

Л. В. КИРЕНСКИЙ и А. Я. ВЛАСОВ

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС МАГНИТОСТРИКЦИИ

## Введение

Известно, что значение намагниченности ферромагнетика в слабых магнитных полях существенно зависит как от температурной предистории исследуемого образца, так и от момента включения магнитного поля.

При заданной величине поля неоднозначность величины намагниченности при одних и тех же температурах обусловлена двумя причинами:

- 1) температурным гистерезисом структурных превращений кристаллической решетки ферромагнетика и
- 2) температурным магнитным гистерезисом, который свойственен самому процессу намагничивания.

Что касается температурного гистерезиса структурных превращений кристаллической решетки, то они возможны лишь в ферромагнитных сплавах из нескольких компонентов. Такие сплавы носят общее название необратимых ферромагнитных сплавов. К числу таких сплавов относятся железо-никелевые сплавы с содержанием никеля до 30%. Пешар [1] показал, что эти сплавы обнаруживают температурный гистерезис магнитного превращения. В такого типа сплавах возможны и другие температурные гистерезисные явления, в частности температурный гистерезис магнитной анизотропии, что было отмечено одним из авторов [2], проводившим исследования на сплаве состава 94% Fe, 5,5% Ni и 0,5% Co.

Однако в чистых ферромагнитных материалах такого рода превращений быть не может, и температурные гистерезисные явления целиком определяются в них второй причиной, т. е. температурным магнитным гистерезисом.

Ашворт [3] в своей книге указывает, что температурные кривые намагниченности при слабых магнитных полях в сильной мере зависят от направления изменения температуры (охлаждение или нагревание), т. е. носят явно гистерезисный характер.

Подробное изучение явления температурного гистерезиса намагничивания впервые было произведено Я. С. Шуром и В. И. Дрожжиной [4]. Они исследовали это явление на никеле и кремнистом железе (~4% Si). Из полученных ими данных следует, что все необратимые процессы технического намагничивания заканчиваются в слабых полях порядка 8—9 Ое и что температурный магнитный гистерезис связан в основном с процессом необратимых смещений границ между доменами.

Современная теория технической кривой намагничивания дает возможность понять качественно общие черты процессов, лежащих в основе явления температурного магнитного гистерезиса. При изменении температуры ферромагнетика условия равновесия между доменами при заданном поле могут нарушаться вследствие изменения величины спонтанной намагниченности  $J_s(T)$ , изменения величины константы магнитной анизотропии  $K(T)$ , магнитострикции  $\lambda_s(T)$  и т. п. Перераспределение доменов будет, очевидно, приводить к изменению величины намагниченности при постоянном поле.

Естественно предполагать, что явление температурного гистерезиса имеет место не только для температурных кривых намагниченности, но и для температурных кривых четных эффектов, в частности магнитострикции. Однако температурный гистерезис четных эффектов по своему характеру будет отличаться от температурного гистерезиса намагниченности. Это объясняется тем, что гистерезисные явления намагниченности вызываются как продольной, так и поперечной инверсией, тогда как магнитострикционные эффекты с продольной инверсией не связаны, и потому температурный магнитострикционный гистерезис будет вызван только поперечной инверсией в ферромагнетике.

Исследования температурного гистерезиса магнитострикции до сих пор не производились, поэтому разрешение этого вопроса представляет несомненно большой интерес.

### Экспериментальная установка

Изучение явления температурного гистерезиса магнитострикции можно провести при наличии установки, позволяющей воспроизводить непосредственный ход кривой температурной зависимости магнитострикции в широком интервале температур.

В литературе не встречается никаких указаний на такую методику изучения температурного хода магнитострикции. Этот пробел, повидимому, связан с большими трудностями в воспроизведении кривой  $\lambda_s(T)$  вследствие наличия теплового расширения образца, которое, будучи во много раз больше магнитострикционного эффекта, перекрывает его и не дает возможности получить достаточно надежные результаты.

В настоящей работе сделана попытка разделить тепловой и магнитострикционный эффекты путем компенсации теплового расширения образца при помощи специально подобранного компенсирующего стержня.

Схема прибора, работающего по этому принципу, представлена на рис. 1.

Основой прибора является то же устройство, которое применялось одним из авторов для измерения магнитострикции по методу изотерм [5].

