

Л. В. КИРЕНСКИЙ, А. Я. ВЛАСОВ, Н. И. ВТЮРИН, А. И. ДРОКИН, В. Ф. ИВЛЕВ
и Р. И. ТУКАЛОВ

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ И ВРАЩАТЕЛЬНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Как известно, гистерезисные явления в ферромагнетиках заключаются в неоднозначности их магнитных характеристик при определенных значениях напряженности внешнего магнитного поля, упругих напряжений, углов между вектором поля и кристаллографическими осями, а также температуры. Такую неоднозначность принято называть гистерезисом соответствующего магнитного параметра. В соответствии с этим различают:

- 1) обычные гистерезисные явления, возникающие при циклическом изменении напряженности намагничивающего поля: магнитные величины оказываются зависящими от магнитной «предыстории» образца;
- 2) магнитоупругие гистерезисные явления, возникающие при циклическом изменении упругих напряжений: магнитные величины оказываются зависящими от «предыстории» деформации образца;
- 3) температурные гистерезисные явления, возникающие при циклическом изменении температуры: магнитные величины оказываются зависящими от температурной «предыстории» образца;
- 4) вращательные гистерезисные явления, возникающие при циклическом изменении направления вектора поля в отношении кристаллографических осей в прямом и обратном направлениях, например при вращении поля относительно образца по и против часовой стрелки.

Исследованию температурного магнитного гистерезиса (ТМГ) намагнченности посвящено сравнительно немного работ, в основном выполненных Шуром и его сотрудниками [1—3]. Что же касается температурного гистерезиса других магнитных свойств, то имеются лишь работы Киренского и Власова [4], указавших на наличие температурного гистерезиса магнитострикции (ТГМ) и Киренского и Ильева [5] о температурном гистерезисе гальваномагнитного эффекта (ТГГЭ). Во вращающихся магнитных полях исследовались лишь потери на гистерезис, другие же гистерезисные явления во вращающихся полях вообще не наблюдались.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование температурного гистерезиса намагнченности по циклу Б (охлаждение — нагрев), температурного гистерезиса магнитострикции и гальваномагнитного эффекта по циклу А (нагрев — охлаждение). Обнаружено и исследовано явление вращательного гистерезиса магнитострикции параллельно с исследованием потерь во вращающихся магнитных полях.

Образцы. Измерения

Температурный магнитный гистерезис по циклу Б исследовался на образцах никеля с различными размагничивающими факторами. Форма образцов — цилиндрическая. Состав — 99,98 % чистого никеля. Образец № 1 с большим размагничивающим фактором, имел длину 100 мм и ϕ 2,12 мм; образец № 2 с малым размагничивающим фактором — длину 100 мм и ϕ 1,05 мм. Для снятия внутренних напряжений образцы подвергались длительному высокотемпературному отжигу (1100°) с последующим медленным охлаждением в магнитной защите. Измерения производились

на вертикальном астатическом магнитометре, заключенном в магнитную защиту. Вертикальные составляющие магнитного поля Земли и других посторонних полей компенсировались полями однослоинных компенсационных катушек магнитометра.

ТГМ исследовался на проволочном образце из электролитического никеля длиной 20,99 см и ф 2 мм. Образец был подвергнут длительному высокотемпературному отжигу. Перед началом каждого измерения образец нагревался до температуры выше точки Кюри и охлаждался в магнитной защите. Измерение магнитострикции производилось на установке, работающей по принципу компенсации теплового расширения образца. Схема прибора и примеры фотографирования магнитограмм температурного гистерезиса магнитострикции приведены в вышеуказанной работе [4].

Измерения проведены в четырех сериях изменений температуры: серия I — исходная температура -183° и различные конечные: 400, 250, 150, 10° ; серия II — исходная температура 10° и конечные: 400, 250, 150 $^{\circ}$; серия III — нагревание от 150 до 400 и 250 $^{\circ}$; серия IV — нагревание от 250 до 400 $^{\circ}$. Все серийные кривые магнитострикции зафиксированы в полях в 1,5, 8, 10, 12,5, 15, 20, 25, 37,5, 50, 75 и 100 Ое.

