

УДК 621.317.423

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРИСУТСТВИИ СОБСТВЕННОГО ПОЛЯ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

А.Г. Пастушенков
Кафедра магнетизма

Показана возможность использования в сравнительном анализе информации о магнитных свойствах объектов, полученной в измерительных устройствах с использованием магнитных цепей различного типа. Обоснована необходимость учета собственного поля размагничивания и его гистерезиса. Предложен способ классификации методов магнитных измерений, основанный на использовании одного отличительного признака. Однозначная информация о магнитных свойствах объекта может быть получена либо при отсутствии собственного поля размагничивания (в замкнутой магнитной цепи), либо в случае, когда собственное поле размагничивания характеризует только объект исследования (в разомкнутой цепи).

Существование гистерезиса (неоднозначной зависимости) собственного поля размагничивания от намагниченности исследуемого объекта в ферромагнетиках известно давно [1]. Он проявляется всегда при исследовании процессов перемагничивания ферромагнетиков (магнитотвердых и магнитомягких) в разомкнутых, неполностью замкнутых или открытых магнитных цепях [1-3]. Гистерезис собственного поля размагничивания является причиной отличия в измеренных магнитных характеристиках, полученных из предположения линейной (безгистерезисной) зависимости собственного поля размагничивания от намагниченности или постоянства коэффициента размагничивания при изменении намагниченности в том же интервале. Поэтому целью настоящей работы явилось исследование динамики изменения вида гистерезисных кривых при изменении собственного поля размагничивания объекта исследования (магнитной системы) при переходе магнитной цепи из разомкнутой в замкнутую.

Все методы получения измерительной информации характеризуются наличием или отсутствием собственного поля размагничивания образца или системы электромагнит-образец в целом, оказывающим существенное влияние на форму полученных гистерезисных кривых. Даже строгое выполнение требований применяемого метода магнитных измерений не позволяет получить полностью идентичные зависимости магнитного параметра от величины перемагничивающего поля для образцов, изготовленных из одного и того же ферромагнитного материала. На рис. 1 показаны кривые размагничивания для SmCo_5 порошкового постоянного магнита, измеренные с помощью СМИ с замкнутой* (1) и разомкнутой** (2) магнитной цепью. В первом случае образец

* Гистериограф типа МН-50. Полусные наконечники электромагнита диаметром 50 мм, индукционный датчик с двумя скомпенсированными разнесенными обмотками

** Вибрационный магнитометр с вибрирующим образцом. Электромагнит с шириной межполюсного пространства 12 мм и диаметром полюсного наконечника 34 мм

имел форму прямого цилиндра диаметром 20 мм и высотой 10 мм, во втором – форму сферы диаметром 3 мм. Зависимость 3 – кривая размагничивания сферического образца, приведенная к истинному полю методом Релея (или сдвига) [4] из предположения, что размагничивающий фактор сферы $N = 0,33$ и постоянен для всех значений намагничённости.

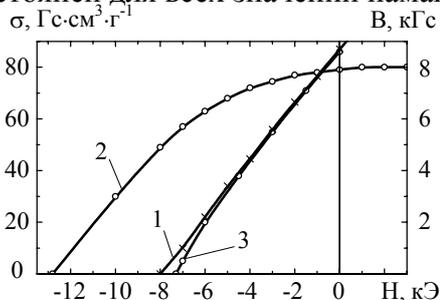


Рис. 1. Кривые размагничивания SmCo_5 постоянного магнита, измеренные в замкнутой (1) и разомкнутой магнитной цепи (2). Кривая (3) получена из предположения $N = \text{const}$

Хорошо заметно отсутствие полного совпадения зависимостей 1 и 3 в области пересечения с осью поля, что соответствует приближению к насыщению зависимости $4\pi I(H_i)$, причем зависимость, измеренная в отсутствии собственного поля размагничивания, имеет более прямоугольный вид. Это говорит о том, что при анализе измерительной информации необходимо рассматривать не только собственное поле размагничивания объекта исследования или системы в целом, но и его зависимость от состояния образца, т.е. от его намагничённости.

Магнитная цепь - основной элемент измерительной системы для получения информации о магнитных свойствах ферромагнитных объектов. Как правило, это система "электромагнит-образец" (или магнитная система) (рис. 2), включающая в себя рабочий объем источника магнитного поля D , исследуемый объект O и, если есть, устройство концентрации магнитного потока (например, магнитопровод электромагнита) и немагнитное пространство НУ.

