

№ 1268

В.Ю. Введенский
А.С. Лилеев

Физические методы исследования

Магнитные свойства

Курс лекций

№ 1268

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра физического материаловедения

В.Ю. Введенский

А.С. Лилеев

Физические методы исследования

Магнитные свойства

Курс лекций

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150700 – Физическое материаловедение, специальности 150702 – Физика металлов



Москва 2010

УДК 537.6
В24

Рецензент
д-р физ.-мат. наук, проф. *Л.М. Капуткина*

Введенский В.Ю., Лилеев А.С.

В24 Физические методы исследования: Магнитные свойства:
Курс лекций. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 143 с.
ISBN 978-5-87623-318-9

Рассматриваются магнитные методы исследования материалов (преимущественно ферро- и ферромагнитных). Описываются различные виды образцов и магнитных цепей, намагничивающие устройства, первичные измерительные преобразователи магнитного поля, магнитного момента и магнитного потока. Раскрываются физические принципы статических и динамических методов измерений, описываются схемы установок и процедуры выполнения измерений. Приводятся примеры использования магнитных измерений для исследования материалов.

Курс лекций предназначен в качестве основной учебной литературы при изучении методов измерений магнитных свойств для студентов специальностей и направлений 150700, 150702, 010700, 210602, 200503. Может быть также рекомендован аспирантам и специалистам, желающим систематизировать свои знания по описанным методам исследования.

УДК 537.6

ISBN 978-5-87623-318-9

© Введенский В.Ю.,
Лилеев А.С., 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Магнитные свойства и их измерение.....	7
1.1. Магнитные материалы и их параметры.....	7
1.2. Классификация методов магнитных измерений.....	15
1.3. Измерительные преобразователи магнитного поля	18
1.4. Образцы для магнитных испытаний	19
1.5. Основные виды намагничивающих устройств	26
2. Статические магнитные измерения	30
2.1. Индукционные методы	30
2.1.1. Физические основы индукционных методов	30
2.1.2. Индукционно-импульсный метод	34
2.1.3. Сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД)	40
2.1.4. Вибрационный магнитометр	45
2.1.5. Феррозондовый (ферроиндукционный) магнитометр	49
2.2. Магнитомеханические методы.....	51
2.2.1. Магнитометрический метод	51
2.2.2. Силометрический метод	55
2.2.3. Метод крутящих моментов	59
2.2.4. Кангилевверная магнитометрия.....	68
3. Динамические магнитные измерения	76
3.1. Особенности динамического режима намагничивания и перемагничивания	76
3.2. Метод амперметра-вольтметра.....	78
3.3. Осциллографический метод	80
3.4. Метод феррометра	81
3.5. Стробоскопический метод	83
3.6. Определение потерь на перемагничивание ваттметровым методом.....	84
3.7. Мостовой метод определения проницаемости	87
4. Резонансные методы	90
4.1. Ферромагнитный резонанс	91
4.2. Резонанс границ доменов.....	95
4.3. Влияние вихревых токов и магнитного последействия на магнитный спектр.....	96
4.4. Магнитострикционный резонанс	98
4.5. Размерный резонанс	99
4.6. Ядерный магнитный резонанс.....	99

5. Магнитооптические методы	105
5.1. Эффект Фарадея.....	105
5.2. Эффект Керра.....	107
6. Термомагнитный анализ	111
6.1. Определение температуры Кюри.....	111
6.2. Термомагнитный фазовый анализ.....	117
7. Изучение доменной структуры	123
7.1. Магнитопорошковый метод	123
7.2. Магнитооптические методы	127
7.3. Электронно-оптический метод.....	130
7.4. Магнитосиловая микроскопия	135
Библиографический список	141

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные измерения используются при исследованиях материалов разнообразными способами. Например, типичной задачей, возникающей при разработке нового материала, является исследование возможности его использования при изготовлении магнитного изделия или магнитной системы. Проводимое с такой целью исследовательское испытание включает в себя проверку соответствия магнитных свойств материала установленным требованиям и принятие решения о годности или негодности материала для выбранной области применения. Это роднит данный вид испытаний с сертификационным испытанием материала.