Рядом с никелевым образцом 1 устанавливается компенсационный стержень 2, верхний конец которого вплавлен в основание кварцевого стержня 3, а нижний — покоится в керне кварцевой опоры 4. Оба передаточных стержня проходят через отверстия в направляющих втулках 5 и 6.

Рама 7 с осью 8 и зеркальцем 9 укреплена на верхнем конце того кварцевого стержня, который соединен с компенсационным стержнем.

Если длина компенсационного стержня подобрана так, что при нагревании он изменяет свою длину так же, как образец, то световой «зайчик» не будет перемещаться по щели фотокамеры, так как рама прибора с осью и пружинящая проволока 10 испытывают одинаковые перемещения.

При включении магнитного поля и одновременном изменении температуры никелевый образец будет испытывать вместе с температурным также и магнитострикционное изменение длины, которое

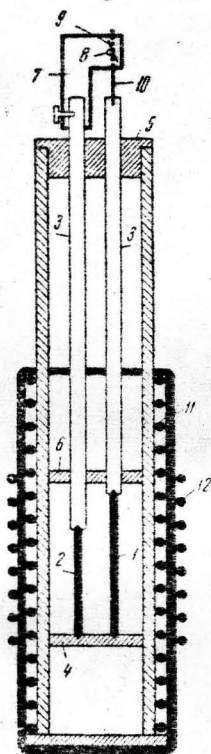


Рис. 1. Схема прибора для измерения магнитострикции по методу компенсации теплового расширения образца: 1 — образец, 2 — компенсационный стержень, 3 — кварцевые стержни, 4 — кварцевая опора, 5 и 6 — направляющие втулки, 7 — рама, 8 — ось, 9 — зеркальце, 10 — пружинящая проволока, 11 — электротопечка, 12 — компенсирующая катушка

вызывает отклонение «зайчика». Такова идея устройства прибора.

Возможность конструкции и надежной работы такого устройства может быть осуществлена при соблюдении целого ряда условий:

1) компенсационный стержень должен быть изготовлен из неферромагнитного материала;

2) коэффициент линейного расширения этого материала не должен значительно отличаться от коэффициента линейного расширения исследуемого образца;

3) температурное изменение длины стержней должно носить линейный характер и по возможности во всем исследуемом интервале температур, чтобы иметь возможность записать магнитострикционное изменение в один прием;

4) прогревание компенсатора и образца должно происходить одновременно, иначе будет иметь место наличие петель при записи эффекта.

Выполнение этих условий создаст большие трудности в выборе материала компенсатора и осуществлении конструкции прибора.

После целого ряда проб мы выяснили, что наиболее подходящим для изготовления компенсационного стержня материалом является бронза (Cu 85%, Sn 8%, Zn 6,5%, Pb 0,5%).

Произведенными расчетами мы определили длину компенсатора в 15,353 см. Однако эти расчеты не учитывали всей картины тепловых процессов, происходящих при нагревании образца и компенсатора. В частности, нами не учитывалось тепловое расширение деталей самого прибора, а также небольшая разница в коэффициентах теплопроводности (у никеля —  $50 \text{ ккал м}^{-1} \text{ час}^{-1}$ , у бронзы —  $55 \text{ ккал м}^{-1} \text{ час}^{-1}$ ). Поэтому получить полную компенсацию невозможно. Задача заключается в том, чтобы свести до минимума эффект теплового расширения.

Путем осторожного стачивания конца компенсатора мы подобрали такую его длину, при которой эффект теплового расширения в интервале температур —  $0 \div 300^\circ \text{C}$  сводился к отклонению «зайчика» на 3,5 см, а общий эффект магнитострикции и теплового расширения выражался в отклонении в 10,75 см. Таким образом, на долю теплового расширения приходилось около 30% общего отклонения «зайчика», что при трудности выполнения подобного эксперимента надо считать вполне удовлетворительным.

Следует отметить, что вследствие несколько большей теплопроводности компенсационный стержень прогревался немного быстрее, чем образец, поэтому его сечение пришлось подбирать также опытным путем. Кроме того, компенсатор пришлось покрыть слоем жидкого стекла.

