

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1965

УДК 538.632 : 621.318.122

Т. М. КОЗЛОВА

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ОБЛАСТИ ПАРАПРОЦЕССА

Проведено исследование эффекта Холла в ферромагнитных сплавах Ni — Mo (до 5 ат. % Mo) и Ni — Si (до 8 ат. % Si) в магнитных полях выше «технического насыщения» (область парапроцесса). Показано, что э.д.с. Холла E пропорциональна истинной намагниченности I_i . Определена постоянная Холла R_i , соответствующая парапроцессу.

Аномальный эффект Холла в ферромагнетиках, пропорциональный намагниченности, обычно исследуют в слабых магнитных полях, т. е. в области технического намагничивания. Спонтанная постоянная Холла R_s , определяющая эффект в этой области, как известно, изучена в ряде теоретических и экспериментальных работ. В меньшей степени изучен эффект Холла в ферромагнетиках в полях выше технического насыщения (область парапроцесса). Отдельные экспериментальные исследования эффекта Холла при температурах, значительно ниже температуры Кюри, показывают, что в ферромагнетиках, достигших технического насыщения, э.д.с. Холла приближенно пропорциональна напряженности магнитного поля H . Это дало основание предположить [1], что в области парапроцесса имеет место лишь классический эффект Холла с соответствующей ему константой R_0 . Однако в работе [2] на основе анализа экспериментальных данных об эффекте Холла было высказано предположение, что в области парапроцесса имеет место и аномальный эффект Холла, пропорциональный намагниченности парапроцесса.

В целях выяснения, какой же из указанных эффектов преобладает в области парапроцесса, необходимо исследовать зависимость э.д.с. Холла не только от напряженности магнитного поля, но и от намагниченности, обусловленной парапроцессом. Такие исследования были проведены лишь на Fe—Ni сплавах и сталях (группы инвар) [3—4] и на ферритах [5].

В настоящей работе приводятся результаты измерения э.д.с. Холла в области парапроцесса в функции намагниченности на ферромагнитных никелевых сплавах Ni—Mo и Ni—Si в области температур от комнатных до точки Кюри. Состав исследуемых сплавов (ат. %): 1,2% Mo; 2,5% Mo; 3,8% Mo; 5% Mo, ост. Ni; 2,0% Si; 5,5% Si; 7,3% Si, ост. Ni.

Измерения э.д.с. Холла проводились по разработанной ранее методике [6] на образцах в форме параллелепипедов размером $6 \times 12 \times 150$ мм, намагничиваемых в соленоиде ($H_{\max} = 2300$ эрст). Для повышения чувст-

вительности при измерении холловской разности потенциалов применялся фотоэлектрооптический усилитель ФЭОУ-15 (чувствительность по напряжению $10^{-9} \frac{\text{в}}{\text{мм} \cdot \text{м}}$). Намагниченность измерялась баллистическим методом. Измерения э.д.с. Холла и намагниченности проводились одновременно. Во время измерения температура образца поддерживалась с точностью $\pm 0,1^\circ \text{C}$.

На рис. 1 приведена типичная для всех исследованных нами сплавов зависимость э.д.с. Холла E^* от намагниченности I . Характерно, что

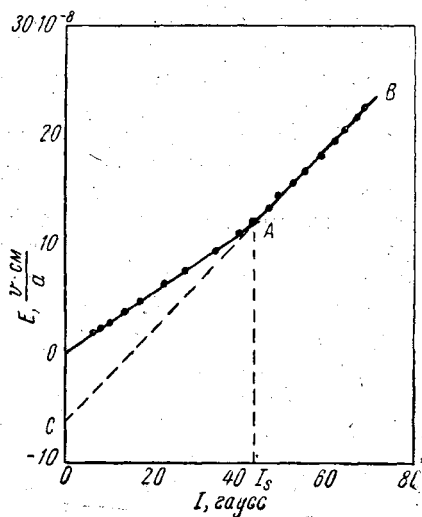


Рис. 1. Зависимость э.д.с. Холла E от намагниченности I для сплава 5% Мо, ост. Ni, $t=56^\circ \text{C}$

