

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Л. В. КИРЕНСКИЙ, А. И. ДРОКИН,
Д. А. ЛАПТЕЙ

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ
МАГНИТНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС
ФЕРРОМАГНЕТИКОВ
И ФЕРРИТОВ

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ОТДЕЛ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР
НОВОСИБИРСК

1965

ПРЕДИСЛОВИЕ

Неоднозначное изменение магнитных параметров ферромагнетика при нагреве и охлаждении в постоянном магнитном поле называется температурным магнитным гистерезисом (ТМГ).

Из этого определения следует, что какой-либо магнитный параметр α по прошествии температурного цикла в постоянном магнитном поле, как правило, к исходному состоянию не возвращается и по завершении цикла

$$\oint (\alpha dT)_{H = \text{const}} \neq 0, \quad (1)$$

где T — температура.

В соответствии с вышеизложенным различают: температурный гистерезис намагниченности (ТГН)*, температурный гистерезис магнитострикции (ТГМ), температурный гистерезис гальваномагнитного эффекта (ТГГЭ), температурный гистерезис магнитной восприимчивости или проницаемости — соответственно (ТГ χ) и (ТГ μ); температурный гистерезис эффекта Холла (ТГЭХ) и т. д.

Помимо научного интереса исследование температурного магнитного гистерезиса вызывается также и практической необходимостью, поскольку в различного рода агрегатах, измерительной аппаратуре, в счетно-решающих и других устройствах используемые магнитные материалы часто находятся в условиях циклически меняющихся температур. Именно чисто практический интерес привел еще в 1759 г. Кантона [1] к выводу о том, что нагревание стального намагниченного стержня вызывает уменьшение его магнетизма, а последующее охлаждение его до исходной температуры восстанавливает магнетизм лишь частично. Из этого факта им был сделан вывод: потеря магнетизма при нагревании состоит из двух частей — из потери временной и окончательной. Повторные нагревания и охлаждения вновь приводили к потере и частичному восстановлению магнетизма (но во все уменьшающихся размерах), и, наконец, опыты фиксировали лишь временную потерю магнетизма при нагревании. В этом случае магнетизм, утерянный при нагревании, полностью восстанавливался при охлаждении и магнит обратимо изменял намагниченность между предельными температурами.

Как указывает Меськин [2], многократный нагрев и охлаждение остаточно намагниченных образцов использовались для «температурного остывания» постоянных магнитов.

Циклическое изменение температуры ферромагнетика использовалось для получения безгистерезисных кривых намагничивания. Этот метод по-

* В литературе часто под термином температурный магнитный гистерезис понимают именно температурный гистерезис намагниченности.

лучил название «метода температурной тряски» и подробно описан в книге Ашворта [3].

Неоднозначное изменение намагниченности при нагреве и охлаждении ферромагнетика в фиксированном магнитном поле может быть обусловлено двумя причинами: структурными превращениями в гетерогенных ферромагнитных материалах и необратимыми изменениями доменной структуры ферромагнетика.

В соответствии с этими причинами различают два вида температурно-магнитного гистерезиса. ТМГ первого вида, обусловленный различными фазовыми превращениями и ТМГ второго вида, присущий самому процессу технического намагничивания.

ТМГ первого вида проявляется, например, в том, что температура Кюри оказывается различной в зависимости от того, достигается ли она при нагревании сплава или при его охлаждении. Сплавы, обладающие такого рода ТМГ, носят название необратимых. ТМГ первого вида изучался Юингом [4], Кельвином [5] на железо-никелевых сплавах с содержанием никеля до 30%.

Точка Кюри, фиксируемая при нагревании в этих сплавах, оказывается несколько выше точки Кюри, фиксируемой при их охлаждении. ТМГ первого вида изучался на этих сплавах также Пешаром [6] и Келсаллом [7]. ТМГ первого вида проявляется и в иных явлениях, в частности, в температурном гистерезисе магнитной анизотропии, обнаруженном Киренским [8] на метеоритном железе состава 94% Fe; 5,5% Ni; 0,5% Co. ТМГ первого вида наблюдается также в кобальте, у которого при температуре 470°С происходит перестройка кристаллической решетки из гексагональной в кубическую гранцентрированную.

