

## **ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

УДК 669.24

### **ГИСТЕРЕЗИС СОБСТВЕННОГО ПОЛЯ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ В МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ С НЕМАГНИТНЫМ ЗАЗОРОМ**

**А. Г. Пастушенков**

*Тверской государственный университет  
кафедра магнетизма*

Проведён анализ гистерезисных изменений собственного поля размагничивания, возникающих при испытаниях ферромагнитных образцов в открытых (разомкнутых) и частично замкнутых магнитных цепях. Показано, что перемагничивание по предельному или частному гистерезисному циклу сопровождается гистерезисом собственного поля размагничивания, что должно учитываться при расчете основных магнитных характеристик материала. Полученные закономерности в зависимости собственного поля размагничивания от намагниченности могут быть полезны при анализе экспериментальных данных, полученных в измерительных магнитных цепях с немагнитным зазором.

**Ключевые слова:** *гистерезис собственного поля размагничивания, магнитный коэффициент, коэффициент размагничивания, частично замкнутые магнитные цепи*

**1. Введение.** Существование гистерезиса собственного поля размагничивания при исследовании процессов намагничивания и перемагничивания ферромагнитных объектов в магнитных цепях с немагнитным зазором в настоящее время не вызывает сомнения. Отсутствие полного совпадения полученной измерительной информации свидетельствует о том, что существуют причины, общие (наличие или отсутствие собственного поля размагничивания), или присущие только используемой методике магнитных измерений, которые необходимо учитывать при проведении сравнительного анализа магнитных свойств объектов исследования.

Даже в случае получения магнитных величин, близких по значению, необходим анализ условий их измерения, так как каждая из них может содержать погрешность, обусловленную условиями эксперимента. Необходимо учитывать, что реальные объекты исследования в магнитных системах с немагнитным зазором в процессе измерений могут быть намагничены неоднородно. Это приводит к нарушению линейной связи между собственным полем размагничивания  $H_0$  и намагниченностью  $I$  ( $H_0 \neq -NI$ ). По этой причине в работах [1-3] параметр  $N$  рассматривается не как фактор формы, а как

магнитный коэффициент размагничивания и устанавливается его связь с магнитной проницаемостью вещества  $\mu$  и тела  $\mu'$ . Исключение из рассмотрения этих особенностей приводит к неточностям и разночтениям при сравнительном анализе полученных результатов.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ зависимостей собственного поля размагничивания от намагниченности, полученных в разомкнутой, неполностью замкнутой и так называемой открытой [4] магнитной цепи. Очевидно, что в первом случае значения собственного поля размагничивания определяются магнитометрическим коэффициентом размагничивания  $N_M$  (магнитный коэффициент), во втором случае – баллистическим  $N_B$ . Это связано с тем, что в первом случае в выработке измерительного сигнала участвует поле рассеяния всего образца (измерительная катушка равномерно распределяется по его длине), а во втором (баллистический  $N_B$ ) измерительная катушка локализована в нейтральном сечении образца. Обычно  $N_M > N_B$ , однако закономерности их изменения, как правило, имеют схожий характер. Это позволяет установить, с одной стороны, различия в зависимостях собственного поля размагничивания от намагниченности при измерениях в открытой и разомкнутой магнитных цепях, с другой стороны – выявить условия, при которых зависимости  $H_0(4\pi I)$  вида рис. 1, *а* переходят к виду рис. 1, *б*. При этом необходимо иметь в виду, что в разомкнутой и открытой магнитных цепях собственное поле размагничивания характеризует исследуемый образец, а в неполностью замкнутой магнитной цепи – всю систему электромагнит–образец в целом.