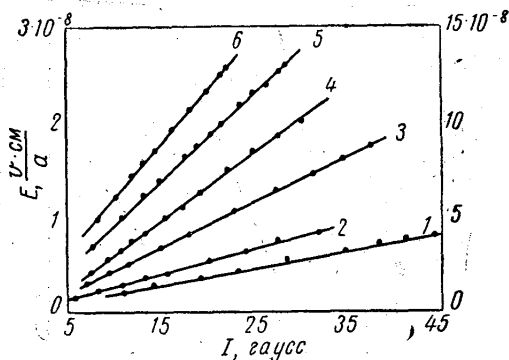


Рис. 2. Зависимость э.д.с. Холла E от намагниченности I для сплавов Ni—Mo и Ni—Si следующих составов: 1—1,2% Мо ($t=292^\circ \text{C}$), 2—2,5% Мо ($t=234^\circ \text{C}$), 3—3,8% Мо ($t=156^\circ \text{C}$), 4—5% Мо ($t=76^\circ \text{C}$), 5—5,5% Si ($t=188^\circ \text{C}$), 6—2% Si ($t=286,5^\circ \text{C}$), (1—4—правый, 5—6—левый масштаб по оси ординат)

кривая $E(I)$ состоит из двух линейных участков, отличающихся наклоном. Намагниченность I в точке А, соответствующей пересечению этих линейных участков, совпадает с намагниченностью насыщения I_s при данной температуре. Следовательно, начальный участок ОА описывает эффект Холла в области технического намагничивания ($I < I_s$), участок АВ — в области парапроцесса ($I > I_s$).

Линейная зависимость э.д.с. Холла от намагниченности в области парапроцесса имеет место в исследованном интервале температур для всех исследованных нами сплавов. Для некоторых сплавов такая зависимость $E(I)$ показана на рис. 2.

По тангенсу угла наклона прямых $E(I)$ определим соответствующую парапроцессу постоянную Холла R_i . При этом важно отметить, что R_i по величине в общем случае не равна постоянной Холла R_s , соответствующей техническому намагничиванию.

Из сказанного следует, что в ферромагнетиках, достигших технического насыщения, э.д.с. Холла можно представить в виде

$$E = R_s I_s + R_i I_i, \quad (1)$$

где

$$I_i = I - I_s.$$

* Э.д.с. Холла E рассчитана на единицу плотности тока и единицу длины между холловскими электродами.

Часть э.д.с. Холла, пропорциональная полю H (классический Холл-эффект), входит в член $R_i I_i$, который следует представить в виде

$$R_i I_i = R_0 H + R_i^{(0)} I_i, \quad (2)$$

где $R_i^{(0)}$ — «истинная» постоянная Холла для парапроцесса.

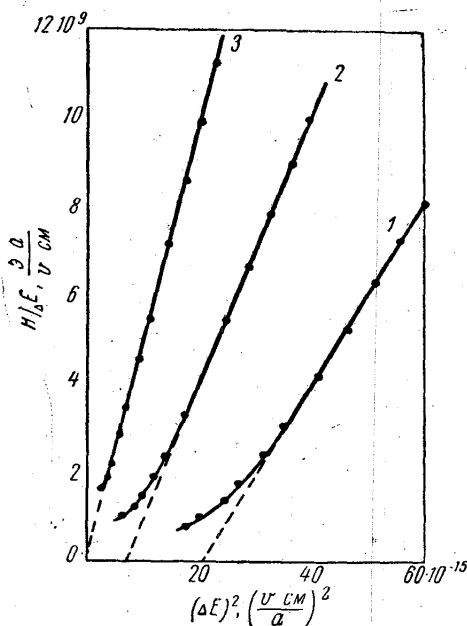
Классическая константа Холла R_0 может быть определена из измерений в парамагнитной области ($T > \Theta$). После проведения подобных измерений оказалось, что R_0 практически не зависит от температуры и член $R_0 H$ ничтожно мал по сравнению с членом $R_i I_i$, определенным нами при температурах ниже точки Кюри описанным способом. Поэтому в используемых сравнительно небольших полях ($H_{\max} = 2300$ эрст) членом $R_0 H$ мы пренебрегаем и считаем, что $R_i \approx R_i^{(0)}$.

Зная зависимость намагниченности I в области парапроцесса от напряженности магнитного поля H , нетрудно найти зависимость э.д.с. Холла от H . Уравнение кривой истинного намагничивания вблизи температуры Кюри было получено Гинзбургом [7]

$$H = \alpha I + \beta I^3, \quad (3)$$

где α и β — термодинамические коэффициенты, зависящие от температуры и давления.