Другим способом использования магнитных измерений в исследованиях является изучение зависимостей магнитных свойств от параметра, характеризующего воздействие на материал. Приведем несколько примеров. Так, анализ зависимостей параметров частных петель гистерезиса от напряженности намагничивающего поля является стандартным способом изучения механизма перемагничивания ферромагнетиков. Изучение влияния температуры на намагниченность или восприимчивость позволяет проводить фазовый магнитный анализ, а также строить магнитные фазовые диаграммы. Экспериментальное определение влияния температуры обработки, степени пластической деформации, дозы излучения и т.п. позволяет выявлять протекание в материале различных фазовых и структурных превращений, которые зачастую не обнаруживаются прямыми структурными методами. Кинетику фазовых превращений исследуют, изучая временные зависимости физических свойств при разных температурах, и магнитные измерения часто незаменимы благодаря своей высокой чувствительности.

Приведенные выше примеры демонстрируют высокую ценность магнитных исследований в физическом материаловедении и физике твердого тела. Богатство получаемой информации о материале может быть раскрыто лишь при ясном понимании физических основ методов магнитных измерений и особенностях их применения в различных конкретных случаях. В связи с этим издание данного учебного пособия преследует цель представить обзор основных методов магнитных измерений, используемых в современном физическом материаловедении, с указанием сведений о физических принципах метода, схемах установок, используемых образцах, процедуре измерений

и примерах использования в исследованиях. Авторы надеются, что представленный материал поможет студентам лучше ориентироваться в научных публикациях, содержащих результаты магнитных измерений, а также использовать магнитные методы в собственной научно-исследовательской работе.

Данное пособие является продолжением пособия (Введенский В.Ю. и др., 2001), которое содержит лекционный материал по тепловым и электрическим измерениям для курса «Физические методы исследования».

Пособие предназначено в качестве основной учебной литературы при изучении соответствующего раздела ряда дисциплин: «Физические методы исследований» для студентов специальности 150702 «Физика металлов» и направления 010700 «Физика», дисциплины «Экспериментальные методы исследования и метрология» для студентов по специальности 210602 «Наноматериалы», а также «Сертификационные испытания специальных материалов» и «Методы магнитных испытаний» для студентов специальности 200503 «Стандартизация и сертификация». Пособие может быть также рекомендовано аспирантам и специалистам, желающим систематизировать свои знания по описанным магнитным методам исследования.

1. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ

1.1. Магнитные материалы и их параметры

Все вещества являются магнетиками – в том смысле, что при помещении в магнитное поле они изменяют это поле. Однако не все материалы называются магнитными. Согласно ГОСТ 19693–74 «Материалы магнитные. Термины и определения» *магнитный материал* – это материал, обладающий свойствами ферромагнетика или ферримагнетика. Такое определение удобно тем, что относит к магнитным материалам, которые на практике используются для создания или преобразования магнитного поля.

Магнитные материалы принято делить на две группы:

- *магнитомягкие материалы* – материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью $H \sim 8 \dots 800$ А/м;

- *магнитотвердые материалы* – материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью $H \sim 1000$ А/м и выше.

Такое деление позволяет не только различать материалы, имеющие разные области применения, но и отдельно описывать методы магнитных испытаний для двух групп материалов.

Напомним, каким образом осуществляется описание магнитного поля и отклика на него магнитного материала.