Изменение температуры образца и компенсационного стержня фиксировалось серией ординат через каждые 50° .

ТГГЭ исследовался также на никелевом образце — проволоке с сопротивлением $25,9\Omega$, но в менее широком интервале температур $-18-400^{\circ}$, в полях в 9, 18, 27, 36, 45, 54, 64, 78, 90, 115, 136, 180 и 360 Ое.

Измерения проведены также по циклу А, при различных исходных температурах ($18, 25, 50, 75, 100, 125, 150^{\circ}$) и различных точках возврата ($130, 220, 260$ и 380°).

Для исключения влияния температурного изменения сопротивления образца во второе плечо мостовой схемы включался компенсатор из того же материала, что и образец, но имеющий намотку, расположенную нормально к вектору поля.

Исследование вращательного гистерезиса магнитострикции (ВГМ) производилось на отожженном вальцованным поликристаллическом никелевом диске при температуре 20° , в интервале полей $100-4850$ Ое (диаметр диска 14,2 мм, толщина 1,02 мм, степень обжатия 54,7%).

Величина магнитострикции фиксировалась при помощи проволочного датчика, наклеенного на образец в направлении вальцовки. Механические моменты регистрировались при помощи прибора типа анизометра Акулова. Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, вращалось относительно образца от 0 до 360° в прямом и обратном направлениях.

Исследования ТМГ, ТГМ, ТГГЭ и ВГМ проводились методом автоматической записи исследуемых величин на фотопленку. Результаты измерений получались в виде магнитограмм.

Результаты измерений и их анализ

Результаты исследований ТМГ по циклу Б для образца № 1 представлены на рис. 1, а для образца № 2 — на рис. 2. Как видно, у утолщенного образца ТМГ выражен довольно резко, а у тонкого — очень слабо.

У образца № 1, в отличие от образца № 2, на ветви охлаждения в полях меньше 1 Ое наблюдается сначала рост намагниченности, а затем снижение, за счет чего и появляется ТМГ. При охлаждении переход через точку Кюри сопровождается ростом намагниченности за счет роста спонтанной намагниченности.

При дальнейшем охлаждении у толстых образцов действует размагничивающий фактор, он уменьшает и без того слабое внешнее поле. При этом возрастает роль энергии анизотропии, вследствие чего при смещении границ векторы намагниченности доменов устанавливаются не вдоль на-

магничивающего поля, а вдоль направлений легкого намагничивания, которые могут не совпадать с ориентацией слабого поля.

В полях, более сильных, а также во всех полях у образцов с небольшим размагничивающим фактором не наблюдается спада намагниченности на ветви нагрева, гистерезис мал, а у очень тонких образцов ТМГ в цикле Б вообще не наблюдается.

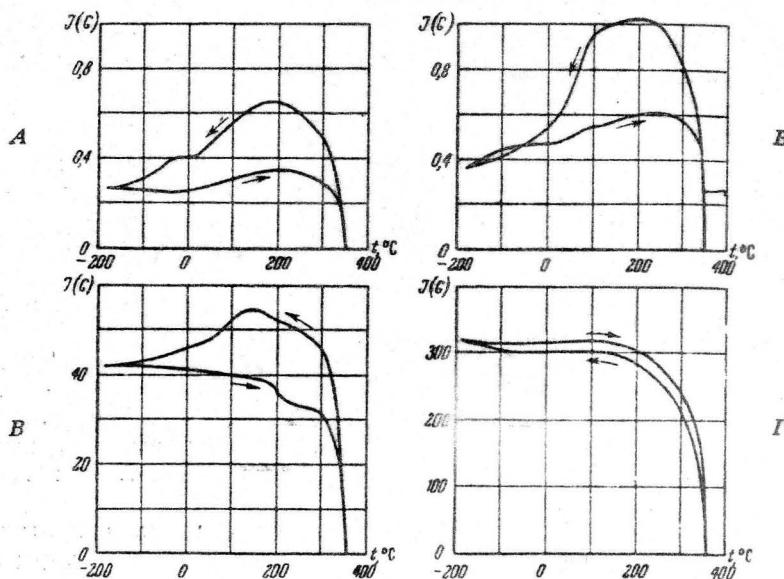


Рис. 1. Температурный магнитный гистерезис никеля в цикле Б (охлаждение — нагрев). Образец № 1. Намагничивающее поле: А — 0,0065, Б — 0,013, В — 0,65, Г — 10,4 Ое

