

## Магнитные измерения

**Магнитные измерения**, измерения параметров магнитного поля и характеристик магнитного состояния вещества. К параметрам магнитного поля относятся магнитная индукция, напряжённость магнитного поля и магнитный поток, а к основным характеристикам магнитных свойств вещества – магнитный момент, намагниченность, коэрцитивная сила и остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость, магнитная проницаемость, константы магнитной анизотропии, потери на перемагничивание. Важнейшей характеристикой магнитного вещества является также его магнитная атомная структура.

### Измерение параметров магнитного поля

Магнитную индукцию и напряжённость магнитного поля в свободном от вещества пространстве измеряют устройствами, называемыми тесламетрами (гауссметрами) или магнитометрами. В качестве датчиков магнитного поля применяют датчики Холла, магниторезонансные датчики, СКВИД-датчики и феррозондовые датчики.

В датчиках Холла для измерения поля используется одноимённый эффект, заключающийся в отклонении под действием силы Лоренца потока электронов в материале, находящемся в магнитном поле. В результате в направлении, поперечном направлению тока, возникает холловская разность потенциалов, пропорциональная напряжённости поля, вызвавшей отклонение. Приборы на датчиках Холла наиболее распространены и позволяют измерять магнитное поле в широком диапазоне значений магнитной индукции: от  $10^{-7}$  до десятков Тл с чувствительностью до  $10^{-8}$  Тл и постоянной времени порядка  $10^{-4}$  с.

Действие магниторезонансных датчиков основано на эффекте Зеемана – расщеплении энергетических уровней атома в магнитном поле в результате взаимодействия ядерных магнитных моментов атомов с полем или электронных магнитных моментов атомов с полем. При проведении измерений система атомов поляризуется, т. е. создаётся разность населённости между расщеплёнными энергетическими уровнями. Действие электромагнитного поля с изменяющейся частотой индуцирует переходы с более населённых расщеплённых уровней на менее населённые. Это сопровождается поглощением энергии на частоте, прямо пропорциональной величине расщепляющего, т. е. измеряемого поля, называемой резонансной частотой. По измеренной резонансной частоте определяют величину поля, в которое помещён датчик. Тесламетры с магниторезонансными датчиками способны регистрировать поля с индукцией от  $10^{-5}$  до десятков тесла с разрешением до  $10^{-12}$  Тл и постоянной времени порядка  $10^{-6}$  с.

В СКВИД-датчиках используется эффект Джозефсона, заключающийся в туннелировании электронов через диэлектрик, помещённый между двумя сверхпроводниками (джозефсоновский переход). В СКВИД-датчике, содержащем джозефсоновские переходы, происходит взаимодействие в переходах между током, наводимым в датчике измеряемым полем, и током, пропускаемым через датчик, в результате чего последний получает вполне определённую зависимость от измеряемого поля. Фактически СКВИД-датчики позволяют регистрировать изменение магнитного потока. Тесламетры со СКВИД-датчиками позволяют измерять индукцию магнитного поля с разрешением до  $10^{-14}$  Тл, и на сегодняшний день являются наиболее чувствительными устройствами для измерения магнитного поля (постоянная времени порядка  $10^{-6}$  с). СКВИД-датчики могут использоваться для измерения полей до нескольких Тл, но максимальной чувствительности достигают в достаточно слабых полях – до  $10^{-3}$  Тл.

Магнитное поле может также измеряться индукционным методом, согласно которому в измерительной катушке, помещённой в изменяющееся поле, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея наводится эдс индукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока через катушку. Измеряется либо амплитуда эдс (при периодическом изменении поля), либо величина проинтегрированной эдс (при изменяющемся поле). Обе эти величины пропорциональны значению магнитной индукции или напряжённости измеряемого поля. Такой метод измерения поля также достаточно чувствителен (разрешение до  $10^{-10}$  Тл) и не имеет ограничения сверху по диапазону измеряемых полей, однако характеризуется низкой устойчивостью к помехам с высоким уровнем собственных шумов и поэтому в настоящее время широко не используется.