### Порядок фоторегистрации кривой $\lambda_s(T)$ и полученные результаты

Для контроля результатов исследования температурной зависимости магнитострикции, полученных на установке, работающей по методу фиксирования магнитострикционных изотерм, мы сначала сняли ход кривой  $\lambda_s(T)$  в интервале температур  $-183 \div +370^\circ \text{C}$ , а затем уже произвели исследование температурного гистерезиса магнитострикции.

Фотозапись температурной зависимости магнитострикции насыщения никеля производилась следующим образом.

При исходной температуре, когда образец и компенсатор не подвергались воздействию поля и тепла, полным оборотом барабана фотокамеры на фотопленке фиксировался «нуль». Затем путем медленного увеличения поля до максимального значения  $H = 4300 \text{ Ое}$ , и отклонение «зайчика», соответствующее  $\lambda_s$ , в целях контроля фиксировалось на фотопленке.



После этого включалась печь и записывалась кривая компенсации теплового расширения образца «без поля». При этом производились засечки температурных ординат через каждые  $25^{\circ}\text{C}$ . Этот цикл давал возможность попутно размагнитить образец путем нагревания его до температуры выше точки Кюри с последующим медленным охлаждением до исходной температуры.

Далее снова включалось максимальное поле, что приводило «зайчик» к отклонению, но, так как в дальнейшем он выпел бы за пределы фотокамеры, его приходилось при включенном поле устанавливать на «нуль». Затем включалась печь и производилась запись кривой «с полем», фиксирующей одновременно магнитострикционный и тепловой эффекты. При этом значение температуры фиксировалось также через  $25^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2 (см. вклейку IV, стр. 676) представлена магнитограмма температурной зависимости магнитострикции насыщения никеля в интервале температур  $0 \div 300^{\circ}\text{C}$ , снятая методом компенсации теплового расширения образца. Таким же методом были сняты магнитограммы для интервалов температур  $-183 \div 0^{\circ}\text{C}$  и  $300 \div 370^{\circ}\text{C}$ .

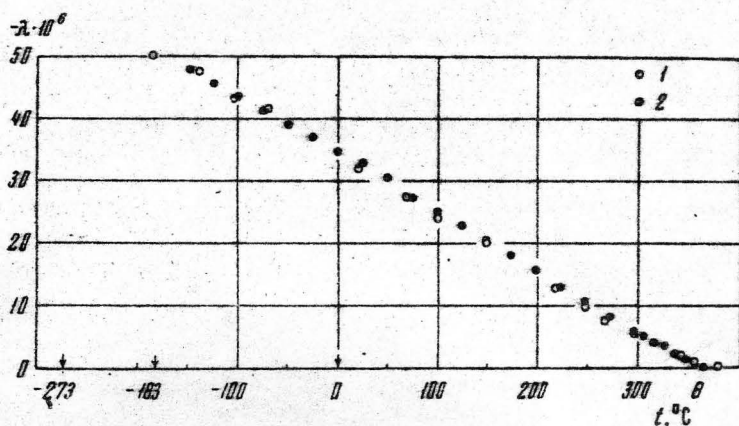


Рис. 3. Температурная зависимость магнитострикции насыщения никеля, снятая: 1 — по методу изотерм, 2 — по методу компенсации теплового расширения образца

Таблица 1

Значения магнитострикции насыщения никеля при различных температурах, полученные по методу компенсации теплового расширения образца

$t, ^{\circ}\text{C}$	$-\lambda_s \cdot 10^{-6}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$-\lambda_s \cdot 10^{-6}$
370	9,00	125	23,01
360	0,60	100	25,27 (24,26)
350	1,41	75	27,55
340	2,09	50	30,76
330	3,48	25	33,08
320	4,05	0	34,89
310	5,09	— 25	37,13
300	5,71 (5,66)	— 50	39,28
275	8,21	— 75	41,32
250	10,61 (9,85)	— 100	43,55
225	13,06	— 125	45,42
200	16,00 (15,83)	— 150	47,65
175	18,28	— 183	50,16 (49,91)
150	20,75 (20,24)		