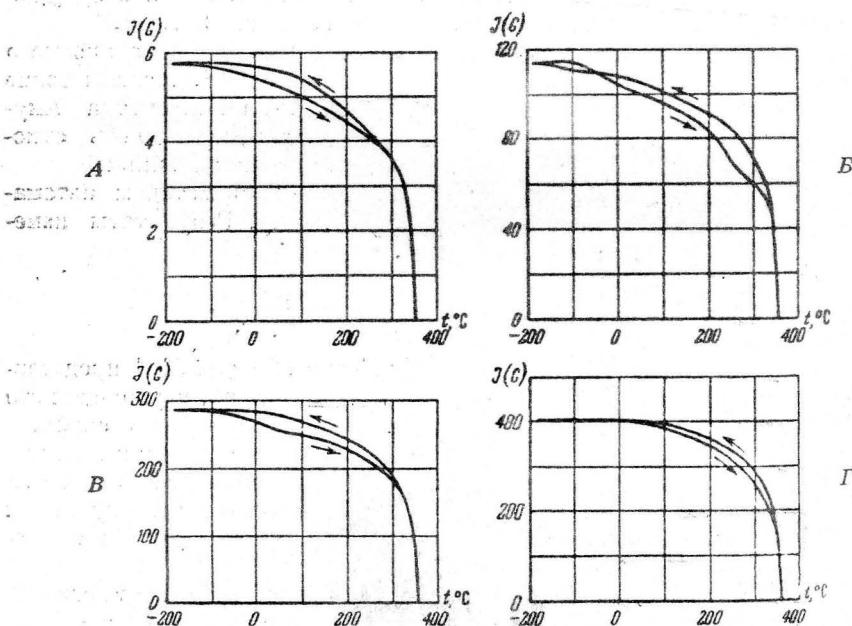


Рис. 2. Температурный магнитный гистерезис никеля в цикле Б (охлаждение — нагрев). Образец № 2. Намагничивающее поле: А — 0,039, Б — 0,65, В — 6,5, Г — 13,0 Ое

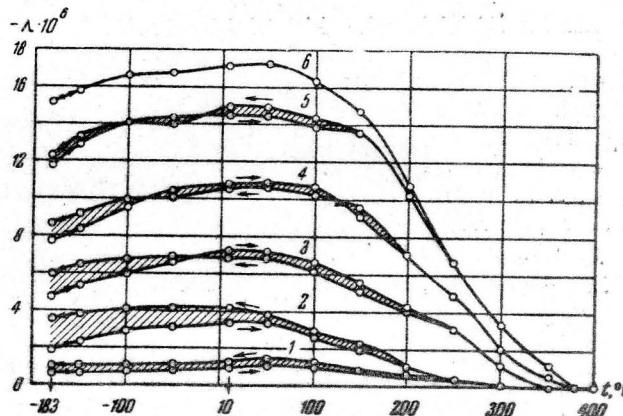


Рис. 3. Температурный гистерезис магнитострикции никеля при различных полях. Серия измерений I (см. по тексту):
 1 — $H = 1$ Oe; 2 — $H = 10$ Oe; 3 — $H = 25$ Oe; 4 — $H = 37,5$ Oe;
 5 — $H = 50$ Oe, 6 — $H = 75$ Oe

