

К. П. БЕЛОВ

К ТЕОРИИ ЧЕТНЫХ ЭФФЕКТОВ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 20 I 1950)

Одной из основных задач теории ферромагнетизма является исследование изменения физических свойств ферромагнитных металлов при возникновении и изменении самопроизвольной намагниченности. Решение этой проблемы сделалось возможным после открытия тензора и закона анизотропии четных эффектов (¹⁻³). Согласно закону Акулова, любое физическое свойство ферромагнитного кристалла, которое может быть охарактеризовано пропорциональностью двух векторов \mathbf{u} и \mathbf{g} , при возникновении самопроизвольной намагниченности претерпевает изменения, определяемые соотношением:

$$\delta \mathbf{u} = A \mathbf{g}, \quad (1)$$

где A — тензор магнитной анизотропии, зависящий от направления самопроизвольной намагниченности \mathbf{s} (s_1, s_2, s_3). Компоненты тензора A могут быть определены для кристаллов любой симметрии на основе данного Акуловым перестановочного соотношения:

$$|T_k A(\mathbf{s})| = |A(T_k \mathbf{s}) T_k|, \quad (2)$$

где T_k — элементы группы симметрии кристаллов данного типа. Применение этой теоремы дает возможность установить вид тензора A с любой степенью точности.

Для объяснения большинства физических свойств ферромагнетиков, связанных с четными эффектами, достаточно рассчитать компоненты тензора анизотропии второго и четвертого порядков относительно компонент s . Члены второго порядка были получены Н. С. Акуловым на основе расчета магнитных сил взаимодействия между атомами в решетках ферромагнитных кристаллов (¹), который привел к объяснению эффекта линейной магнитострикции. В дальнейшем этот расчет был обобщен на случай любого четного эффекта, например изменения электропроводности (²), термоэлектродвижущей силы, теплопроводности и пр.

Что касается членов четвертого порядка, то необходимость их введения вытекала уже из анализа, проведенного для четных эффектов (²). Применение компонентов тензора четвертого порядка для объяснения объемной магнитострикции было дано в работе Д. Л. Симоненко (⁴).

Выводы из теории четных эффектов подверглись экспериментальной проверке многочисленных авторов (⁵). Во всех случаях при этом было обнаружено не только качественное, но, как правило, и количественное согласие с опытом.

В последнее время в работах ряда авторов (⁶) было указано, что существуют такого рода случаи, когда один из выводов теории чет-

ных эффектов, именно, II правило четных эффектов, не согласуется с результатами экспериментов. При такого рода выводах используется однако, указанное правило не в общей, а в следующей частной формулировке: „продольный эффект при насыщении обратен по знаку поперечному и в два раза больше по величине“,

$$\alpha_{\parallel} = -2\alpha_{\perp}. \quad (3)$$

В этой формулировке II правило справедливо только в том случае, если: 1) в тензоре анизотропии члены четвертого порядка малы, 2) парапроцесс отсутствует и 3) магнитной текстуры нет.

Особенно важно учитывать влияние парапроцесса, ибо при наличии последнего соотношение между α_{\parallel} и α_{\perp} может весьма сильно измениться. Как известно ⁽³⁾, в законе анизотропии при подходе к точке Кюри параметры a_k и особенно a_0 становятся зависимыми от H .

В соответствии с этим закон анизотропии приобретает следующий вид:

$$\alpha = (a_0)_H - (a_0)_{H=0} + a_1 \sum_i (s_i^2 g_i^2 - 1/3) + a_2 \sum_{i+j} s_i s_j g_i g_j, \quad (4)$$

где

$$a_0 = 1/2 a I_s^2, \quad (5)$$

$$a_k = a_{k0} \left(1 - \frac{T}{\theta}\right), \quad k=1, 2. \quad (6)$$

Из этого соотношения видно, что если a_1 и a_2 малы, то знаки продольного и поперечного эффектов будут одинаковыми. В частности, при $T = \theta$, имеем:

$$\alpha_{\parallel} = \alpha_{\perp} = 1/2 a [(I_s^2)_H - (I_s^2)_{H=0}]. \quad (7)$$