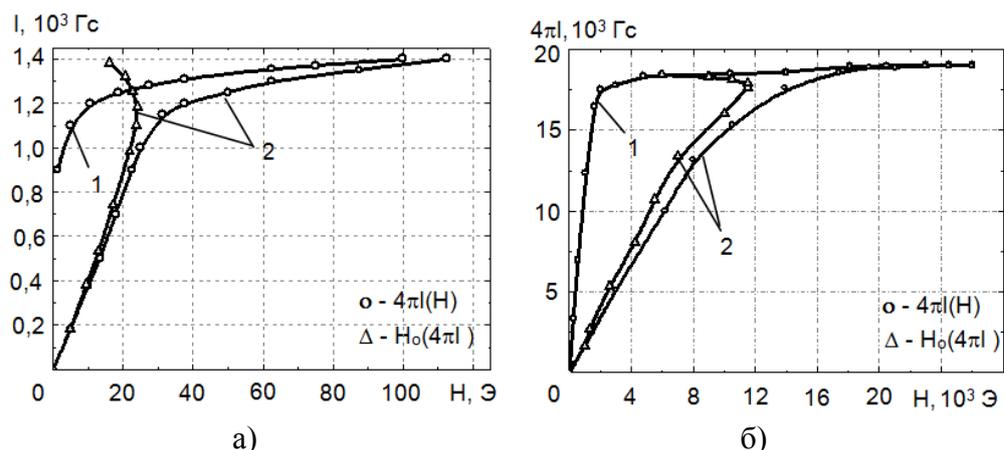
**2. Методика эксперимента.** В качестве измерительных устройств с магнитной цепью, имеющей немагнитное пространство, использованы вибрационный магнитометр (разомкнутая магнитная цепь), холловский гистериограф (неполностью замкнутая магнитная цепь) и схема, воспроизводящая коммутационный метод измерения основной кривой намагничивания (открытая магнитная цепь). В качестве материала эталонных образцов использован электролитический никель (намагниченность  $4\pi I = 6,12$  кГс или удельная намагниченность  $55,3$  Гс·см<sup>3</sup>/г) [5]. Погрешность измерений магнитного параметра и перемагничивающего поля в обоих случаях не превышала 2,5%. В разомкнутой магнитной цепи использовались образцы с размерами  $D/4 < d < 3D/4$ . В исследованиях использованы полосовые образцы из кремнистого железа, а также сферические, цилиндрические, кубические и в виде параллелепипеда из железа, никеля и анизотропного феррита на основе бария.

Анализировались как значения, так и зависимости собственного поля и коэффициента размагничивания от намагниченности объекта

исследования. Собственное поле размагничивания  $H_0$  определялось по стандартной методике (из парных кривых намагничивания, размагничивания и петель гистерезиса), а также с использованием коэффициента размагничивания  $H_0 = N \cdot I$ , рассчитанного из соотношения между магнитной проницаемостью вещества  $\mu$  и образца  $\mu'$  (тела).

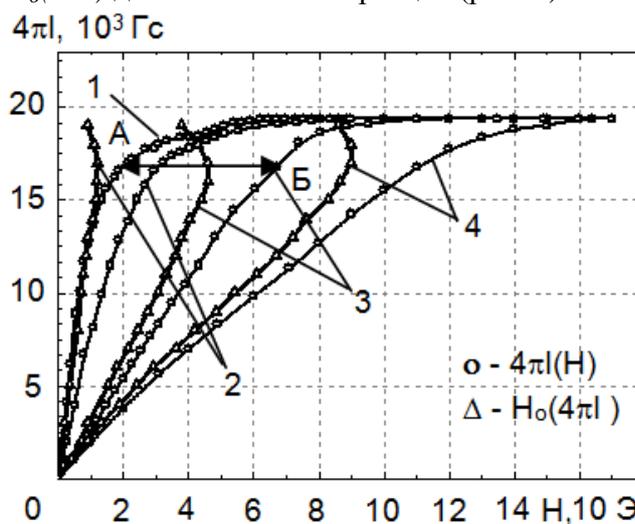
**3. Результаты и их обсуждение.** Впервые в разомкнутой магнитной цепи гистерезис собственного поля размагничивания мы наблюдали при изучении влияния формы объекта исследования на параметры температурной стабильности высококоэрцитивных материалов на основе сплавов Sm-Zr-Co-Cu-Fe с повышенной температурной стабильностью [6]. Оказалось невозможным, используя коэффициент размагничивания  $N = Const$ , получить совпадающие кривые размагничивания для образцов разной формы, изготовленных из одного постоянного магнита. Вид зависимости собственного поля размагничивания от намагниченности был сходным с зависимостью  $H_0(4\pi I)$  приведенной на рис. 1(б). Измерение температурных зависимостей магнитных свойств проводилось на вибрационном магнитометре в разомкнутой магнитной цепи. Позднее аналогичная картина наблюдалась при составлении таблицы поправок на собственное поле размагничивания при изменении длины исследуемых образцов в полностью замкнутой магнитной цепью [7].