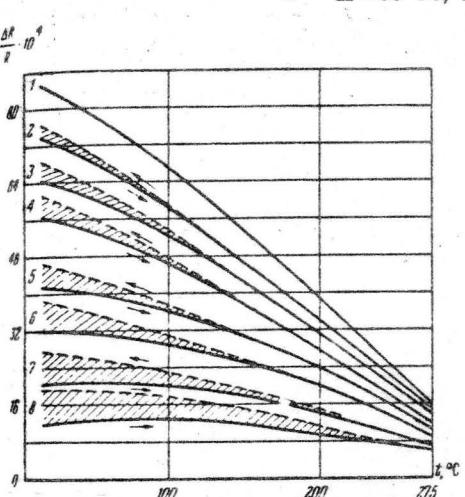


Рис. 4. Температурный гистерезис гальваномагнитного эффекта никеля при различных полях: 1 — $H = 78$ Oe; 2 — $H = 64$ Oe, 3 — $H = 54$ Oe, 4 — $H = 45$ Oe, 5 — $H = 36$ Oe, 6 — $H = 27$ Oe, 7 — $H = 18$ Oe, 8 — $H = 9$ Oe

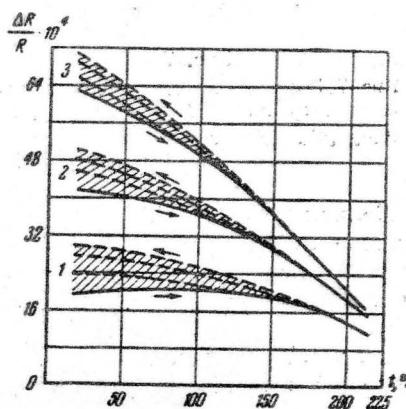


Рис. 6: Температурный гистерезис гальваномагнитного эффекта никеля. Исходная температура 18°. Точки возврата: 260°, 220° и 130°. Поля: 1 — 18,2 — 36,3 — 54 Oe

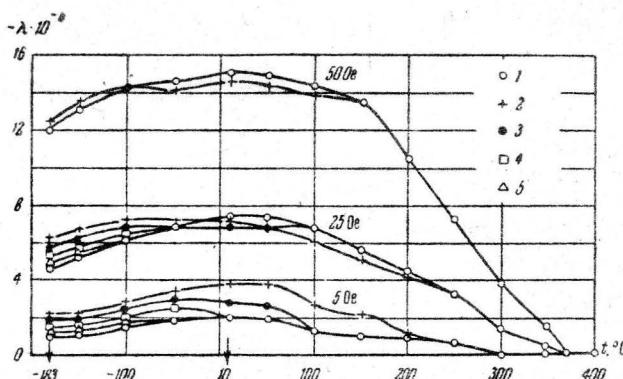


Рис. 5. Температурный гистерезис магнитострикции никеля при $H = 5, 25$ и 50 Oe. Исходная температура — 183°: 1 — нагревание образца до 400°, 2 — охлаждение от 400°, 3 — охлаждение от 250°, 4 — охлаждение от 150°, 5 — охлаждение от 10°

На рис. 3 представлены кривые температурного гистерезиса магнитострикции никеля при различных полях, снятых в первой серии измерений. Видно, что кривые изменения магнитострикции в полях до 15 Ое, соответствующие охлаждению образца, идут выше кривых этого эффекта при нагревании, т. е. наблюдается положительный ТГМ. Видно также, что величина ТГМ с ростом поля постепенно убывает, и в полях порядка 100 Ое ТГМ уже не наблюдается. Аналогичную картину наблюдаем и для температурного гистерезиса гальваномагнитного эффекта рис. 4.

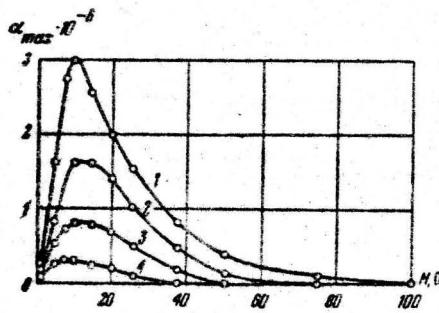


Рис. 7

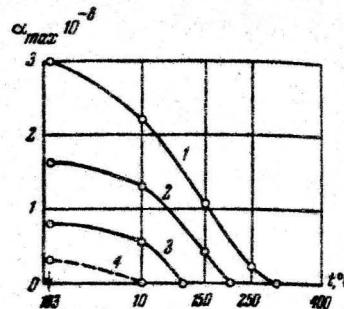


Рис. 8

Рис. 7. Зависимость максимального температурного гистерезиса магнитострикции никеля от поля: 1 — 183÷400°, 2 — 183÷250°, 3 — 183÷150°, 4 — 183÷10°

Рис. 8. Зависимость максимального ТГМ от температуры: 1 — 183÷400°, 2 — 183÷250°, 3 — 183÷150°, 4 — 183÷10°

Величина ТГМ и ТГГЭ зависит от исходной температуры нагревания, а также от конечной точки нагревания (точки возврата), если последняя лежит ниже точки Кюри, что наглядно видно из рис. 5 и 6. Мы видим, что с понижением температуры точки возврата величины ТГМ и ТГГЭ убывают.