На рис. 2 показано, как формируется методический ряд, в состав которого входят устройства, в магнитных цепях которых собственное поле размагничивания имеет либо нулевое (а), либо конечное значение (б) и (в).

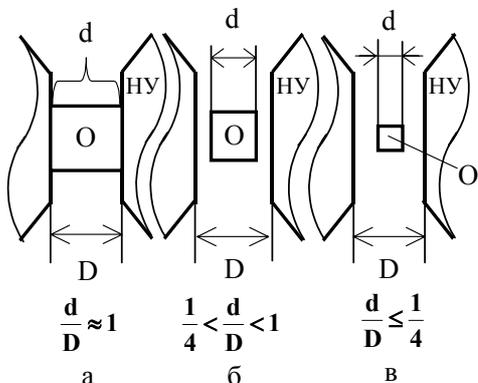


Рис. 2. Схематическое изображение принципа построения магнитной цепи и процесса её перехода из замкнутой в разомкнутую

Традиционно в его состав включают устройства, содержащие одну из трех магнитных цепей (замкнутую – ЗМЦ, неполностью замкнутую - НЗМЦ и разомкнутую - РМЦ), а также две области, где происходит плавный переход замкнутой магнитной цепи в неполностью замкнутую и неполностью замкнутой в разомкнутую. Где происходит этот переход, сказать трудно, так как строгой границы между методическими группами определить практически невозможно, поэтому предложено ввести понятие непрерывного методического ряда.

Воспроизведем основные определения [3], базирующиеся на понятиях собственного поля размагничивания H_0 и размагничивающего фактора N образца и всей системы в целом:

- *замкнутая магнитная цепь* - система "электромагнит-образец", в которой размагничивающий фактор N "постоянен" и имеет нулевое значение ($N=0$);
- *неполностью замкнутая магнитная цепь* - система "электромагнит-образец", в которой размагничивающий фактор N имеет конечное непостоянное значение и характеризует всю систему в целом;
- *разомкнутая магнитная цепь* - "система электромагнит-образец", в которой размагничивающий N фактор имеет конечное постоянное значение и характеризует только исследуемый объект.

Охарактеризуем подробнее отдельные методические группы. Из определений видно, что выбранные параметры H_0 и N однозначно характеризуют только первую и третью методические группы. Магнитная цепь считается разомкнутой до тех пор, пока размагничивающий фактор характеризует объект исследования, т.е. пока его значение остается неизменным как внутри, так и вне межполюсного пространства. Ранее было показано [2; 3], что это условие в пределах точности измерительного устройства выполняется в случае, если $d/D \leq 1/4$ (рис. 2, в). Если выполняется неравенство $d/D > 1/4$, N перестает быть для объекта исследования постоянной величиной, а магнитная цепь переходит в разряд неполностью замкнутой (рис. 2, б). Переход замкнутой цепи в неполностью замкнутую происходит тогда, когда влиянием технологических зазоров пренебречь нельзя, т.е. когда перестает выполняться равенство $d/D \approx 1$ (рис. 2, а).

На рис. 3 приведены кривые намагничивания для образцов Ni , полученные в разомкнутой (1) и неполностью замкнутой (3) цепях. Учёт $N \neq 0$ и $N = \text{const}$, как правило, не приводит к положительным результатам (2), и только использование зависимостей H_0 (5) (точнее, фактора N (6)) от намагниченности позволяет решить эту проблему (рис. 3, кривые 3 и 4).

Вторым способом получения однозначных результатов является поддержание в различных магнитных системах одинакового собственного поля размагничивания. На рис. 4, а показаны кривые намагничивания для никелевых образцов с размагничивающим фактором в системе электромагнит-образец $N \approx 0,09-0,11$. В случае разомкнутой магнитной цепи это был прямой цилиндр диаметром 5 и высотой 1 мм, намагничиваемый перпендикулярно оси, в случае неполностью замкнутой магнитной цепи – цилиндр диаметром 16 и высотой 10 мм, намагничиваемый вдоль его оси (ширина немагнитного зазора 1 мм).