Одной из разновидностей индукционного метода является метод баллистического гальванометра, широко применявшийся ранее для измерения намагниченности, магнитного потока и величины индукции или напряжённости магнитного поля. В данном методе баллистический гальванометр служит устройством, интегрирующим возникающую в катушке эдс, а отклонение зеркала гальванометра пропорционально магнитному потоку через катушку (использовались и другие интегрирующие элементы, в частности фотоэлектрические и магнитоэлектрические). В настоящее время в устройствах для измерения потока (веберметрах или флюксметрах) применяется интегрирование с помощью электронных схем.

Феррозондовый датчик в простейшем случае представляет собой две катушки индуктивности, намотанные на сердечник из магнитомягкого материала в форме стержня. На одну из катушек (катушку возбуждения) подаётся синусоидальный переменный ток, а со второй (измерительная катушка) снимается сигнал. Поскольку зависимость магнитной проницаемости от поля носит нелинейный характер, сердечник представляет собой нелинейный элемент, и сигнал с измерительной катушки содержит высшие гармоники частоты возбуждающего сигнала. При помещении феррозонда в магнитное поле проницаемость сердечника изменяется, что

приводит к изменению амплитуд высших гармоник, по величине которых можно определить напряжённость поля (измеряются амплитуды чётных гармоник). Феррозондовые магнитометры характеризуются достаточно высоким разрешением – до  $10^{-10}$  Тл, а также быстроедействием (постоянная времени порядка  $10^{-3}$  с), но применяются для измерения небольших полей ( $10^{-7}$ – $10^{-4}$  Тл).

Ранее для измерения магнитных полей широко применялись магнитомеханические датчики, чувствительным элементом в которых служит подвижный постоянный магнит в виде магнитной стрелки или рамка с током (электродинамический метод), крепящиеся на подвесе. Величина индукции магнитного поля определялась либо по углу поворота чувствительного элемента относительно первоначального положения при внесении его в точку измерения (пассивные датчики), либо по частоте его колебаний в поле (активные датчики). Магнитомеханические датчики характеризуются высоким разрешением (до  $10^{-10}$  Тл), но низким быстроедействием (порядка 1 с), поэтому пригодны для измерения лишь постоянных или очень медленно изменяющихся магнитных полей.

### **Измерение магнитных характеристик вещества**

Для определения температурных и полевых зависимостей намагниченности (изотерм намагниченности), петель гистерезиса, а также магнитной проницаемости и восприимчивости вещества используются методы, которые можно разделить на две основные группы – индукционные и пондеромоторные. Индукционные методы, также как и в случае измерений индукции магнитного поля, основаны на законе электромагнитной индукции Фарадея, а пондеромоторные – на измерении силы взаимодействия образца с магнитным полем. Устройства, измеряющие намагниченность, магнитный момент, а также магнитные восприимчивость и проницаемость в статических и изменяющихся магнитных полях, принято называть магнитометрами, а устройства, измеряющие петлю гистерезиса магнитотвёрдых материалов – гистерезисграфами. К устройствам, использующим индукционный метод измерения, относятся индукционный, экстракционный, вибрационный и вращательный магнитометры, гистерезисграфы, а к устройствам, работа которых основана на пондеромоторных методах – различного рода магнитные весы (рычажные, маятниковые, крутильные и др.). Индукционный метод измерения применяется также для определения динамической магнитной восприимчивости (проницаемости).

Индукционный магнитометр представляет собой устройство, позволяющее измерять полевые и температурные зависимости намагниченности (магнитного момента) вещества. Образец в данном устройстве помещается в измерительный узел, состоящий из двух идентичных катушек (образец располагается в одной из катушек), включённых навстречу друг другу. Катушки помещаются в источник магнитного поля, изменение которого наводит в них сигнал, пропорциональный намагниченности образца (сигналы, пропорциональные полю, взаимно уничтожаются благодаря встречному включению катушек). Величина поля измеряется отдельной

катушкой. Измерения проводятся при стабилизированных значениях температуры в заданном интервале температур. В результате получаются изотермы намагниченности, по которым можно построить и температурные зависимости намагниченности в постоянном поле. Чувствительность индукционных магнитометров составляет порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  эрг/Гс. Устройства не позволяют проводить измерения намагниченности в постоянном поле, т. к. сигнал в измерительных катушках наводится изменяющимся полем. Индукционный магнитометр используется для проведения измерений в широком интервале полей – до 2 Тл в источниках поля на основе электромагнитов или постоянных магнитов и до десятков Тл в импульсных соленоидах.