Исследованию ТМГ первого вида посвящено много работ, которые изложены в монографиях С. В. Вонсовского и Я. С. Шура [9], Р. Бозорта [10] и К. П. Белова [11].

В настоящей книге рассматривается только второй вид ТМГ, обусловленный необратимыми изменениями доменной структуры и, следовательно, самими процессами технического намагничивания. Поэтому под символом ТМГ в дальнейшем будет подразумеваться только второй вид температурного магнитного гистерезиса.

Если не считать двух попутно высказанных Видеманом [12] и Ашвортом [3] замечаний, то начало систематических исследований ТМГ было положено работами Я. С. Шура и В. И. Дрожжиной [13, 14]. В этих работах исследовался ТГН кремнистого железа (4% Si) по циклу А (нагрев — охлаждение) и по циклу Б (охлаждение — нагрев) в интервале температур $-195^{\circ}\text{C} \div 260^{\circ}\text{C}$, а также ТГН никеля по циклу А в интервале температур $-195^{\circ}\text{C} \div 360^{\circ}\text{C}$. В работе было дано качественное объяснение ТГН и сделан вывод о том, что ТГН в железе и никеле наблюдается в тех же полях, в которых процессы намагничивания осуществляются в основном путем необратимых смещений границ между областями самопроизвольной намагниченности — доменами.

Через год после этих исследований появилась работа Сноека [15], в которой приведены результаты опытов неоднозначного температурного хода начальной магнитной проницаемости никеля в слабых постоянных магнитных полях.

Более детальное изучение ТГН на образцах кремнистого железа (3,7% Si) и никеля в интервале от температуры кипящего азота до температур, лежащих выше точки Кюри, проведено Я. С. Шуром и Н. А. Барановой [16]. В этой работе показана зависимость температурного хода кривых намагниченности от температурного хода констант естественной кристаллографической магнитной анизотропии и магнитострикции, а также влияние предварительной термообработки образцов на температурный ход кривых намагниченности в слабых магнитных полях.

В работе А. И. Дрокина [17] установлено влияние размеров образца на величину ТГН никеля в цикле А и впервые исследован на никеле методом автоматической фотозаписи ТГН по циклу Б. В этой же работе впервые сделана попытка установить влияние механических деформаций образца на ход и величину ТГН.

В 1951 г. Я. С. Шур, Н. А. Баранова и В. А. Зайкова [18] исследовали ТГН в высококоэрцитивных сплавах с целью выяснения природы их магнитной структуры. Считалось, что высококоэрцитивные сплавы характерны однодоменностью кристаллитов и процессы намагничивания и перемагничивания в них осуществляются лишь путем вращения векторов I_s . В этом случае явление ТГН в них не должно проявляться, если ТГН обусловлен лишь необратимыми смещениями границ.

Наличие ТГН в сплаве альбико даже в высококоэрцитивном состоянии указывает на отсутствие однодоменности в кристаллитах. Очевидно, в кристаллитах этого сплава существуют комплексы небольшого числа доменов. Чтобы убедиться в этом, нужно было создать в исследуемом материале условия, исключающие либо процессы смещения границ, либо процессы вращения. Это позволило бы точно определить, какими процессами обусловлен ТГН.

Известно, что при растяжении материала с отрицательной магнито-стрикцией при некоторых условиях процессы смещения границ можно исключить. Действительно, в работе Н. А. Барановой и Я. С. Шура [19] установлено, что при растяжении никеля ТГН уменьшается и при больших нагрузках полностью исчезает.

Влияние упругих и пластических деформаций на величину ТГН подробно освещено в работах [20, 21]. Оказалось, что как растяжение, так и сжатие никеля, а также растяжение в пределах упругих деформаций пермаллоя-65, обладающего положительной магнито-стрикцией, ведет к уменьшению ТГН. Этот неожиданный на первый взгляд результат объясняется уменьшением градиента граничной энергии в ферромагнетике при наложении упругих деформаций.

