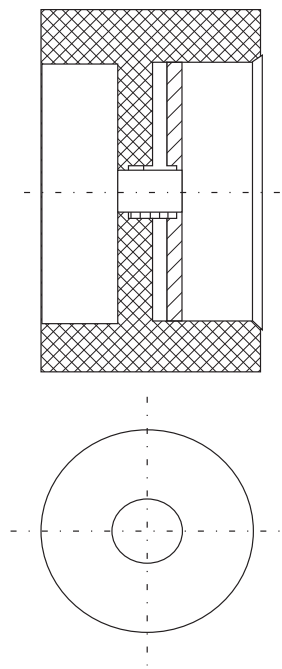


Рис. 4. Эскиз измерительной оснастки

Model 2H2 (2«High Power Electromagnet System» Horizontal H-Frame Magnet, Applied Magnetics Laboratory Inc., Baltimore, MD21209, USA). Конструкция полюсных наконечников магнита и измерительная оснастка (см. рис. 4) обеспечивают плотное зажатие образца без его повреждения. Внешний вид лабораторного магнита с измерительной оснасткой представлен на рис. 5. Схема измерительной установки приведена на рис. 6. Это классическая схема пермеаметра [5, 6] — устройства для измерения магнитных характеристик образцов разомкнутой формы (в данном частном случае цилиндров), построенного на базе дипольного лабораторного магнита, содержащего подвижные полюсные наконечники. Испытуемый образец составляет с ярмом электромагнита замкнутую магнитную цепь. В непосредственной близости к образцу находятся устройства для измерения индукции B и напряженности H магнитного поля в образце. Индукцию определяют с помощью измерительной обмотки, напряженность с помощью нескольких преобразователей Холла, установленных на различных расстояниях от оси цилиндрического образца.

В качестве средства измерения индукции магнитного поля используется измерительная катушка, намотанная на полый цилиндрический изоляционный каркас толщиной 0,1 мм, который вместе с катушкой фиксируется в измерительной оснастке (рис. 4). Измерительная катушка короче образца в два раза и располагается вместе с каркасом на его боковой поверхности симметрично относительно полюсных поверхностей электромагнита таким образом, что ее ось совпадает с направлением магнитного поля.

В качестве средств измерения напряженности магнитного поля использованы датчики Холла KSY44 (Infineon Technologies, Германия), обеспечивающие погрешность измерения в рассматриваемом диапазоне не хуже $\pm 0,2\%$. Калибровка датчиков Холла, имеющих практически линейную калибровочную кривую, проводилась с использованием ЯМР-датчика и упомянутого

выше лабораторного магнита, который обеспечивал однородность магнитного поля в месте размещения датчиков не хуже 0,02–0,03 %. В этом случае измеритель магнитной индукции Ш1-9 на основе ЯМР [4] обеспечивает погрешность измерений, не превышающую 0,01–0,04 %.

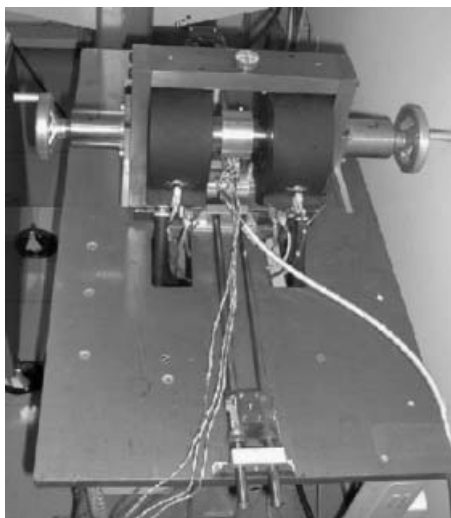


Рис. 5. Внешний вид лабораторного магнита с измерительной оснасткой

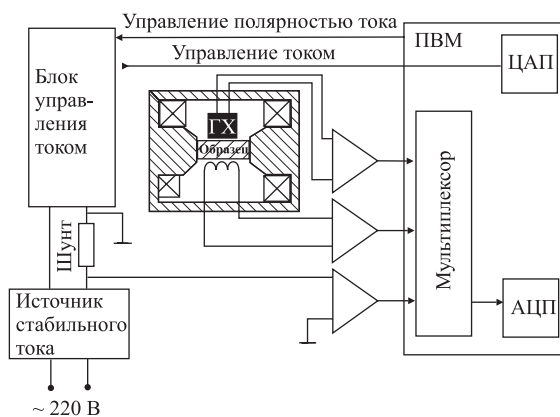


Рис. 6. Схема магнитоизмерительной установки с цилиндрическим образцом

Использование дипольного лабораторного магнита для намагничивания цилиндрических образцов позволяет проводить измерения до напряженности магнитного поля $H = 600$ кА/м (или $B \approx 3$ Тл) для стали 8.