В работе Антонова В. Г. и Чечуриной Е. Н. [3] приведена зависимость собственного поля размагничивания от намагниченности полосового образца железа  $H_0(4\pi I)$  (рис. 1(а)), полученная путем сравнения парных безгистерезисных кривых намагничивания полосовых образцов, измеренных в замкнутой (1) и разомкнутой (2) магнитных цепях. Она несколько отличается от аналогичной зависимости, приведенной на рис. 1(б).



Р и с . 1. Кривые намагничивания, полученные для полосового образца железа (а), измеренные в отсутствии (1) и присутствии собственного поля размагничивания (2), и зависимость его от намагничённости по данным [3], аналогичные зависимости для образца железа (б) с минимальным значением собственного поля размагничивания (1) и призмы  $5 \times 3 \times 0,25$  мм, намагничиваемой вдоль короткого ребра (2)

В первой части нашей работы по возможности был воспроизведен эксперимент, описанный выше в [3], и получены зависимости  $H_0(4\pi I)$  для полосовых образцов (рис. 2).



Р и с . 2. Кривые намагничивания для полосовых образцов кремнистого железа длиной  $L = 280$  мм. (1), 140 мм. (2), 70 мм, (3) и 52 мм. (4) и зависимости  $H_0(4\pi I)$  образцов 2, 3 и 4

Мы надеемся пронаблюдать переход вида зависимостей  $H_0(4\pi I)$ , показанных на рис. 1(а) к аналогичным зависимостям, приведенным на рис. 1(б), путем уменьшения длины полосы  $L$  от 280 до 52 мм (280 мм (1); 140 мм (2); 70 мм (3) и 52 мм (4)). Используемые полосовые

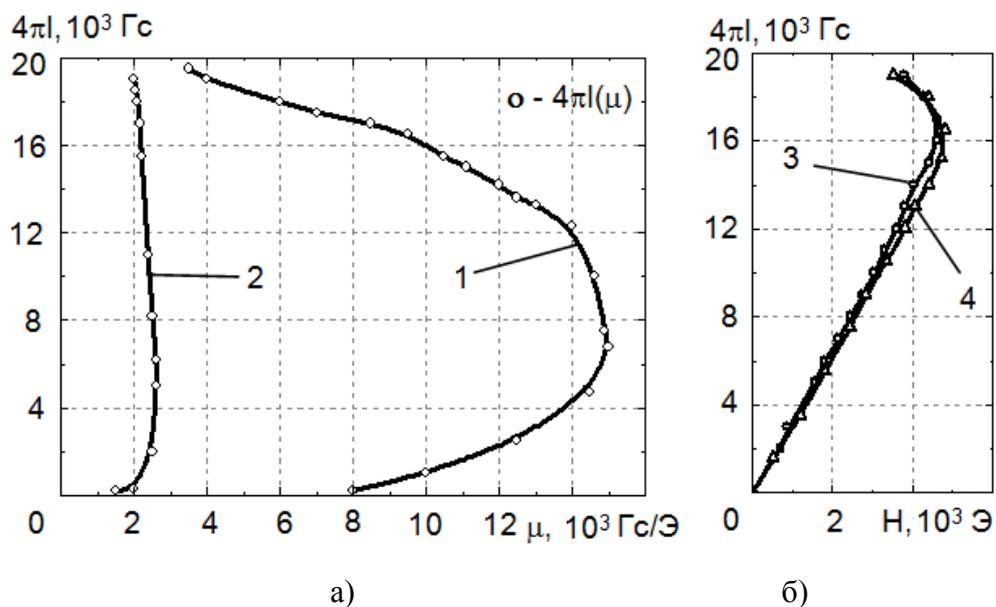
образцы имели ширину  $d = 10$  мм и толщину  $h = 0,2$  мм. При воспроизведении коммутационного метода измерения основной кривой намагничивания измерительная обмотка располагалась в нейтральном сечении исследуемого образца. Значения собственного поля размагничивания образцов 2, 3 и 4, рассчитывались по отношению к образцу 1, например, как расстояния между основной кривой намагничивания 1 и 3 при выбранном значении намагничённости (точки А и Б рис. 2).