Таким образом, если мы имеем дело с ферромагнитными сплавами, обладающими низкими точками Кюри, то нужно ожидать, что измерения α_{\parallel} и α_{\perp} будут давать величины приблизительно равные друг другу и одного и того же знака. Покажем, что недавно опубликованные весьма интересные результаты опытов ⁽⁶⁾ по измерению продольных и поперечных гальваномагнитных эффектов в сплаве хром—теллур подтверждают выводы теории четных эффектов. Точка Кюри этого сплава 60° и, следовательно, при комнатных температурах несомненно должен большую роль играть парапроцесс, что и дает одинаковые знаки продольных и поперечных гальваномагнитных эффектов этого сплава. Здесь совершенно не применимо II правило четных эффектов в той частной форме ⁽³⁾, которой авторы указанной работы пользуются при обсуждении своих результатов. В опытах с хром—теллуrom мы в основном имеем дело с влиянием парапроцесса на гальваномагнитный эффект. Это доказывается тем обстоятельством, что результаты их хорошо укладываются в характерные зависимости для четных эффектов, относящиеся к области парапроцесса. В самом деле, при $T = \theta$ имеем ⁽³⁾:

$$I_s = I_0 c \sqrt[3]{H}. \quad (8)$$

Принимая во внимание (7), для четного эффекта $(\alpha)_\theta$ в точке Кюри получаем следующую зависимость:

$$(\alpha)_\theta = b' H^{1/3}. \quad (9)$$

Вблизи точки Кюри для температурной зависимости α , кроме того, можно написать (3):

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{c_0}{V\theta - T} \quad (10)$$

На рис. 1 представлены результаты сопоставления соотношения (9) с данными измерений указанных авторов. Здесь по оси абсцисс отложена величина магнитного поля, а по оси ординат — величина поперечного гальваномагнитного эффекта сплава 48,5 ат. % Те и 51,5 ат. % Сг для области Кюри ($\theta \approx 60^\circ$). Как видим, теоретическая кривая довольно хорошо воспроизводит ход экспериментальной (при этом $b' = -3,45 \cdot 10^{-5}$). Аналогичные результаты дают измерения четных эффектов для других металлов и сплавов.

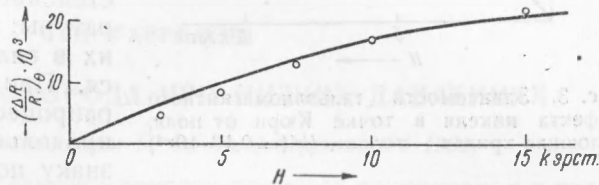


Рис. 1. Зависимость гальваномагнитного эффекта сплава 48,5 ат. % Те, 51,5 ат. % Сг от поля в области Кюри. Сплошная кривая — теорет. ($b' = -3,45 \cdot 10^{-5}$). Эксперим. точки — из работы (6)

На рис. 2 приводятся данные наших измерений * гальваномагнитного эффекта никеля в области Кюри, а на рис. 3 — построенная на основе рис. 2 кривая $(\frac{\Delta R}{R})_0(H)$ при $b' = -0,13 \cdot 10^{-4}$. Как видим, эти результаты также укладываются в зависимость (9).

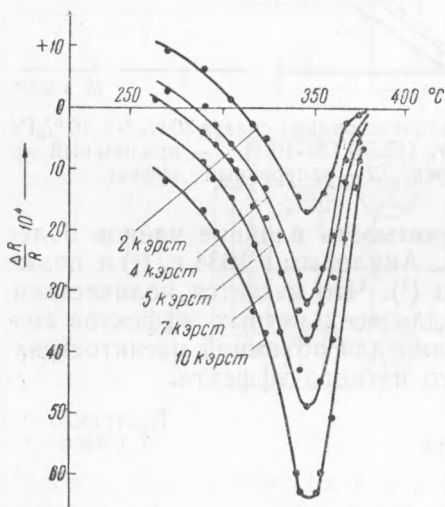


Рис. 2. Температурная зависимость гальваномагнитного эффекта никеля в области Кюри

На рис. 4 приведены данные измерения продольной и поперечной магнитоэлектрики сплава 30% Ni, 70% Fe. Этот сплав имеет точку Кюри, расположенную близко к комнатным температурам, поэтому его четные эффекты должны всецело определяться парапроцессом и укладываться в соотношения (7) и (9). Действительно, продольный и поперечный эффекты этого сплава имеют одинаковые знаки и близки друг другу по величине. Теоретическая кривая, построенная по формуле (9) для продольного эффекта (при $b' = 0,125 \cdot 10^{-6}$), находится в удовлетворительном согласии с опытом.