Способ измерения напряженности магнитного поля H в образце базируется на свойстве магнитного поля, согласно которому касательная составляющая вектора напряженности магнитного поля H_t на границе раздела сред сохраняет свое значение [7].

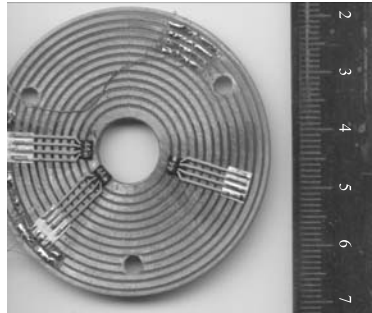


Рис. 7. Внешний вид измерительного устройства из трех датчиков Холла, расположенных на медной шайбе

В силу симметрии измерительной установки поле на плоскости симметрии (проходящей через центральное сечение образца) имеет только одну продольную составляющую, касательную к боковой цилиндрической поверхности образца. Располагая датчик магнитного поля (однокомпонентный датчик Холла, см. рис. 7) вблизи поверхности цилиндрического образца в плоскости симметрии параллельно этой плоскости (так, чтобы он измерял продольную компоненту поля), можно получить значение H на границе образца. Поскольку

поле в образце в плоскости симметрии можно с достаточной точностью считать однородным (численные эксперименты показали, что это реализуется

с точностью $\sim 10^{-4}$), то значение

H на границе можно считать средним в образце. Однако чувствительная зона датчика Холла имеет конечные размеры. Кроме того, между датчиком и образцом есть определенный технологический зазор. Поэтому поле не может быть измерено непосредственно вблизи границы, а только на некотором отдалении. Численные эксперименты, выполненные с использованием комплекса программ СОМРОТ [2], показали, что на расстоянии 1 мм от поверхности образца поле возрастает на 1–5% в зависимости от насыщения образца (чем меньше поле и чем больше магнитная проницаемость образца, тем больше неоднородность поля вблизи образца), причем при идеальном контакте образца с полюсами магнита в месте зажима. Если же имеется хотя бы небольшой

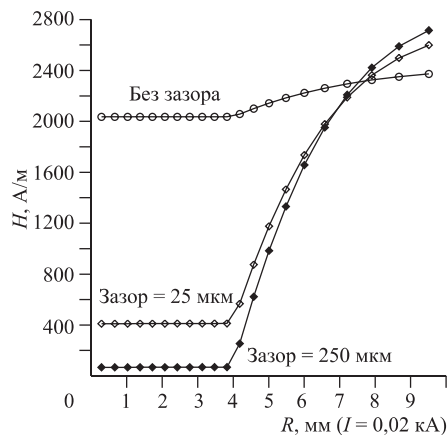


Рис. 8. Расчетное распределение напряженности магнитного поля в центральном сечении в случае малого уровня поля при различных величинах зазора между образцом и полюсом магнита

с полюсами магнита в месте зажима. Если же имеется хотя бы небольшой

зазор, неоднородность поля возрастает на порядки. В частности, при зазоре 25 мкм рост поля на расстоянии 1 мм составляет $\sim 200\%$. На рис. 8, 9 в качестве примера приведены расчетные распределения напряженности магнитного поля и абсолютной величины магнитной индукции в зависимости от радиуса при различных уровнях поля и при различных зазорах между образцом и полюсами магнита.