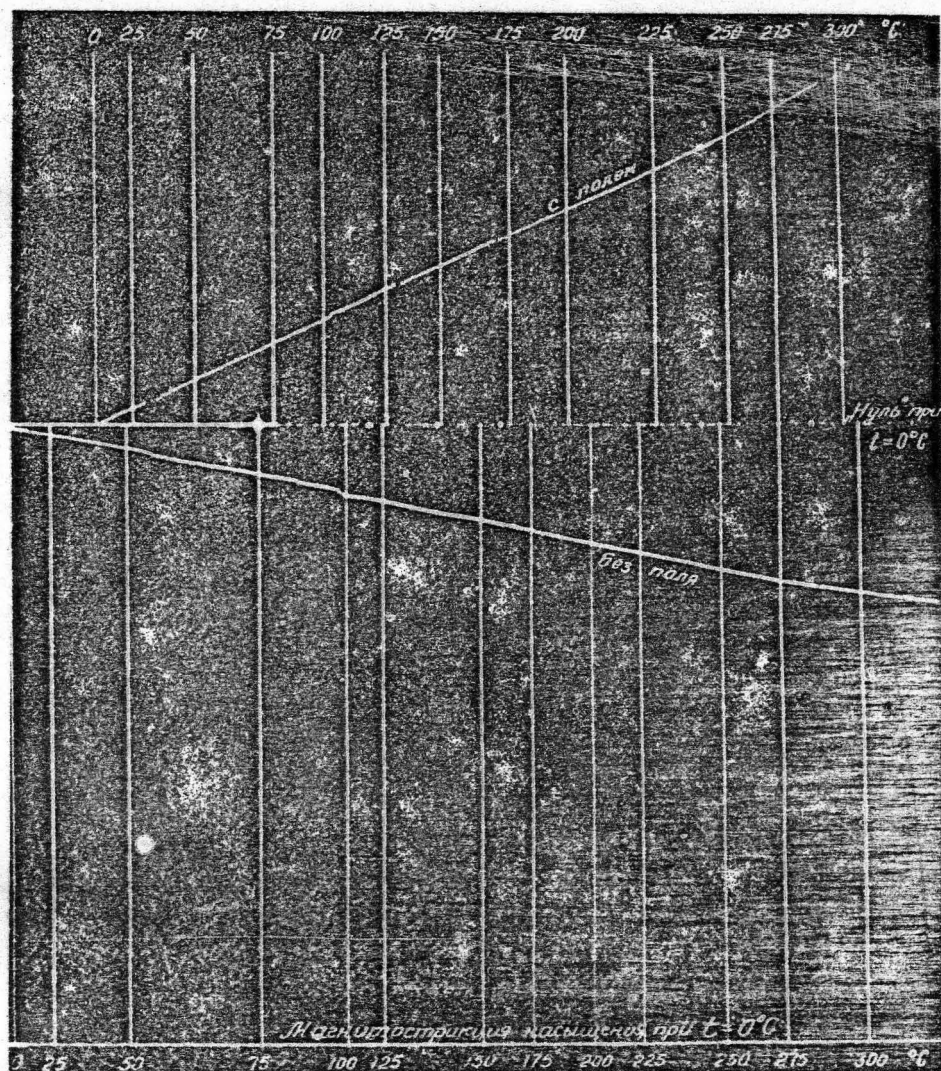


Рис. 2. Магнитограмма температурной зависимости магнитострикции никеля в интервале температур  $0 \div 300^\circ \text{C}$ , снятая методом компенсации теплового расширения образца

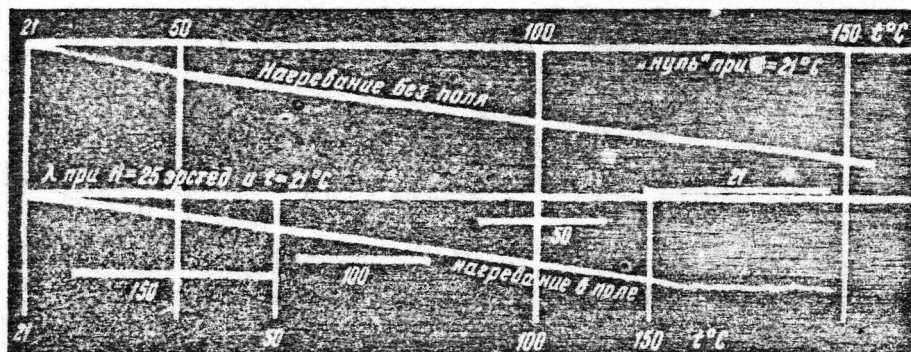


Рис. 4. Магнитограмма температурного гистерезиса магнитострикции никеля при  $H = 25 \text{ Ое}$  в интервале температур  $21 \div 150^\circ \text{C}$

Подсчет величины изменения магнитострикции с повышением температуры производился путем сложения ординат для данной температуры, соответствующих кривой «без поля» и кривой «с полем».