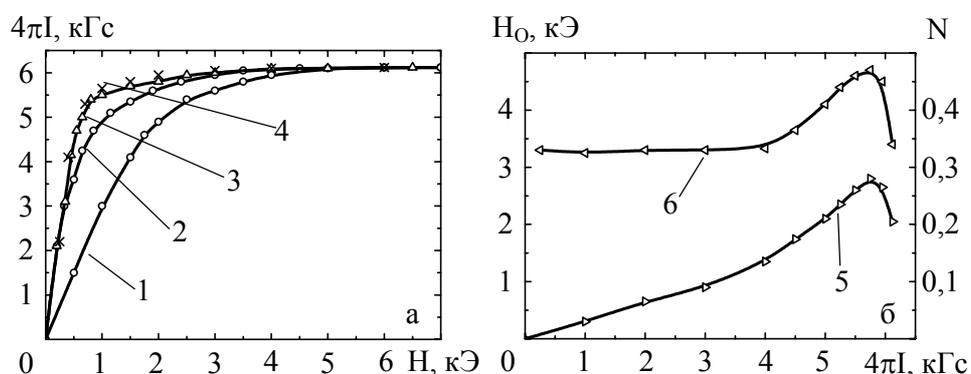


Рис. 3. Кривые намагничивания сферического ($N = 0.33$) и цилиндрического ($N = 0.11$) (3) никелевых образцов, измеренные в разомкнутой и неполностью замкнутой цепи соответственно. Кривая 2 получена из (1) при условии $N = 0.11$ и $N = \text{const}$, 4 - из (2) с использованием зависимостей $H_0(I)$ (5) и $N(I)$ (6)

Используя зависимости $H_0(4\pi I)$ и $N(4\pi I)$ можно получать однозначные зависимости, например, кривые намагничивания для никелевых образцов, полученные в замкнутой (3) и разомкнутой (4) магнитных цепях (рис. 4). В устройствах с неполностью замкнутой магнитной цепью размагничивающий фактор $N \neq 0$ и $N \neq \text{const}$ и зависит от геометрических размеров образца и ширины эффективного немагнитного зазора.

В устройствах с неполностью замкнутой магнитной цепью, по определению размагничивающий фактор $N \neq 0$ и $N \neq \text{const}$ и зависит от геометрических размеров образца и ширины эффективного немагнитного зазора.

На рис. 5 приведены кривые намагничивания для никелевых цилиндров диаметром 20 (1), 16 (2) и 10 (3) мм, высотой 10 мм, приведенные к нулевому фактору размагничивания. Если принять за величину относительной ширины немагнитного пространства отношение $\delta_3 = a/D_{\text{ц}}$, где a – ширина немагнитного и $D_{\text{ц}}$ – диаметр исследуемого образца, то при $a = 1$ мм для исследуемых образцов имеем $\delta_3(10) = 0,1$, $\delta_3(16) = 0,063$, $\delta_3(20) = 0,05$. Это соответствует $H_0(10) = 1,44$ ($N_{10} = 0,24$), $H_0(16) = 1,01$ ($N_{16} = 0,17$) и $H_0(20) = 0,75$ ($N_{20} = 0,11$) кЭ.

Использование зависимостей $H_0(I)$ и $N(I)$, аналогичных показанным на рис. 3, б, позволяет и в этом случае получать однозначную информацию. В таких устройствах измеряемая величина и сигнал измерительной информации, возникающий в первичных преобразователях, связываются через магнитные коэффициенты, которые, как правило, определяются эмпирическим путем при помощи различных эталонных образцов. Они имеют достаточно сложную зависимость от геометрических размеров образца, а иногда и разный физический смысл.

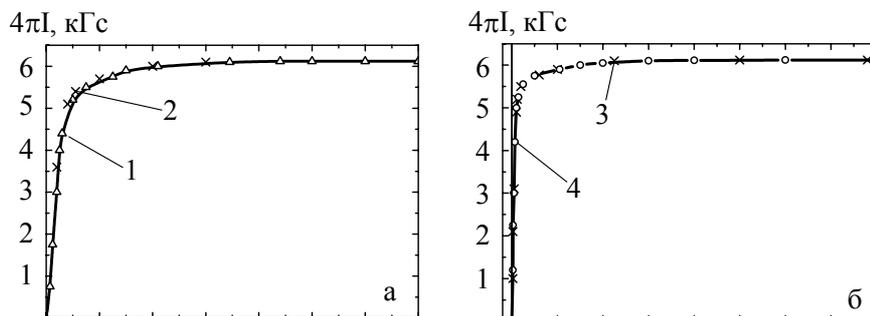


Рис. 4. а - кривые намагничивания для образцов Ni, измеренные в неполностью замкнутой Δ - (1) и разомкнутой $-x-$ (2) цепи, $N = 0,09-0,11$; б - в замкнутой $-o-$ (3) и разомкнутой $-x-$ (4) цепи, $N \approx 0$.