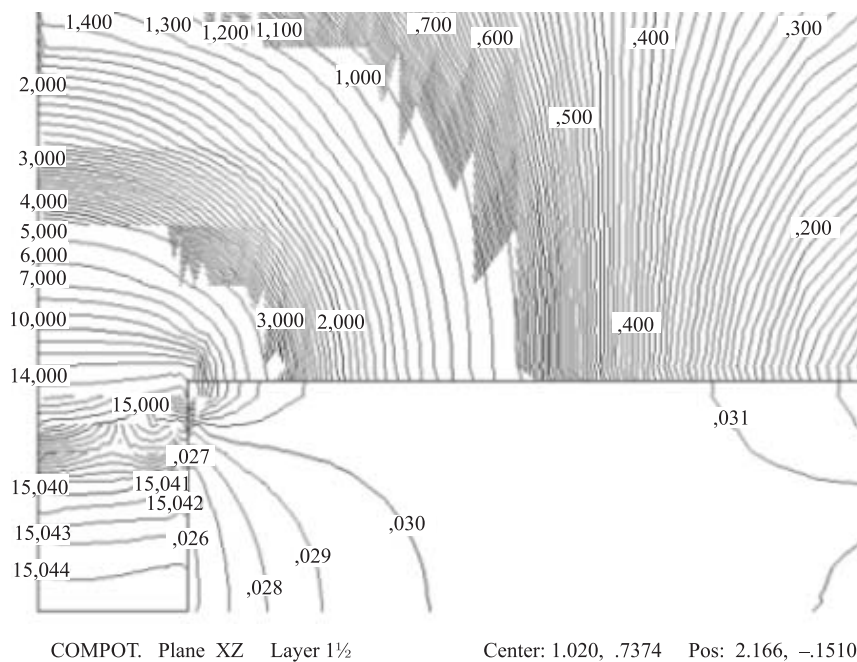


Рис. 9. Расчетное распределение абсолютной величины магнитной индукции B (кГс) в вертикальном сечении по оси симметрии образца $I = 0,02$ кА без зазора

На основании численных экспериментов были сделаны выводы:

1) неоднородность распределения напряженности магнитного поля в зависимости от расстояния до образца возрастает как при уменьшении величины поля и увеличении магнитной проницаемости образца, так и при увеличении зазора между образцом и полюсами магнита;

2) это распределение представляет собой гладкую кривую, эффективно описываемую вблизи границы образца степенным полиномом малого порядка.

Из первого вывода следует ограниченность снизу допустимого диапазона намагничивающего поля, а также требование максимально плотного контакта образца с полюсами.

Из второго вывода вытекает возможность экстраполяции значения поля на поверхность цилиндрического образца по величинам поля, измеренным в нескольких точках на различных расстояниях от боковой поверхности образца.

Приняв количество точек измерения равным трем, процедуру экстраполяции можно определить следующим образом. Пусть d_1, d_2, d_3 — расстояния от точек измерения (центров чувствительных зон датчиков магнитного поля) до поверхности образца; H_1, H_2, H_3 — соответствующие показания датчиков. Примем полиномиальный (в данном случае квадратичный) закон изменения поля от расстояния

$$H_i = H_0 + Ad_i + Bd_i^2, \quad i = 1, 2, 3.$$

Тогда значения H_0 на границе образца находятся путем решения полученной линейной системы трех уравнений (относительно неизвестных H_0, A и B).

Оценки показывают, что применение подобной экстраполяционной процедуры позволяет снизить предельную (минимальную) величину индукции с 1,9 до 1,5 Тл ($H \approx 1$ кА/м) при обеспечении точности $\sim 0,5\%$. Три датчика Холла располагаются в измерительной оснастке в горизонтальной плоскости (см. рис. 7) симметрично относительно полюсных поверхностей электромагнита.

При обработке результатов измерений индукции магнитного поля измерительной катушкой на цилиндрических образцах необходимо учитывать наличие магнитного потока в зазоре между боковой поверхностью образца и измерительной обмоткой. С учетом этого

$$B = \frac{\Phi_{\text{изм}}}{\pi R^2} - \mu_0 H \frac{2\Delta R}{R},$$

где B, H — индукция и напряженность магнитного поля в цилиндрическом образце; R — радиус цилиндрического образца, $(R + \Delta R)$ — эффективный радиус измерительной обмотки, который определяется по результатам магнитных измерений в отсутствие образца в воздушном зазоре электромагнита из условия $B = \mu_0 H$ в воздухе; $\Phi_{\text{изм}}$ — измеренный магнитный поток.

Достоверность показаний измерительной аппаратуры перед началом измерений контролируется путем измерения магнитной проницаемости воздуха (в отсутствие образца), равной по определению единице.

Размагничивание, выдержка и магнитная подготовка цилиндрических образцов осуществляются тем же способом, что и для кольцевых образцов. Ожидаемая погрешность магнитных измерений была оценена в $0,5\%$.

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для управления аппаратно-программным комплексом разработано специальное программное обеспечение, реализующее все описанные выше режимы работы. Программы PERMEABILITY-1 и PERMEABILITY-2 ориентированы на работу с кольцевыми и с цилиндрическими образцами соответственно. Программы снабжены подробным руководством пользователя [10]. Программное обеспечение разработано в среде Borland Delphi, работает под управлением Windows 9x и выше, представляя собой многопоточное разноразрядное Win32-приложение. На рис. 2, 3, 10 в качестве примера представлен внешний вид ряда кадров выдачи результатов в графической форме программ автоматизации системы измерения магнитных свойств ферромагнитных материалов.