А. И. Дрокин, Д. А. Лаптей и Р. П. Смолин [22, 23] изучили зависимость ТГН ферромагнетиков от магнитного состояния образца. Был исследован ТГН на никеле и пермаллоэ-65 на точках первоначальной кривой намагничивания и петли гистерезиса.

В 1960 г. Л. В. Киренский с сотрудниками [24] впервые исследовал ТГН на монокристаллах кремнистого железа по основным кристаллографическим направлениям и дал анализ результатов на основе динамики доменной структуры и температурного хода констант магнитной кристаллографической анизотропии и магнито-стрикции.

Целый ряд работ [25—29] посвящен выяснению связи ТГН с другими видами гистерезисных явлений (вращательный гистерезис, гистерезис гальваномагнитного эффекта, температурный гистерезис магнито-стрикции).

За последние годы находят все более широкое применение в технике новые ферромагнитные материалы — ферромагнитные полупроводники (ферриты). К изучению явления ТМГ на ферритах приступили лишь в самое последнее время.

В работе Д. Д. Мишина, Н. Т. Пластуна и Э. Э. Адамовича [30] обнаружен неоднозначный ход магнитной проницаемости при циклическом изменении температуры даже в отсутствие магнитного поля в никель-цинковых ферритах. В работе Н. Н. Сироты и Э. З. Кацнельсона [31] изучена температурная зависимость магнитной проницаемости в сложных никель-магний-цинковых ферритах. В работе Д. А. Лаптея и А. И. Дрокина [32] изучен ТГН никель-цинковых и марганец-цинковых ферритов. На различных поликристаллических моноферритах ТМГ изучен в работах Р. П. Смолина и др. [33—36]. Из зарубежных авторов известны работы [37, 38] по изучению ТМГ на естественных ферритах.

Температурный магнитный гистерезис в ферромагнетиках и ферритах — чрезвычайно сложное явление. Оно зависит от динамики доменной структуры, а последняя — от многих факторов. При изменении температуры часто происходит перестройка доменной структуры, которая может быть необратимой. Подобная необратимость обнаружена Я. С. Шуром [39] при помощи порошковых фигур на сплаве $MnVi$. Кристаллы этого сплава при комнатной температуре однодоменны, но после охлаждения до температуры жидкого азота и последующего нагрева до комнатной температуры его структура становится многодоменной.

Систематическое изучение ТМГ ферромагнетиков и ферритов дает возможность глубже разобраться в физических процессах, происходящих при техническом намагничивании ферромагнитных материалов.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
1. Об оценке температурного гистерезиса намагниченности	7
2. Физическая природа температурного магнитного гистерезиса	10
3. Методика исследований температурного гистерезиса намагниченности	18
4. Влияние способа размагничивания образца на температурную зависимость намагниченности никеля в слабых магнитных полях	27
5. Температурный гистерезис намагниченности кремнистого железа	32
6. Температурный гистерезис намагниченности никеля	47
7. Температурный гистерезис намагниченности сплава пермаллой-65	59
8. Температурный гистерезис намагниченности в высококоэрцитивных сплавах	61
9. Влияние упругих и пластических деформаций на температурный гистерезис намагниченности ферромагнетиков	64
10. Температурный гистерезис магнитострикции никеля	78
11. О связи температурного гистерезиса намагниченности с температурным гистерезисом магнитострикции	84
12. Температурный гистерезис гальваномагнитного эффекта	91
13. Температурный гистерезис намагниченности элинвара	93
14. Температурный гистерезис намагниченности в ферритах	98
15. Температурный гистерезис магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости ферритов	126
16. Температурный гистерезис доменной структуры ферромагнетиков	136
17. Температурный гистерезис намагниченности и доменной структуры в феррите-гранате тербия при переходе через точку компенсации	151
18. Заключение	155
Литература	156