Считалось, что отношение длины к ширине полосового образца  $L/d \sim 30$  исключает влияние его торцов на сигнал измерительной информации, возникающий в измерительной катушке, расположенной в нейтральном сечении, т.е. в этом случае собственное поле размагничивания можно считать достаточно малым. По полученным значениям  $H_o$  строились зависимости  $H_o(4\pi I)$ . Как и в работе [3] эти зависимости практически линейны до  $I \sim 0,74-0,78I_s$ . Есть информация, что аномальное поведение собственного поля размагничивания начинает проявляться после достижения  $0,7I_s$  [8]. В работах [1-3,8] разделены понятия магнитной проницаемости вещества  $\mu = B/H_i$  и тела  $\mu' = B/H_e$ . В основе получения формул для расчета  $\mu'$  и  $N'$  лежит простое выражение  $H_i = H_e - NI$ , а сами эти величины находятся как

$$\mu' = \frac{\mu}{1 + N(\mu - 1)} \text{ и } N' = \frac{1}{\mu - 1} \left( \frac{\mu}{\mu'} - 1 \right). \quad (1)$$

Для получения зависимости  $N'(I)$  необходимо знать  $\mu(I)$  и  $\mu'(I)$ , в нашем случае от  $4\pi I$ . На рис. 3(а) приведены кривые  $\mu(1)$  и  $\mu'(2)$  от  $4\pi I$ , на рис. 3(б) представлены зависимости  $H_o(4\pi I)$  для полосы кремнистого железа длиной 70 мм, полученные из сравнения парных кривых намагничивания (кривая 4) и с использованием выражения для  $N'$  (кривая 3).

Однако, ожидаемый результат не был получен, очевидно, в нейтральном сечении полосовых образцов, вплоть до длины в пять раз меньше исходной, суммарное влияние реальных условий намагничивания недостаточно для заметного изменения вида зависимости  $H_o(4\pi I)$ . Приведенные к максимальному значению собственного поля размагничивания эти зависимости с достаточной идентичностью повторяют друг друга.



Р и с . 3. Зависимости  $4\pi I(\mu)$  для полос кремнистого железа (а) длиной  $L=280 \text{ мм}$ . (1) и  $70 \text{ мм}$ . (2) и зависимости  $H_0(4\pi I)$  (б), полученные экспериментально (3) и рассчитанные с использованием значений  $\mu$  и  $\mu'$  (4)

Во второй части работы изучался гистерезис собственного поля размагничивания в разомкнутой магнитной цепи, где коэффициент размагничивания характеризует объект исследования, а рабочая область измерительного устройства формируется в межполюсном пространстве электромагнита шириной  $14 \text{ мм}$  и диаметром полюсных наконечников  $34 \text{ мм}$ . В качестве образцов, по отношению к которым определялось собственное поле размагничивания, использовались диски диаметром  $5 \text{ мм}$  и высотой  $0,2 - 0,4 \text{ мм}$ , намагничиваемые перпендикулярно их оси. На рис. 4 (а) приведены кривые намагничивания для диска, изготовленного из кремнистого железа, толщиной  $0,2 \text{ мм}$  и прямоугольной призмы  $5,0 \times 2,5 \times 0,2 \text{ мм}$ , намагничиваемой вдоль короткого ребра; на рис. 4 (б) – зависимости собственного поля размагничивания от намагничённости, полученные при сравнении парных кривых намагничивания (3), и рассчитанные с использованием соотношений (1) и значений  $\mu$  и  $\mu'$ . Эти зависимости аналогичны приведенным на рис. 1 (б). Однако при уменьшении длины короткого ребра до  $0,2 \text{ мм}$  явно просматривается тенденция смещения аномального участка ближе к области насыщения. Для проверки этого предположения аналогичные зависимости были получены для образцов, изготовленных из никеля, намагничивание до насыщения которых наступает в полях не более  $5,5-6,0 \text{ кЭ}$ .