Из рис. 7 следует, что ТГМ резко возрастает в полях порядка 8—10 Ое, после чего медленно убывает до нуля. Уменьшаются также значения полей, при которых эффект ТГМ исчезает. Аналогичная картина наблюдается и для ТГГЭ.

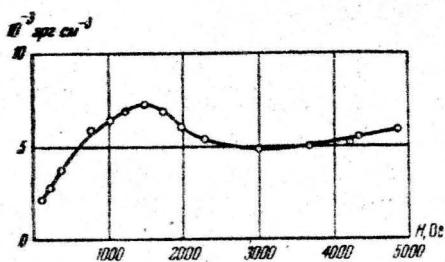


Рис. 10. Потери на гистерезис намагниченности во вращающихся магнитных полях для вальцового поликристалла никеля при температуре 20°

На рис. 9 в качестве примера представлена магнитограмма с записью кривых изменения магнитострикции и вращающих моментов, действующих на образец при вращении магнитного поля в плоскости вальцовки.

Потери на гистерезис намагниченности за один цикл при перемагничивании во вращающихся магнитных полях, согласно выражению $Q_n = \oint M d\psi$, вычислялись по площадям между кривыми моментов. Результаты вычислений показывают, что потери на гистерезис намагниченности во

Установлено, что кривые максимального ТГМ в зависимости от конечной температуры нагревания, но при неизменной исходной температуре, имеют линейный ход в интервале температур выше 10°, что находится в согласии с данными, полученными для ТГГЭ (рис. 8). В области отрицательных температур ход кривых отступает от линейности.

Точки пересечения кривых с осью абсцисс дают значения температур, при которых исчезают ТГМ и ТГГЭ.