Применяют два вектора, характеризующих магнитное поле: *напряженность магнитного поля \mathbf{H}* и *магнитную индукцию \mathbf{B}* . При магнитных измерениях напряженность магнитного поля характеризует внешнее (приложенное к образцу) магнитное поле, создаваемое намагничивающим устройством. Магнитная индукция описывает суммарный вклад внешнего магнитного поля и внутреннего поля, обусловленного совместным вкладом микроскопических магнитных полей, созданных отдельными электронами и другими элементарными частицами. Количественно абсолютное значение магнитной индукции можно определить как максимальную силу, действующую в магнитном поле на единичный электрический заряд с единичной скоростью. Указанное определение опирается на выражение для силы Лоренца:

$$F = q [v B],$$

где q – электрический заряд; v – скорость.

В Международной системе единиц (СИ) напряженность и индукция магнитного поля имеют разную размерность. Напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр (А/м), а индукция – в теслах (Тл).

В вакууме физический смысл H и B совпадает, несмотря на различие размерностей:

$$B_{\text{в вакууме}} = \mu_0 H,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Величину $\mu_0 H$ называют *индукцией внешнего магнитного поля*.

Отклик материала на приложение магнитного поля описывают с помощью понятий магнитного момента и намагниченности.

Магнитный момент характеризует способность объектов создавать в окружающем пространстве магнитное поле и определяет поведение таких объектов во внешнем магнитном поле.

Источником магнитного поля является движение электрических зарядов (макро- и микроскопических токов), поэтому магнитный момент пропорционален силе электрического тока. Элементарным источником магнетизма считают замкнутый ток. Магнитный момент m замкнутого тока (контура с током)

$$m = iS,$$

где i – сила тока; S – площадь контура, охватываемого проводником (рис. 1.1).

Магнитный момент в СИ измеряется в $A \cdot m^2$. Направление магнитного момента параллельно нормали к плоскости контура и выбирается по правилу буравчика.

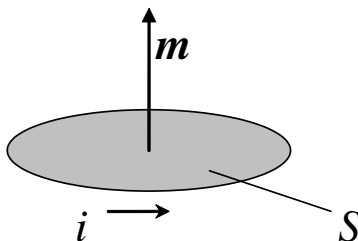


Рис. 1.1. Магнитный момент контура с током

Напряженность магнитного поля, создаваемого круговым током в точке, расположенной на оси на расстоянии r от центра круга,

$$H = \frac{m}{2\pi r^3}.$$

Для произвольной точки на расстоянии r от центра круга справедливо более общее выражение

$$H = \frac{3(mn)n - m}{4\pi r^3},$$

где $n = r / r$.

Приведенные формулы для напряженности магнитного поля кругового тока можно получить с помощью закона Био – Савара

$$dH = \frac{i}{4\pi r^3} [d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]$$

путем векторного сложения магнитных полей dH , созданных отдельными малыми (длиной $d\mathbf{l}$) участками контура с током.

В материале магнитный момент складывается из моментов частиц (электронов проводимости, молекул, атомов или ионов) и обусловлен, главным образом, движением электронов. Магнитным моментом ядер, состоящих из протонов и нейтронов, как правило, можно пренебречь из-за малости их магнитных моментов по сравнению с магнитным моментом электрона.

В ферро- и ферримагнетиках приложение магнитного поля приводит к магнитной поляризации тела – выстраиванию векторов магнитных моментов преимущественно вдоль поля и возникновению, как следствие, ненулевого суммарного магнитного момента. Такой отклик магнитного материала на приложение магнитного поля описывают, вводя понятие намагниченности. *Намагниченность* – это суммарный магнитный момент единицы объема:

$$I = \frac{\sum m}{V}.$$

Чтобы подчеркнуть, что магнитный момент отнесен к единице объема, величину I называют также объемной намагниченностью в отличие от *удельной намагниченности* σ , которая определяется как суммарный магнитный момент единицы массы,

$$\sigma = \frac{\sum m}{Q}$$

(Q – масса тела), и в отличие от *молярной намагниченности* I_m – суммарный магнитный момент 1 моля вещества.