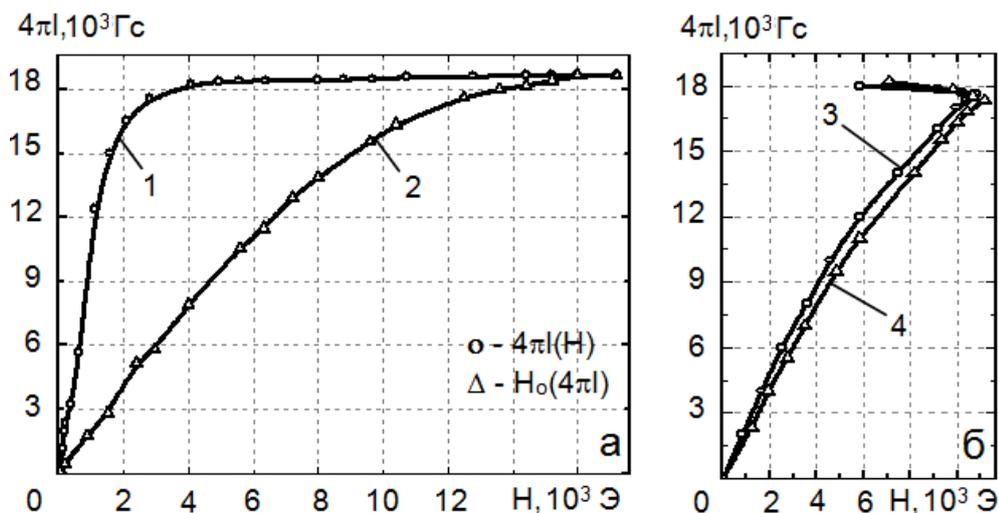
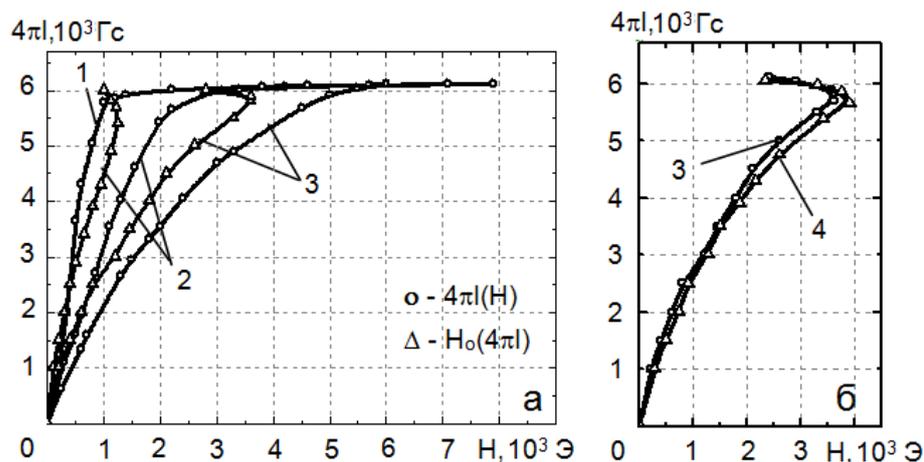


Рис. 4. Кривые намагничивания для образцов кремнистого железа в виде тонкого диска (1), параллелепипеда (2) (а) и зависимости  $H_0(4\pi I)$  (б), полученные экспериментально (3) и рассчитанные с использованием значений  $\mu$  и  $\mu'$  (4).