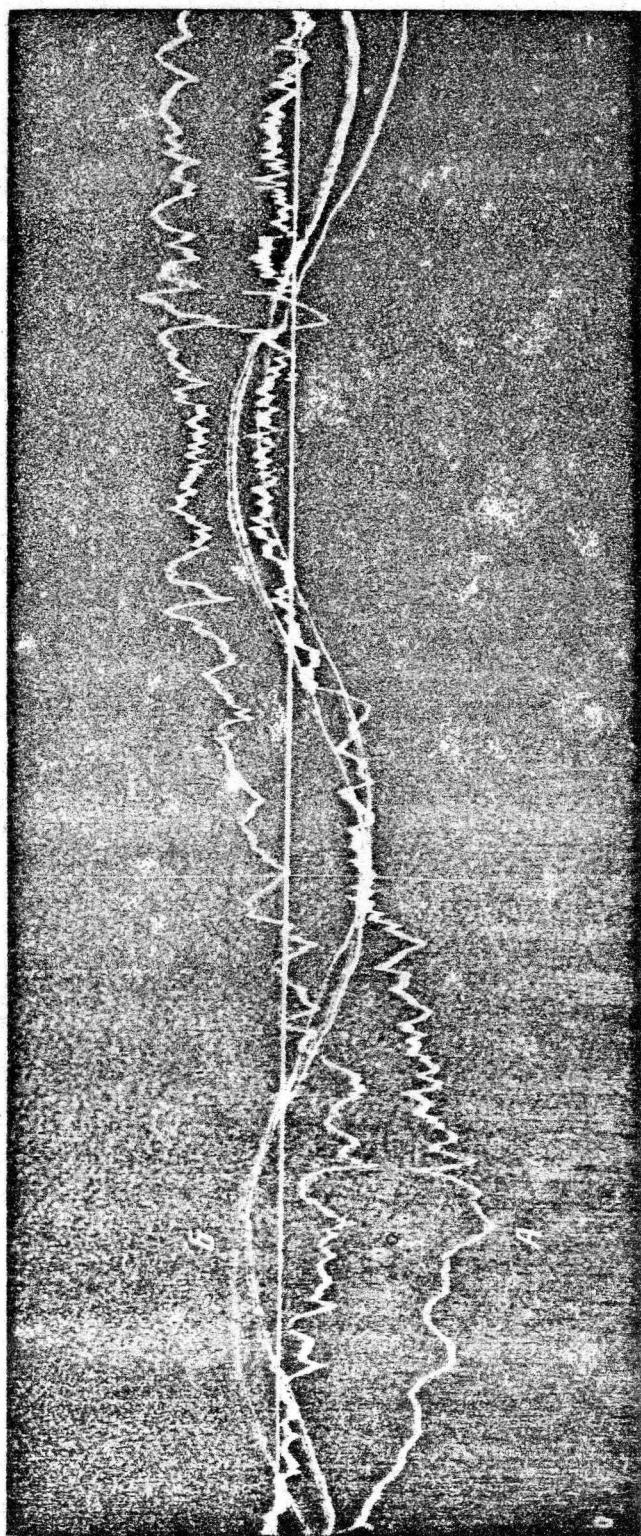


Рис. 9. Автоматическая фотозапись кривых изменения: *A* — механических моментов и *B* — магнитострикций никеля, при прямом и обратном вращении магнитного поля, $H = 4850$ Ое

вращающихся магнитных полях от 1000 до 2500 Ое полностью описываются теорией Акулова [6] и подтверждают экспериментальные данные Баскакова и Брюхатова [7], Саранкина [8] и других авторов о том, что потери с увеличением напряженности магнитного поля растут до определенного

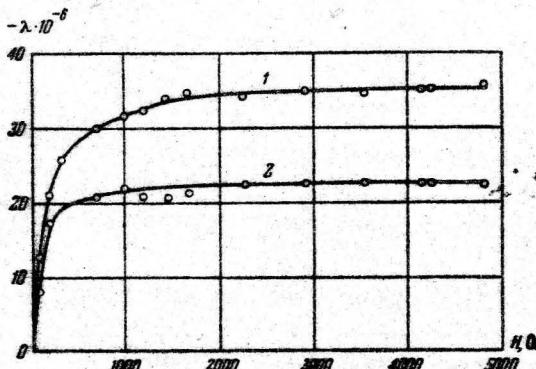


Рис. 11. Магнитострикция (1) и гистерезис магнитострикции (2) никеля во вращающихся магнитных полях при температуре 20°

предела, после чего начинают падать (рис. 10). Однако полностью потери на гистерезис в сильных полях не исчезают, а даже имеют тенденцию к росту.

Одновременно установлено наличие вращательного гистерезиса магнитострикции (рис. 9).

Анализ магнитограмм магнитострикции показывает, что как магнитострикция, так и ВГМ с ростом поля от 100 до 1000 Ое резко возрастают (рис. 11), а далее с ростом поля асимптотически приближаются к соответствующим максимальным значениям.

Красноярский гос. педагогический
институт

Цитированная литература

1. Шур Я. С., Дрожжина В. И., ЖЭТФ, 17, 607 (1947).
2. Шур Я. С., Дрожжина В. И., Изв. АН СССР, Серия физич., 11, 539 (1947).
3. Шур Я. С., Барапова Н. А., ЖЭТФ, 20, 183 (1950).
4. Киренский Л. В., Власов А. Я., Изв. АН СССР, Серия физич., 16, 673 (1952).
5. Киренский Л. В., Ивлев В. Ф., ДАН СССР, 106, 419 (1956).
6. Акулов Н. С., Уч. зап. МГУ, 2, 137 (1934); Акулов Н. С., Ферромагнетизм.— ГГТИ, 1939.
7. Баскаков А. А., Брюхатов Н. Л., ЖЭТФ, 9, 984 (1939).
8. Саранкин П. С., Изв. АН СССР, Серия физич., 16, 688 (1952).