Связь между разными видами намагниченности описывается выражением

$$I = \sigma \rho = I_m / V_m,$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; V_m – его молярный объем, м³/моль.

Возникновение намагниченности вызывает увеличение индукции по сравнению с индукцией внешнего магнитного поля $\mu_0 H$:

$$B = \mu_0 (I + H).$$

Слагаемое $\mu_0 I$ представляет собой *индукцию внутреннего магнитного поля*, обусловленного магнитной поляризацией (возникновением конечного значения намагниченности образца). Единицы измерения намагниченности (в СИ) – ампер на метр (А/м), т.е. совпадают с единицами измерения напряженности магнитного поля.

Для описания пространственного распределения вектора магнитной индукции и его изменения с течением времени полезно понятие магнитного потока. *Магнитный поток* – это поток вектора магнитной индукции B через контур (поверхность с площадью S):

$$\Phi = \int B dS.$$

В случае однородного магнитного поля ($B = \text{const}$) и перпендикулярности вектора магнитной индукции рассматриваемой площадке площадью S

$$\Phi = BS.$$

Единица измерения магнитного потока в СИ – вебер (Вб):

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Основной характеристикой магнитных материалов является *петля гистерезиса по индукции или по намагниченности* – зависимости $B(H)$ или $I(H)$, получаемые после прохождения определенного интервала значений H в прямом и обратном направлениях (рис. 1.2).

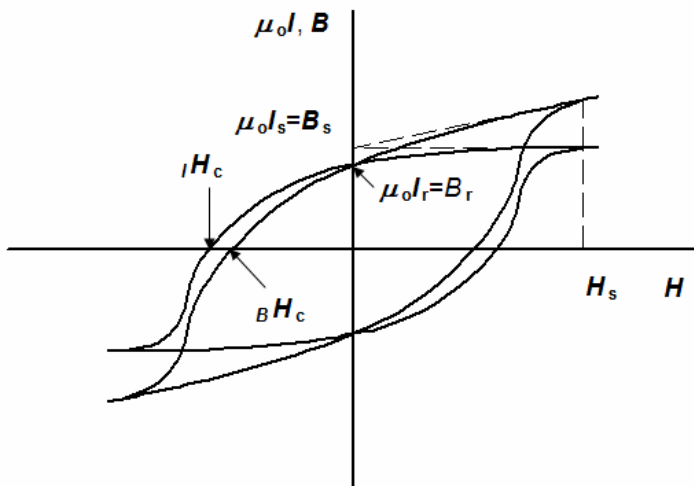


Рис. 1.2. Петли гистерезиса по индукции и по намагниченности

При изменении напряженности магнитного поля в пределах от $+H$ до $-H$ петля гистерезиса будет симметрична относительно начала координат (симметричная петля).

При измерениях обычно определяются следующие параметры петли гистерезиса:

- *остаточная намагниченность* I_r – намагниченность, сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до насыщения и уменьшения напряженности магнитного поля в нем до нуля;
- *остаточная индукция* B_r – индукция, сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до намагниченности насыщения и уменьшения напряженности магнитного поля в нем до нуля;
- *коэрцитивная сила по намагниченности* I_{Hc} – напряженность магнитного поля, необходимая для изменения намагниченности от остаточной намагниченности до нуля;
- *коэрцитивная сила по индукции* B_{Hc} – напряженность магнитного поля, необходимая для изменения магнитной индукции от остаточной индукции до нуля;
- *коэффициент прямоугольности* – отношение остаточной индукции B_r к максимальной индукции B_{max} на данной симметричной петле

гистерезиса
$$K_{\Pi} = \frac{B_r}{B_{max}}.$$

Непосредственно по петле гистерезиса или с помощью специальных методов измерений могут быть определены *магнитные потери* (потери на перемагничивание) – это электромагнитная энергия, превращающаяся в теплоту при перемагничивании магнитного материала магнитным полем. Различают две величины, характеризующие магнитные потери:

- *потери энергии в единице объема за один цикл перемагничивания* W , Дж/м³, равны площади петли гистерезиса по индукции:

$$W = \oint H dB ;$$

- *удельные потери на перемагничивание* P , Вт/кг, – потери энергии за единицу времени (потери мощности) в единице массы:

$$P = W f / \rho = \frac{f}{\rho} \oint H dB ,$$

где f – частота перемагничивания, Гц; ρ – плотность материала, кг/м³.