Полученные результаты сведены в табл. 1, где для сравнения в скобках даны значения  $\lambda_s$  для некоторых температур, полученные по методу изотерм.

Сравнение результатов, полученных по методу изотерм и по методу компенсации теплового расширения образца, для всего интервала температур изображено графически на рис. 3, из которого видно, что данные последнего метода находятся в хорошем согласии с данными метода изотерм. Интересно отметить, что в области точки Кюри согласно данным последнего метода наблюдается более прямолинейный ход кривой  $\lambda_s(T)$ .

Таким образом, контрольное исследование хода кривой  $\lambda_s(T)$  на установке, работающей по методу компенсации теплового расширения образца, дает результаты, подтверждающие теоретическое соотношение Акулова [6]  $\lambda_{sT} = \lambda_{s0} \left(1 - \frac{T}{\theta}\right)$ , но, в отличие от результатов, полученных по методу фиксации магнитострикционных изотерм, линейный ход кривой  $\lambda_s(T)$  имеет место во всем интервале температур от  $-183^\circ\text{C}$  и до точки Кюри.

#### Магнитограммы фотозаписи температурного гистерезиса магнитострикции и обсуждение полученных результатов

При исследовании температурного гистерезиса магнитострикции проводились три цикла изменения температуры: цикл I — образец медленно нагревался от комнатной температуры до  $+150^\circ\text{C}$  и затем медленно охлаждался до исходной температуры; цикл II — нагревание образца от комнатной температуры производилось до  $+250^\circ\text{C}$  с последующим охлаждением до той же исходной температуры; III цикл — охватывал интервал температур от комнатной до  $+400^\circ\text{C}$ .

Во всех указанных циклах производилась запись изменения магнитострикции как в процессе нагревания образца, так и в процессе его охлаждения.

Величина напряженности магнитного поля оставалась неизменной во всех циклах и была равна 25 Ое.

Такой порядок исследования позволяет выявить наличие температурного гистерезиса магнитострикции и его своеобразный ход в различных интервалах температур.

Следует заметить, что при проведении этой части работы не ставилась задача подробного изучения явления, а лишь задача открытия наличия явления и выяснения основных его черт.

Фотозапись температурного гистерезиса магнитострикции производилась так же, как запись кривой  $\lambda_s(T)$ , т. е. сначала фиксировался «нуль», затем кривые «нагревание без поля» и «нагревание в поле».

Изменение температуры образца и компенсационного стержня фиксировалось серией ординат через каждые  $50^\circ\text{C}$ .

Величина магнитострикции при комнатной температуре и напряженности поля в 25 Ое записывалась на фотопленку при полном обороте барабана фотокамеры.

В заключение процесса съемки производилась запись последней кривой — «охлаждение в поле». Порядок записи этой кривой несколько отличен от порядка записи предыдущих кривых. Так как процесс охлаждения образца происходит значительно медленнее, чем процесс нагревания, то времени непрерывного оборота барабана фотокамеры недостаточно для непрерывной фиксации кривой «охлаждение в поле». Поэтому для записи этой кривой приходилось работать по методу прерывистого вращения барабана фотокамеры. Когда температура образца при охлаждении



достигала значений, зафиксированных на кривой «нагревание в поле», открывалась щель фотокамеры и барабан при помощи мотора поворачивался на некоторую часть оборота. В это время «зайчик» фиксировал на фотопленке часть кривой «охлаждение в поле», соответствующую данному значению температуры.

Поэтому кривая «охлаждение в поле» изображена не в виде непрерывной магнитограммы, а в виде отдельных горизонтальных прочерков. Кроме того, так как камера не имела обратного хода, эта прерывистая ступенчатая кривая расположена на магнитограмме в обратном порядке.