Ожидалось, что аномальное поведение собственного поля размагничивания на зависимости  $H_0(4\pi I)$  несколько отдалится от области приближения к насыщению. В эксперименте использовались диск диаметром 5 мм и толщиной 0,3 мм, намагничиваемый перпендикулярно оси, прямоугольная призма  $5 \times 2,5 \times 0,4$  мм, намагничиваемая вдоль короткого ребра, и сфера диаметром 3 мм. Использование сферы не случайно, так как мы не отказались от идеи наблюдения трансформации вида зависимости  $H_0(4\pi I)$  от показанной на рис. 1(а), до аналогичной на рис. 1(б). Известно, что эллипсоид вращения намагничивается равномерно, если направление магнитного поля и длинной оси эллипсоида совпадают. Имелось в виду, что сфера, являясь частным случаем эллипсоида вращения, намагничивается более однородно, чем другие используемые формы объектов исследования.

На рис. 5(а) приведены кривые намагничивания для сферы (2), параллелепипеда (3) и тонкого диска (1) по отношению к которому определялись поля размагничивания и строились зависимости  $H_0(4\pi I)$ . Из рис. 5(б) видно, что зависимости (3) и (4) также с достаточной точностью повторяют друг друга. Несмотря на то, что образцы из никеля намагничиваются до насыщения в полях 5,5-6,0 кЭ, а образцы железа - при 12-14 кЭ, аномальное поведение собственного поля размагничивания  $H_0$  при намагничивании начинает проявляться при достижении уровня 0,70-0,75 от  $I_S$ , что не противоречит [8].

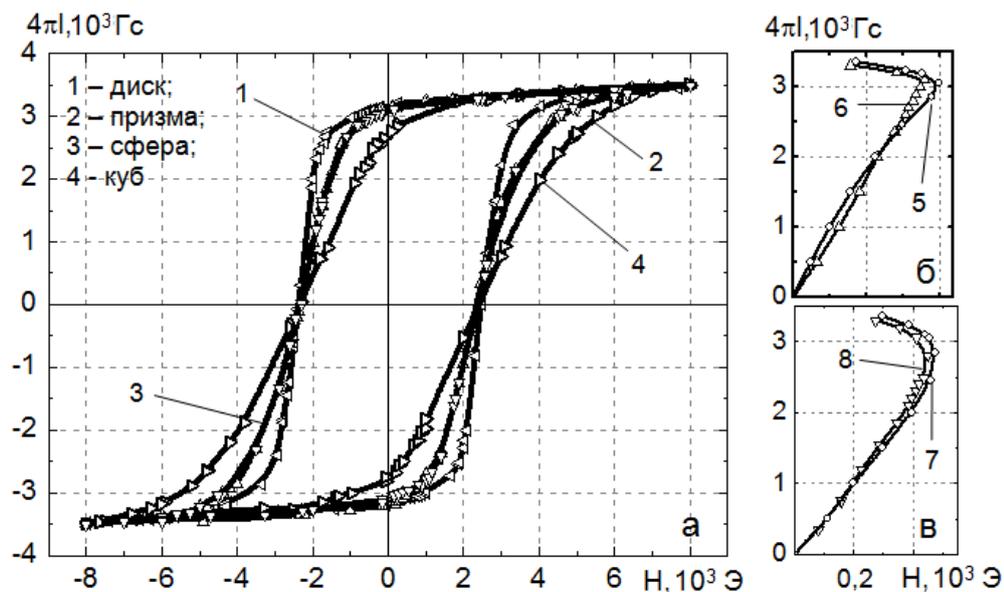


Р и с . 5. Кривые намагничивания для образцов никеля в виде тонкого диска (1), сферы (2) и параллелепипеда (3) и зависимости  $H_0(4\pi I)$  для второго (2) и третьего (3) образцов (а); зависимости  $H_0(4\pi I)$  (б), полученные экспериментально (3) и рассчитанные с использованием значений  $\mu$  и  $\mu'$  (4)