При измерениях следует различать предельную и частные петли гистерезиса. *Предельной* называется петля гистерезиса наибольших размеров. Все остальные петли гистерезиса называются *частными*. На рис. 1.3 приведено семейство симметричных частных петель гистерезиса по индукции.

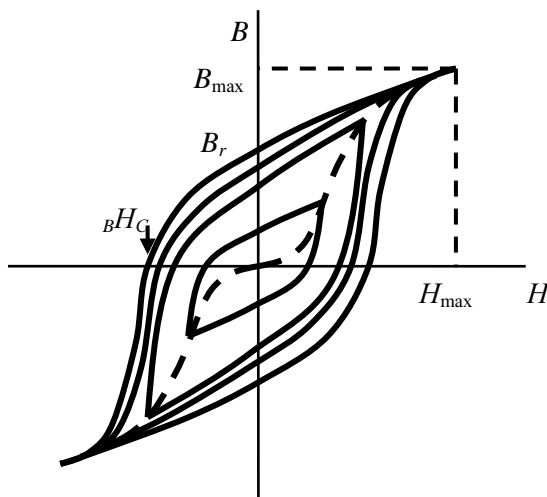


Рис. 1.3. Предельная и частные петли гистерезиса по индукции

Наряду с петлей гистерезиса, чаще всего проводят экспериментальное определение *кривой намагничивания* и ее параметров. *Кривой намагничивания* называют зависимость магнитной индукции (или намагниченности) от напряженности магнитного поля предварительно размагниченного материала, т.е. материала, находящегося в состоянии с нулевым значением магнитной индукции (намагниченности). На рис. 1.4 схематично изображена кривая намагничивания по индукции $B(H)$ и связанная с ней кривая зависимости магнитной проницаемости от поля $\mu(H)$.

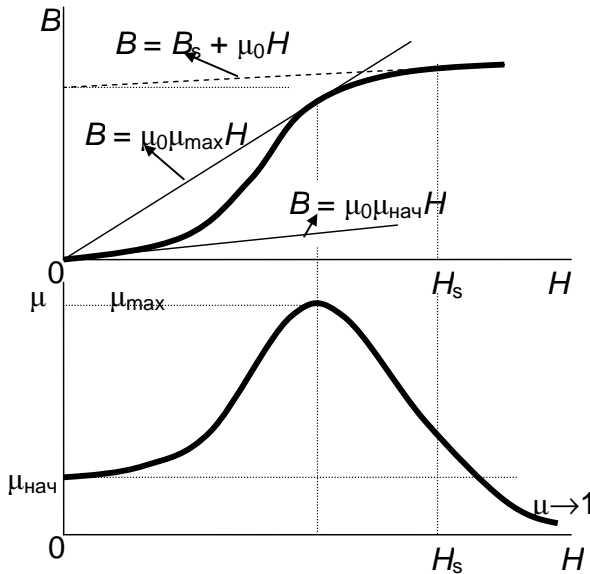


Рис. 1.4. Кривая намагничивания по индукции и полевая зависимость магнитной проницаемости

Как правило, экспериментально определяются следующие параметры кривой намагничивания:

- H_S – поле насыщения;
- I_S – намагниченность насыщения;
- $B_S = \mu_0 I_S$ – индукция насыщения;
- μ – магнитная проницаемость в заданном поле;
- $\mu_{\text{нач}}$ – начальная магнитная проницаемость;
- μ_{\max} – максимальная магнитная проницаемость.