Результаты измерений гистерезиса магнитоотрикции в интервале температур  $21 \div 150^\circ \text{C}$  представлены в виде магнитограммы на рис. 4 (см. вклейку IV, стр. 676); при рассмотрении которого станет совершенно ясен порядок записи всех перечисленных кривых.

Для определения наличия эффекта температурного гистерезиса магнитоотрикции, а также величины и хода его изменения необходимо расшифровать эти магнитограммы. Истинные значения хода кривой «нагревание в поле», соответствующие определенным значениям температуры, мы получим путем вычитания из ее ординат кривой «нагревание без поля», представляющей нескомпенсированный остаток теплового расширения образца. Аналогичным образом получаем и точки кривой «охлаждение в поле».

Сравнивая полученные кривые «нагревание в поле» и «охлаждение в поле», можно судить о наличии температурного гистерезиса магнитоотрикции и о его величине. Результаты обработки магнитограмм сведены в общую итоговую табл. 2.

Таблица 2

Температурный гистерезис магнитоотрикции никеля в интервале температур  $21 \div 400^\circ \text{C}$  при  $H = 25 \text{ Oe}$

$t, ^\circ\text{C}$	$-\lambda \cdot 10^4$		Гистерезис $-\lambda \cdot 10^4$
	нагревание	охлаждение	
Цикл I			
21	7,35	6,80	0,55
50	7,06	6,72	0,34
100	6,68	6,61	0,07
150	5,79	5,79	0,00
Цикл II			
21	7,35	5,71	1,64
50	7,06	5,98	1,08
100	6,68	5,85	0,83
150	5,89	4,41	1,48
200	4,50	3,13	1,37
250	2,75	2,75	0,00
Цикл III			
21	7,35	4,19	3,16
50	7,06	3,68	3,38
100	6,68	4,46	2,22
150	5,89	5,17	0,72
200	4,50	3,67	0,83
250	2,87	2,45	0,42
300	1,33	1,09	0,24
350	0,00	0,00	0,00
400	0,00	0,00	0,00

На основании данных табл. 2 на рис. 5 приведены кривые температурной зависимости магнитострикции для циклов I, II и III.

Верхняя кривая — «нагревание в поле» — представляет собой общую для всех циклов нисходящую ветвь, характеризующую изменение магни-

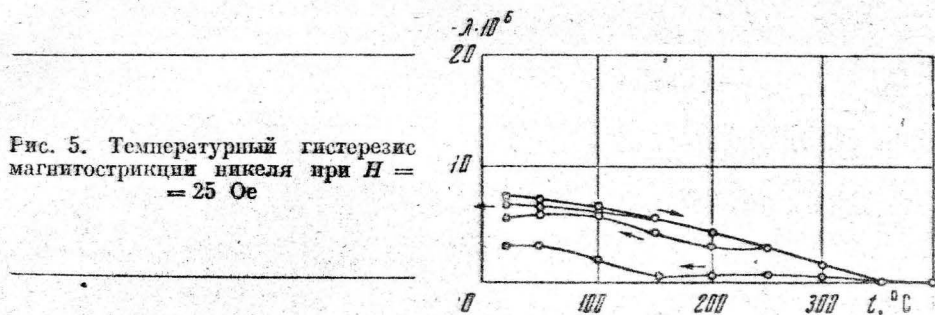


Рис. 5. Температурный гистерезис магнитострикции никеля при  $H = 25$  Ое

тострикции при повышении температуры. Три кривые, расположенные ниже, представляют собой восходящие ветви магнитострикционных кривых, соответствующих стадиям охлаждения образца от  $+150^\circ$ ,  $+250^\circ$  и  $+400^\circ$  С до комнатной температуры ( $+21^\circ$  С).

Красноярский гос. педагогический институт

#### Цитированная литература

1. Paschard, Rev. Met., 22, 490, 581, 663 (1925).
2. Киренский Л. В., ДАН СССР, 74, 2, 192 (1949).
3. Aschwort, Ferromagnetism.— London, 1938.
4. Шур Я. С. и Дрожжина В. И., ДАН СССР, 56, 37 (1947).
5. Власов А. Я., Изв. АН СССР, Серия физич., 16, 6, 718 (1953).
6. Акулов Н. С., Ферромагнетизм.— ОНТИ, М.— Л., 1939.