Однако, как и в предыдущем случае, мы наблюдаем смещение экстремума на зависимости  $H_0(4\pi I)$  к области насыщения  $I_S$  исследуемого образца при увеличении намагничивающего поля. Для никелевых образцов он находится вблизи 0,90-0,91 от  $I_S$ , для образцов из железа - вблизи 0,94-0,95 от  $I_S$ . На рис. 5(а) показана кривая  $H_0(4\pi I)$  (2) для сферического образца. Видно, что она достаточно хорошо повторяет аналогичные зависимости для полосовых образцов, представленных на рис. 1(а) и 2. Это говорит о том, что сфера, являясь частным случаем эллипсоида вращения, при изменении намагниченности от нулевого значения до насыщения в каждый момент времени намагничена с некоторой степенью неоднородности, достаточной, как и в предыдущих случаях, для формирования наблюдаемых аномалий на зависимости  $H_0(4\pi I)$  [9].

Нами рассмотрены особенности поведения величины собственного поля размагничивания в процессе намагничивания исследуемых ферромагнитных объектов. Применим используемую методику получения зависимостей  $H_0(4\pi I)$  к перемагничиванию высококоэрцитивных ферромагнетиков по предельному гистерезисному циклу. На рис. 6(а) приведены петли гистерезиса образцов, изготовленных из анизотропного феррита бария, которые имели форму тонкого цилиндра (или диска) диаметром 5 мм и высотой 0,4 мм (1), призмы 5,0×3,0×0,4 мм, намагничиваемой вдоль короткого ребра (2), сферы диаметром 3,0 мм (3) и куба с ребром в 3 мм, намагничиваемого вдоль ребра (4).

Как и раньше, используя парные петли гистерезиса (рис. 6(a) петли гистерезиса 1 и 2), были построены зависимости  $H_o(4\pi I)$  для нисходящей 5 и восходящей 6 ветвей петли гистерезиса второго образца (рис. 6(б)). Внешний вид полученных зависимостей практически идентичен, аномальный характер изменения собственного поля размагничивания сохраняется в обоих случаях. Отклонение от линейной зависимости начинается при  $4\pi I \sim 0,7I_s$ , а наибольшее значение собственного поля размагничивания  $H_o$  находится на уровне  $\sim 0,9I_s$  [10].



Р и с . 6. Петли гистерезиса для образцов из анизотропного постоянного магнита на основе феррита бария (а), зависимости  $H_o(4\pi I)$  для нисходящей (5) и восходящей (6) ветвей петли гистерезиса (4 б), аналогичные зависимости для сферического (7) и кубического (8) образцов (в)

Необходимо отметить, что петли гистерезиса для сферического и кубического образцов, в пределах точности измерения, практически совпадают друг с другом, что говорит о том, что их коэффициенты размагничивания близки. Нас рис. 6(в) приведены зависимости  $H_o(4\pi I)$ , полученные из сравнения кривых размагничивания образцов 3 и 4 с кривой размагничивания образца 1. Положительно то, что по характеру изменения собственного поля размагничивания от намагниченности они похожи на аналогичные кривые для сферического образца рис. 5(а) и полосовых образцов рис. 1(а) и 2.

**4. Заключение.** При получении информации о магнитных свойствах ферромагнетиков в реальных условиях исследуются объекты

конечных размеров. Как правило, это тела поворотной симметрии. Однако, даже сфера, являющаяся частным случаем эллипсоида вращения, является неоптимальной для однородного намагничивания формой объекта исследования. На самом деле магнитные измерения, особенно в разомкнутой магнитной цепи, зачастую проводят с использованием образцов в форме дисков, коротких цилиндров, призм, кубов и иногда объектов произвольной формы. Поэтому нахождение соответствия магнитных свойств вещества и тела остается актуальным и требует всестороннего анализа причин, влияющих на достоверность полученных результатов.

Традиционно существуют два направления реализации перехода от характеристик объекта исследования к параметрам материала, из которого он изготовлен: 1) анализ экспериментальных зависимостей влияющих величин (собственное поле размагничивания через коэффициенты размагничивания исследуемых объектов) на измеряемые магнитные свойства исследуемых объектов; 2) компьютерное моделирование (несмотря на то, что нет аналитических выражений, описывающих кривые намагничивания и петли гистерезиса), построение различных математических моделей, составление эмпирических соотношений, подбор согласующих коэффициентов.