Согласно зависимости (10), четные эффекты при приближении к точке Кюри вследствие возрастания парапроцесса должны быстро расти. Это также подтверждается кривыми гальваномагнитного эффекта сплава хром—теллур, приведенными в указанной работе (6), а также другими измерениями (см., например, рис. 3).

Возникает вопрос, как будет меняться характер продольного и поперечного эффектов по мере того, как мы будем понижать температуру и отдаляться от точки Кюри. Характер таких изменений вытекает из формул (4) и (7). В точке Кюри оба эффекта, $\alpha_{||}$ и α_{\perp} , сов-

падают.

* В измерениях гальваномагнитного эффекта принимала участие тов. И. Панина.

падают и по величине и по знаку. При понижении температуры начинает сказываться роль процессов инверсии и вращения. Кривые $\alpha_{\parallel}(H)$ и $\alpha_{\perp}(H)$ начинают расходиться, а их наклон, обусловленный парапроцессом, будет уменьшаться.

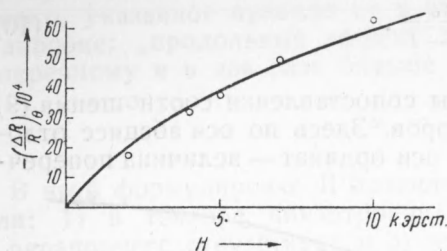


Рис. 3. Зависимость гальваномагнитного эффекта никеля в точке Кюри от поля; сплошная кривая — теорет. ($b' (=0,13 \cdot 10^{-4})$)

больше по величине. Однако это правило соблюдается только в том случае, если: 1) магнитная текстура мала и 2) члены четвертого порядка в тензоре анизотропии малы. Если позаботиться об исключении магнитной текстуры, то отступления от условия $\alpha_{\parallel} = -2\alpha_{\perp}$ вдали от точки Кюри будут говорить о влиянии членов четвертого порядка в тензоре анизотропии. Впервые это было исследовано подробно в работе Симоненко применительно к явлениям объемной магнитострикции. То, что для любого четного эффекта в общем случае необходимо учитывать влияние членов более высокого порядка, было указано Н. С. Акуловым в 1934 г. (2) и позже для частного случая С. В. Вонсовским (7). Что касается количественных соотношений, то поскольку они для всех четных эффектов аналогичны, формулы Акулова и Симоненко для объемной магнитострикции могут быть применены для любого четного эффекта.

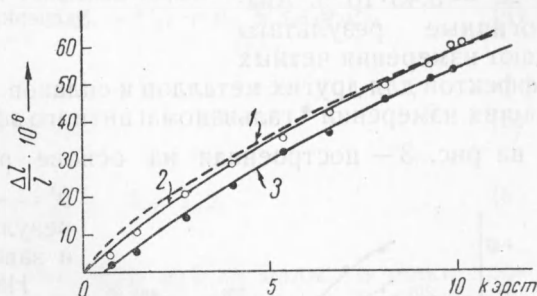


Рис. 4. Магнитострикция сплава 30% Ni, 70% Fe. 1 — теорет. ($b' = 0,125 \cdot 10^{-6}$), 2 — продольный эффект, 3 — поперечный эффект

Институт физики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
7 I 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. С. Акулов, *Zs. f. Phys.*, **52**, 389 (1928). ² Н. С. Акулов, *ibid.*, **87**, 768 (1934). ³ Н. С. Акулов, *Ферромагнетизм*, 1939. ⁴ Д. Л. Симоненко, *ЖЭТФ*, **7**, 170 (1937). ⁵ Д. Р. Феденев, *ЖЭТФ*, **5**, 386 (1935); П. П. Храмов и Л. М. Львова, *Zs. f. Phys.*, **89**, 443 (1934); Д. И. Волков, *ЖЭТФ*, **9**, 444 (1939); **9**, 798 (1939); К. П. Белов, *ЖЭТФ*, **9**, 695 (1939); **9**, 685 (1939); Р. Г. Аннаев, *ЖЭТФ*, **15**, 629 (1945); Г. П. Дьяков, *Изв. АН СССР, сер. физ.*, **11**, № 6, 667 (1947); Д. А. Штуркин, там же **11**, № 6, 661 (1947). ⁶ И. Г. Факидов и Н. П. Гражданкина, *ДАН*, **66**, № 5 (1949); И. Г. Факидов, Н. П. Гражданкина и А. К. Кикоин, *ДАН*, **68**, 491 (1949). ⁷ С. В. Вонсовский, *ЖТФ*, **18**, 145 (1948).