В экстракционном магнитометре поток магнитного поля через измерительную катушку изменяется в результате механического извлечения из неё исследуемого намагниченного образца. Образец намагничивается внешним источником постоянного поля, в качестве которого используется электромагнит или сверхпроводящий соленоид. Чувствительность метода аналогична чувствительности рассмотренного выше индукционного магнитометра. Гораздо большей чувствительностью (до  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  эрг/Гс) характеризуется разновидность экстракционного магнитометра, в которой поле в измерительной катушке определяется СКВИД-датчиком. Экстракционные магнитометры также не позволяют проводить измерения, в которых образец находится в постоянном поле. Кроме того, существуют магнитометры, в которых СКВИД-датчик используется для определения пространственной картины поля, создаваемого исследуемым образцом.

Вибрационный магнитометр является наиболее распространённым устройством для измерения температурных и полевых зависимостей намагниченности (магнитного момента) материалов. Образец, намагниченный внешним источником поля (электромагнит, сверхпроводящий соленоид, постоянный магнит), приводится в вибрационном магнитометре в периодическое (вибрационное) движение, создавая вокруг себя переменное поле, фиксируемое измерительной катушкой, находящейся рядом с образцом. Сигнал с катушки выделяется селективным усилителем или фазовым детектором, что обеспечивает высокую чувствительность устройства – до  $10^{-7}$  эрг/Гс. Вибрационный магнитометр позволяет проводить измерения, при которых образец находится в постоянном поле.

Во вращательном магнитометре намагниченный внешним источником поля образец приводится во вращательное движение, создавая вокруг себя переменное электромагнитное поле, фиксируемое измерительной катушкой, расположенной рядом с образцом. Измерительный тракт вращательного магнитометра аналогичен используемому в вибрационном магнитометре, что обеспечивает устройству примерно такую же чувствительность. Измерения, также как и в вибрационном магнитометре, проводятся в постоянном магнитном поле. Если исследуемый образец представляет собой монокристалл, то по изменённому сигналу можно определить константы магнитной анизотропии. Обычно эти константы измеряют в устройствах,

называемых магнитными анизометрами. В анизометре исследуемый монокристалл помещается на шток, соединённый с датчиком, определяющим момент вращения, который действует на образец во внешнем магнитном поле, направленном в плоскости, содержащей ось лёгкого намагничивания образца. Вращая поле путём поворота источника, получают зависимости момента вращения от направления поля, по которым определяют константы магнитной анизотропии.

Гистерезисграф предназначен для измерения кривых намагничивания и размагничивания – зависимостей намагниченности (или магнитной индукции) от магнитного поля, петель магнитного гистерезиса магнитотвёрдых материалов в замкнутой магнитной цепи. Источником поля в установке служит электромагнит с медленно изменяющимся (квазистатическим) полем, в зазоре которого полюсами зажимается исследуемый образец с надетой на него измерительной катушкой. В ходе измерения одновременно записывается сигнал с измерительной катушки, который пропорционален намагниченности (или магнитной индукции), и сигнал, пропорциональный полю; данные выводятся в графическом представлении. При получении петли магнитного гистерезиса и кривой начального намагничивания используется размагниченный образец, а при получении кривой размагничивания – намагниченный образец.

Динамическая магнитная восприимчивость (проницаемость) измеряется индукционным методом по схеме, аналогичной индукционному магнитометру, описанному выше, но в данном случае источник поля в виде соленоида создаёт переменное электромагнитное поле малой интенсивности (до нескольких эрстед). Синхронное детектирование сигнала с измерительной катушки позволяет определить действительную и мнимую части восприимчивости. Температурные зависимости динамической магнитной восприимчивости используются для определения температур магнитных фазовых переходов, при которых динамическая восприимчивость имеет особенности. Для определения комплексной восприимчивости (проницаемости) и тангенса угла потерь материала используются также мостовые схемы переменного тока, в которых катушка с исследуемым образцом включается в одно из плеч моста.