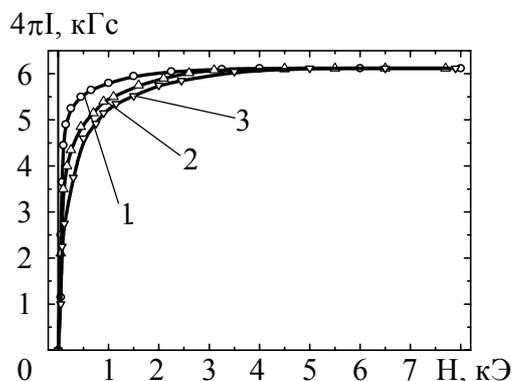
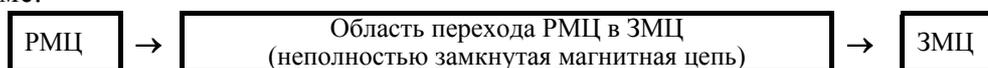


Рис. 5. Кривые намагничивания для никелевых цилиндров диаметром 20 (1), 16 (2) и 10 (3) мм, высотой 10 мм

Отсюда можно сделать вывод о том, что средствам магнитных измерений присущи свойства, характеризующие области перехода как разомкнутой магнитной цепи в неполностью замкнутую, так и неполностью замкнутой магнитной цепи в замкнутую. Остается открытым вопрос критерия "замкнутости" или "разомкнутости" магнитной цепи.

По четкости описания способа получения измерительной информации при построении методического ряда, логично обособить два типа цепей: разомкнутую и замкнутую, между которыми может существовать область перехода, внутри которой происходит трансформация магнитной цепи по схеме:



Все закономерности изменения вида гистерезисных кривых (изменение величины собственного поля размагничивания системы и наличие гистерезиса собственного поля размагничивания) остаются неизменными вплоть до нулевого значения последнего.

Для привычного восприятия используемых терминов логично этой области оставить наименование неполностью замкнутой магнитной цепи.

Внутри нее могут существовать устройства, в которых используются методики, присущие как разомкнутой (вибрационные магнитометры), так и замкнутой (холловские гистериографы с ферромагнитными преобразователями Холла) магнитной цепи. Сюда же относятся устройства с несимметрично или симметрично разомкнутой магнитной цепью, а также коэрцитиметры, устройства для определения остаточной индукции и индукции вблизи поверхности исследуемых объектов и т.п.

Правомочным оказывается введение понятия *открытой магнитной цепи*, в состав которой входят объект исследования и рабочий объем соленоида [3]. В связи с отсутствием элементов концентрации магнитного потока, размагничивающий фактор отличен от нуля, постоянен и характеризует только образец. Таким системам присущи многие общие свойства, в том числе «магнитное изображение», возникающее из-за изменения связи между измеряемой физической величиной и первичными преобразователями магнитных величин (наиболее ярко проявляется в устройствах со сверхпроводящими соленоидами) [5]. В эту группу можно включить вибрационные магнитометры, коэрцитиметры с гальваномангнитными и индукционными преобразователями, дифференциальные устройства для измерения магнитной проницаемости при проведении термического магнитного фазового анализа и т.п.

Предлагаемый подход позволяет проанализировать процессы, влияющие на вид получаемой информации о магнитных свойствах ферромагнетиков, построить стройную классификацию методов магнитных измерений, сделать их описание более четким и ограничить возможности получения ошибочной измерительной информации при использовании стандартных методов измерения (подлежащих аттестации организациями Госстандарта).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 02-02-96001.

Литература

1. Антонов В.Г., Чечурина Е.Н. Способы экспериментального определения коэффициентов размагничивания стержней // Исследования в области магнитных измерений. Л.: ВНИИМ. 1974. Вып. 152. С. 120-129.
2. Пастушенков А.Г., Коряковский А.В. Влияние собственного поля размагничивания постоянных магнитов на достоверность результатов магнитных измерений в цепи с немагнитным зазором // Электротехника. 1999. № 10. С. 47-50.
3. Пастушенков А.Г. Использование непрерывного методического ряда в магнитных измерениях // Магнитная анизотропия и гистерезисные свойства РЗ сплавов. Матер. Всерос. школы-семинара. Тверь, 2003. С. 87-95.
4. Чечерников В.И. Магнитные измерения. М.: Изд. МГУ, 1963. С. 9-12.
5. Stoner R.G., Herbert R.H. Vibrating sample magnetometer systems // J. Appl. Phys. 1970. V. 41, № 9. P. 3706-3712.