Показано, что плавный переход вида зависимости собственного поля размагничивания от намагниченности (рис. 1(а) – рис. 1(б)) можно наблюдать при улучшении однородности намагничивания объекта исследования (при использовании магнитометрического метода измерения магнитных свойств). Необходимо помнить, что это делается в пределах точности измерения магнитных свойств.

Перемагничивание по предельному или частному гистерезисному циклу также сопровождается гистерезисом собственного поля размагничивания, что осложняет процесс перестройки гистерезисных кривых для расчета основных магнитных характеристик. Положительным является то, что характер изменения идентичен как для нисходящей, так и для восходящей ветвей петли гистерезиса.

Использование коэффициента размагничивания  $N = \text{const}$  при переходе от объекта исследования к материалу, в случае гистерезисных кривых, может привести к большим ошибкам (до 20 и более %) [11]. Полученные закономерности в зависимости собственного поля размагничивания от намагниченности могут быть полезны при анализе экспериментальных данных, полученных в магнитных цепях с немагнитным зазором при измерении магнитных характеристик ферромагнитных материалов.

### Список литературы

1. Аркадьев В. К. Магнитные коэффициенты формы вещества и тела. «ЖРХФО». 46. 22. 1914.
2. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. М.: ОНТИ. 1934.
3. Антонов В. Г., Чечурина Е. Н. Способы экспериментального определения коэффициентов размагничивания стержней // Исследования в области магнитных измерений. Л.: ВНИИМ. 1974. вып. 152(212). С. 120-129.
4. 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.
5. Graham C. D. Iron and nickel as magnetization standarts // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. № 3. P. 2032 – 2034.
6. Пастушенков А. Г. Обратимые изменения магнитного состояния постоянных магнитов на основе Sm-Zr-Co-Cu-Fe // Физика магнитных материалов. Калинин. КГУ. 1987. С. 87 – 95.
7. Пастушенков А. Г., Разоренов Г. В. Использование неполностью замкнутой магнитной цепи при контроле магнитных параметров постоянных магнитов // Физика магнитных материалов. Калинин. КГУ. 1988. С. 86 - 93.
8. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. М.: «Энергия». 1969. 360 с.
9. Пастушенков А. Г., Боронихин М. В. Проблемы соответствия магнитных свойств вещества и тела // Тезисы докладов XVIII Международной конференции по постоянным магнитам. Суздаль. 2011. С. 134.
10. Пастушенков А. Г., Львова Г. Л. Получение достоверной информации о магнитных свойствах ферромагнитных объектах в реальных условиях // Тезисы докладов XIX Международной конференции по постоянным магнитам. Суздаль. 2013. С. 156.
11. Пастушенков А. Г. Использование реальных магнитных систем для исследования процессов перемагничивания магнетиков // Материалы конференции «Высокоточные материалы функционального назначения». М.: Издательство Московского государственного горного университета 2007. № ОВ1. С.109 – 119.

## **HYSTERESIS OF SELF-DEMAGNETIZING FIELD IN MAGNETIC CIRCUITS WITH NON-MAGNETIC GAP**

**A. G. Pastushenkov**

*Tver State University  
Chair of Magnetism*

Analysis is given of the hysteretic changes of self-demagnetizing field occurring in the course of testing ferromagnetic samples in open-loop and partially closed magnetic circuits. It is shown that magnetization reversal over full or minor hysteresis cycles is accompanied by a hysteresis of the self-demagnetizing field which must be taken into account in the calculation of main magnetic characteristics of the material. The obtained regularities of the self-demagnetizing field dependence on the magnetization may be useful in the analysis of experimental data obtained in measuring circuits with non-magnetic gap.

**Keywords:** *hysteresis of self-demagnetizing field, magnetic coefficient, coefficient of demagnetization, partially closed magnetic circuits*

**Об авторе:**

ПАСТУШЕНКОВ Александр Григорьевич – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры магнетизма ТвГУ, *e-mail:* [Aleksander.Pastushenkov@tversu.ru](mailto:Aleksander.Pastushenkov@tversu.ru)