Измерения в переменном поле с использованием индукционного метода применяют также для исследования характеристик магнитомягких материалов – определения потерь в образце (ваттметрический метод, при котором измеряется мощность, поглощаемая в катушке с образцом) и динамических петель гистерезиса. Последние снимаются с помощью феррографа, в котором возбуждающий сигнал подаётся в первичную катушку, создающую поле в замкнутом образце, а сигнал, пропорциональный намагниченности, снимается со вторичной обмотки, также находящейся на образце; петлю гистерезиса при этом можно наблюдать на осциллографе. Возможны измерения и на разомкнутом образце (стержне) в устройстве, называемом пермеаметром, содержащем раму из магнитомягкого материала, замыкающую магнитную цепь. Потери в магнитных материалах на высоких частотах определяют также калориметрическим методом, в котором выделяющаяся в исследуемом образце

при перемагничивании в переменном электромагнитном поле теплота измеряется в калориметре.

Основными пондеромоторными методами, позволяющими измерять магнитную восприимчивость в постоянном поле, являются разновидности метода рычажных магнитных весов – метод Фарадея и метод Гюи. В обоих методах измеряется сила, действующая на образец, помещённый в магнитное поле. В методе Фарадея в градиентное магнитное поле помещается образец малого размера (с постоянным градиентом на длине образца), так что сила, действующая на образец, пропорциональна восприимчивости и массе образца, а также величине магнитного поля и его градиента. В методе Гюи в источник поля помещается длинный образец, так что сила, действующая на него, прямо пропорциональна восприимчивости и массе образца, а также квадрату магнитного поля. Чувствительность методов Фарадея и Гюи по магнитной восприимчивости не хуже  $10^{-7}$ .

Использование магнитооптических методов, основанных на безынерционных магнитооптических эффектах (магнитооптическом эффекте Керра, эффекте Фарадея), позволяют визуально наблюдать доменную структуру тонких магнитных плёнок (с помощью магнитополярископов), измерять диаметр цилиндрических магнитных доменов, подвижность и коэрцитивность доменных стенок, намагниченность насыщения (с помощью магнитополяриметров), регистрировать кривые намагничивания и петли магнитного гистерезиса (с помощью магнитополярографов) и др.

### **Изучение магнитной атомной структуры**

Для определения магнитной структуры вещества используют методы магнитной нейтронографии и магнитной мёссбауэрографии, а также синхротронное излучение.

Метод нейтронографии основан на том, что нейтроны, с одной стороны, не имеют электрического заряда, а с другой – обладают магнитным моментом. Это позволяет им проходить через кристаллическую решётку вещества, слабо взаимодействуя с ионами решётки, но при этом интенсивно взаимодействовать с их магнитными моментами. В результате на нейтронограмме, представляющей собой аналог рентгенограммы, получаемой при исследовании кристаллической структуры с помощью дифракции рентгеновских лучей, проявляются т. н. магнитные рефлексy, связанные с рассеянием нейтронов на магнитной подрешётке, по которым можно восстановить пространственную магнитную структуру вещества и определить величину магнитных моментов ионов.

Синхротронное излучение рентгеновского диапазона характеризуется высокой интенсивностью и может вызывать резонансные переходы в электронной оболочке атома со спектром поглощения, позволяющим получить информацию о магнитном состоянии атома и магнитной структуре вещества. Аналогичную информацию даёт магнитная мёссбауэрография, основанная на изучении эффекта Мёссбауэра в магнитных материалах. В ряде случаев для уточнения магнитной атомной структуры используют ферро- и

антиферромагнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс.

Тишин Александр Метталинович, Спичкин Юрий Иванович

## **Библиография**

- Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. – 3-е изд. – Москва : Энергия, 1969.
- Чечерников В. И. Магнитные измерения : учебное пособие для университетов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Издательство Московского университета, 1969.
- Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев [и др.]. – Ленинград : Энергия, 1979.
- Антонов В. Г. Средства измерений магнитных параметров материалов / В. Г. Антонов, Л. М. Петров, А. П. Щелкин. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986.
- Neutron scattering from magnetic materials / ed. by T. Chatterji. – Amsterdam ; Boston : Elsevier, 2006.
- Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – 10-е изд., стер. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2007.
- Пастушенков А. Г. Измерение физических величин. Учебное пособие. Ч. 1. Метрология: виды, методы и средства измерений / А. Г. Пастушенков, Ю. Г. Пастушенков. – Тверь : Тверской государственный университет, 2014.