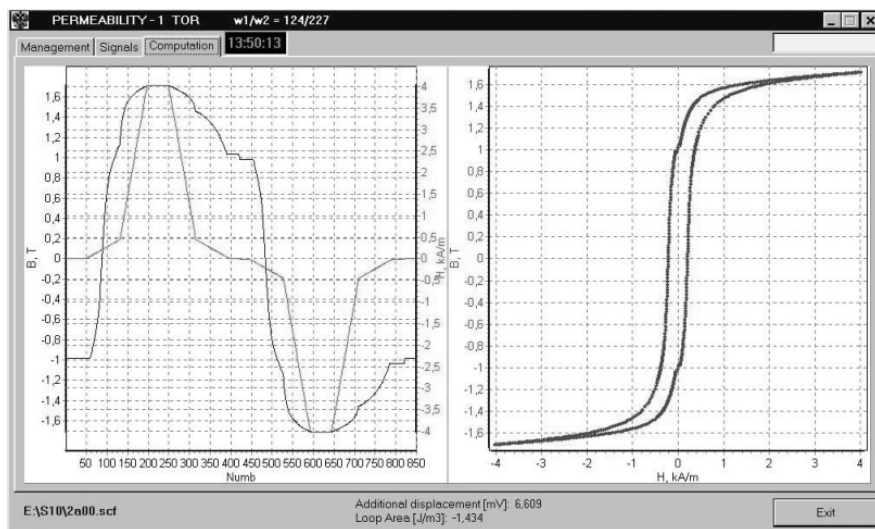


Рис. 10. Программа PERMEABILITY-1, окно результата измерений, типичная форма петли гистерезиса

Программы позволяют как проведение пошаговых измерений, для уточнения параметров измерительного процесса автоматически запоминая их в файлах шаблонов, так и полностью автоматизировать цикл измерений свойств материала (работа с пакетом шаблонов). Возможность динамического регулирования скорости изменения тока в магнитной системе позволяет сократить общее время измерительного процесса. Перед измерением автоматически

производится магнитная подготовка образца. Имеются широкие возможности постоянного визуального контроля над формой и уровнями сигналов. Перед началом и по окончании цикла измерений образец автоматически размагничивается.

Файлы выходной информации автоматизированного комплекса магнитных измерений используются для построения сглаженных зависимостей $B(H)$, $\mu(H)$, $\mu(B)$ и др., визуализируются и вносятся в базу данных свойств магнитных материалов. В дальнейшем база данных используется для численного моделирования магнитного поля различных магнитных систем с использованием комплексов программ COMPOT [2], KLONDIKE [3].

4. ВЫВОДЫ

Предложена методика измерений свойств ферромагнитных материалов с использованием цилиндрических образцов, эффективная при измерениях

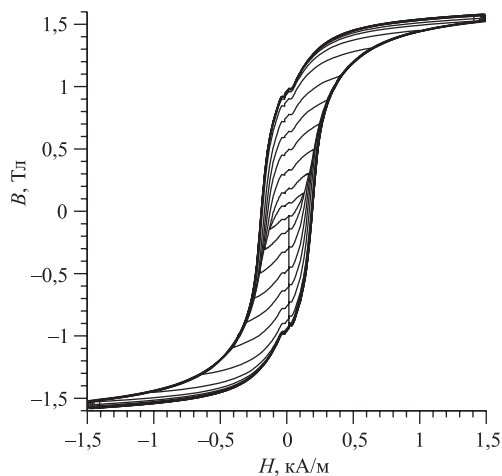


Рис. 11. Семейство симметричных (установившихся) петель гистерезиса, коэрцитивная сила по индукции плавки № 902908 составляет $H_c \cong 190$ А/м

в области больших значений магнитной индукции (случай сильного насыщения ферромагнетика). Приведено обоснование методики с привлечением прецизионного численного моделирования пространственной картины магнитостатического поля в измерительной установке.

Синтез предложенного подхода и стандартной методики, базирующейся на использовании кольцевых образцов, позволил охватить весь значимый диапазон индукции и оценить точность измерения основной кривой намагничивания.

Разработанная технология измерения свойств магнитных материалов позволяет в значи-

тельной степени автоматизировать процесс получения основной кривой намагничивания, которая используется для характеристики намагничивания материалов в постоянных полях.