Рис. 3. Зависимость $H/\Delta E$ от $(\Delta E)^2$ для сплава 5% Мо, ост. Ni: 1 — 60°С, 2 — 64°С, 3 — 69°С



Введем величину

$$\Delta E = E - E_0 = R_i I_i, \quad (4)$$

где $E_0 = (R_S - R_i) I_S$ — величина при данной температуре постоянная, определяемая из графика (см. рис. 1) отрезком OC , равным э.д.с. Холла при $I=0$.

Из уравнений (1) и (4) получаем зависимость ΔE от H в виде

$$H = \alpha_E \Delta E + \beta_E (\Delta E)^3,$$

$$\alpha_E = \frac{\alpha}{R_i}; \quad \beta_E = \frac{\beta}{R_i^3}. \quad (5)$$

Как видно из рис. 3, где показана зависимость $\frac{H}{\Delta E}$ от $(\Delta E)^2$ для одного из сплавов при нескольких температурах, соотношение (5) выполняется. Эта закономерность имеет место и для всех остальных исследованных сплавов.

Определяя экспериментально при некоторой температуре коэффициенты α и β , α_E и β_E , можно вычислить константу R_i при этой температуре.

Таблица

Сплав 2% Si, ост. Ni ϕ = 283°C			Сплав 3.8% Mo, ост. Ni ϕ = 150°C			Сплав 5% Mo, ост. Ni ϕ = 68°C		
t°, C	значения $R_i \cdot 10^3$, $\frac{\theta \cdot \text{см}}{a \cdot \text{гс}}$		t°, C	значения $R_i \cdot 10^3$, $\frac{\theta \cdot \text{см}}{a \cdot \text{гс}}$		t°, C	значения $R_i \cdot 10^3$, $\frac{\theta \cdot \text{см}}{a \cdot \text{гс}}$	
	опытн.	вычислен.		опытн.	вычислен.		опытн.	вычислен.
267,2	12,0	11,87	139,0	2,90	2,92	56,5	4,30	4,26
272,9	11,5	11,45	142,5	2,70	2,74	60,0	4,15	4,10
278,0	11,5	11,43	145,0	2,60	2,63	64,0	3,95	3,88
284,0	11,5	11,45	149,0	2,45	2,43	69,0	3,80	3,79

Для нескольких сплавов проведено сравнение вычисленных значений константы $R_i = \sqrt{\frac{\beta a_E}{\beta_E a}}$ и значений константы R_i , определенных из опыта (из графика зависимости $E(I)$) (см. таблицу). Количественное совпадение определенных разным способом значений константы R_i также доказывает справедливость предположения о равенстве R_i «истинной» постоянной Холла для парапроцесса и справедливость исходного уравнения (1).

Как видно из таблицы, постоянная Холла R_i , определенная в непосредственной близости к точке Кюри, слабо меняется с температурой.

Полученные для сплавов Ni—Mo и Ni—Si результаты показывают, что в области парапроцесса имеет место аномальный эффект Холла, обусловленный истинной намагниченностью. Причем аномальный эффект Холла значительно больше классического.

Данные исследования э.д.с. Холла от напряженности магнитного поля выше технического насыщения обычно используют для определения классической константы Холла R_0 (тангенс угла наклона $E(H)$). Как видно из выражений (1) и (2), зависимость э.д.с. Холла от напряженности магнитного поля определяется в общем случае членами $R_0 H$ и $R_i^0 I_i$. Поэтому указанный способ определения константы R_0 без учета влияния парапроцесса в общем случае не дает истинных значений этой величины.

В заключение выражаю искреннюю благодарность Д. И. Волкову за ценные советы при выполнении работы и Е. И. Кондорскому за обсуждение экспериментальных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pugh E. M., Rostoker N., Schindler A. Phys. Rev., 80, 688, 1950.
2. Волков Д. И. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мат., мех., астро., физ., химии, № 3, 65, 1954.
3. Бажанова Н. В. ЖЭТФ, 33, 3, 567, 1957.
4. Белов К. П., Свирина Е. П., Белоус Ю. В. «Физика металлов и металловедения», 6, 4, 621, 1958.
5. Белов К. П., Свирина Е. П. ЖЭТФ, 37, 5, 1212, 1959; Белов К. П., Свирина Е. П. «Физика твердого тела», 3, 8, 2495, 1961.
6. Кикоин И. К. Phys. Zeitschrift der Sow., 9, 1, 1936.
7. Гинзбург В. Л. ЖЭТФ, 17, 833, 1947.