На базе высокоавтоматизированного аппаратно-программного измерительного комплекса, включающего в себя:

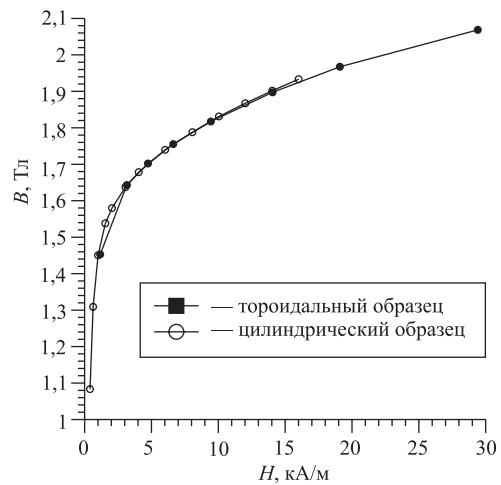


Рис. 12. Экспериментальные зависимости основной кривой намагничивания материала плавки № 902908 с использованием кольцевого (тороидального) и цилиндрического образцов

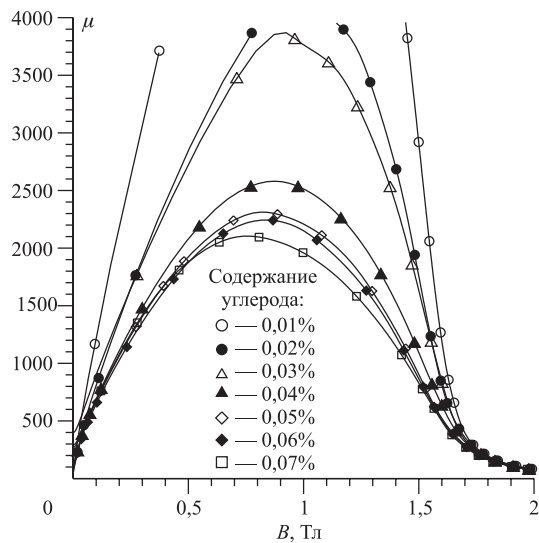


Рис. 13. Зависимость магнитной проницаемости μB для различных плавков в зависимости от процентного содержания углерода

1) дипольный лабораторный магнит, управляемый компьютером через блок управления источником питания,
2) систему магнитных измерений, состоящую из нескольких преобразователей магнитного поля на генераторах Холла, калибруемых измерителем индукции на основе ядерного магнитного резонанса,
3) многоканальную плату сбора информации,
4) разработанное специальное программное обеспечение,
были выполнены измерения 22 материалов (44 образцов), которые используются при производстве магнитной системы циклотрона ДЦ-72. На рис. 11–13 представлены типичные результаты магнитных измерений, описанные выше. Показано, что погрешность магнитных измерений кривой намагничивания не превышает 0,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8.377-80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Издательство стандартов, 1980.
2. Belyaev S. Yu., Doinikov N. I., Duke A. E., Kokotkov V. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Sytchevsky S. E. The КОМПОТ program package for three dimensional precision analysis of magnetostatic fields of nonlinear magnet systems International // Conf. «Optimization of Finite Element Approximations», St. Petersburg, Russia, June 25–29, 1995. P. 101–102.
3. Amoskov V., Belov A., Kukhtin V., Lamzin E., Severgin Y., Shatil N., Sytchevsky S. Numeric Simulation of the 3-D Field of System using permanent Magnets // Proc. EPAC 96, Barcelona, 10–14 June 1996. P. 2161–2163.
4. Измеритель магнитной индукции Ш1-9. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2.733.006 ТО, 1990.
5. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы. М., 1986.
6. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Издательство иностранной литературы, 1956.
7. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1989.
8. http://niiefa.spb.su/res/stc/synteZ/labs/nivo/prg/prog_e.html
9. http://niiefa.spb.su/res/stc/synteZ/labs/nivo/prg/kompot_m/kom_m_e.html
10. Программа измерений статических магнитных характеристик электротехнических сталеи с помощью аппаратно-программных комплексов «Permeability-1» и «Permeability-2». Технический отчет. СПб.: НИИЭФА, 2003.
11. Gulbekian G. G. et al. // Nukleonika. 2003. V. 48, No. 4. P. 207–210.

Получено 15 октября 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*

Подписано в печать 16.12.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,55. Тираж 325 экз. Заказ № 54697.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/