

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 — 1966

УДК 621.318.1 : 538.632

А. В. ЧЕРЕМУШКИНА, Ю. Н. АРХИПОВ

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ХОЛЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В СПЛАВАХ Fe—Si—Al ТИПА «СЕНДАСТ»

Изложены результаты экспериментального исследования температурной зависимости электродвижущей силы Холла и электрического сопротивления сплавов Fe—Si—Al типа «сендаст». Показано, что в интервале температур 20—500°С ферромагнитная постоянная Холла  $R_s$  и удельное электрическое сопротивление  $\rho$  связаны соотношением  $R_s = a\rho + b\rho^2$ . Определены величины параметров  $a$  и  $b$  в зависимости от состава сплавов. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с теорией Е. И. Кондорского.

Поле Холла  $E$  в намагниченных ферромагнитных металлах можно описать эмпирической формулой

$$E = E_H + E_I, \quad (1)$$

где  $E_H$  — поле Холла, пропорциональное напряженности магнитного поля  $H$ ,  $E_I$  — спонтанное поле Холла, пропорциональное величине намагниченности  $I$ . Соответственно вводятся постоянные Холла — полевая  $R_0$  и ферромагнитная  $R_s$ .

В теоретических [1, 2] и экспериментальных [3] работах по исследованию явления Холла в ферромагнетиках были получены формулы, связывающие ферромагнитную постоянную Холла  $R_s$  с удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ . В теории, обобщенной на случай, когда спонтанная намагниченность обусловлена частично или полностью магнитными моментами локализованных электронов и рассеяние происходит как на примесях, так и на фонах [3], для  $R_s$  была получена формула

$$R_s = a\rho + b\rho^2, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры, постоянные для данного металла. При этом

$$a \sim \Delta M_H \rho_0, \quad b \sim \Delta M_H, \quad (3)$$

где  $\Delta M_H$  определяется формулой (21) статьи [4],  $\rho_0$  — остаточное электрическое сопротивление.

В работе [3] показано, что у железоникелевых сплавов кривая зависимости параметров  $a$  и  $b$  от состава сплавов проходит через нуль вблизи 80—85% Ni. Известно также, что у железоникелевых сплавов с

концентрацией никеля 76—78% наблюдаются малые значения константы магнитной анизотропии. Таким образом, области концентраций железоникелевых сплавов с малыми значениями ферромагнитной постоянной Холла и малыми значениями константы анизотропии лежат в непосредственной близости друг от друга. Поэтому интересно проверить, как ведут себя параметры  $a$  и  $b$ , входящие в формулу (2) у сплавов Fe—Si—Al типа «сендаст», которые, так же как и пермаллой, обладают малыми значениями константы магнитной анизотропии и магнитострикции [5].

Нами было проведено исследование температурной зависимости электродвижущей силы Холла и электрического сопротивления сплавов Fe—Si—Al, состав которых приведен в табл. 1.

Сплавы изготовлялись из железа «Армко», ферросилиция технической частоты и электролитического алюминия. Измерения проводились на литых образцах, имеющих форму стержней прямоугольного сечения размером  $4 \times 8 \times 100$  мм. Токоподводящие и потенциальные электроды получались в процессе литья и составляли единое целое с образцом. Перед измерениями все образцы отжигались в вакууме при  $1000^\circ\text{C}$  в течение 10 час, а затем медленно охлаждались вместе с печью. Электродвижущая сила Холла измерялась по методу, описанному в работах [6] и [7]. Токоподводящие электроды располагались поперек боковых сторон стержня на расстоянии 8 мм. Образцы намагничивались вдоль длинной стороны образца в соленоиде, в котором можно было получить поля до 3000 эрст. Измерение электрического сопротивления проводилось на тех же образцах, что и измерение электродвижущей силы Холла. Электрическое напряжение измерялось с помощью потенциометра ППТН-1. При высокотемпературных измерениях образцы вместе с печью помещались в прибор из молибденового стекла, который откачивался до  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  мм рт. ст. Токоподводящие и потенциальные проводники припаивались серебряным припоем. Температура образца измерялась хромельалюмелевой термопарой, помещавшейся в средней его части. Магнитная индукция образца измерялась баллистическим методом. Ферромагнитная постоянная Холла  $R_s^1$  вычислялась по формуле

$$R_s^1 = 4\pi R_s = \frac{\epsilon}{ajI_s},$$

где  $\epsilon$  и  $I_s$  — значения электродвижущей силы Холла и намагниченности при насыщении,  $j$  — плотность тока,  $a$  — расстояние между потенциальными контактами.

На рис. 1 представлена зависимость величины  $\frac{\epsilon}{ja}$  от температуры для сплавов различного состава. Как видно из этого рисунка, величина  $\frac{\epsilon}{ja}$  с повышением температуры растет, достигает максимума, затем быстро убывает. Положение максимума на кривых зависит от состава сплава. На рис. 2 и 3 приведены кривые, характеризующие зависимость ферромагнитной постоянной  $R_s^1$  и удельного электрического сопротивления  $\rho$  от температуры. Величины  $R_s^1$  и  $\rho$  для всех исследованных сплавов монотонно возрастают с увеличением температуры. Наибольшую абсолютную величину  $R_s^1$ , а также и  $\rho$  имеют сплавы с большим процентным содержанием неферромагнитного компонента (Al и Si). Для проверки соотношения (2) была построена зависимость величины  $\frac{R_s^1}{\rho}$  от  $\rho$ .

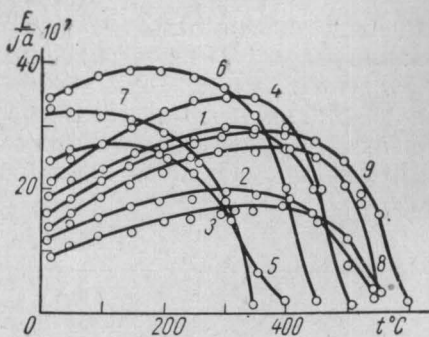


Рис. 1. Зависимость величины  $\frac{E}{ia}$  от температуры для сплавов Fe—Si—Al различного состава. Цифрами на всех рисунках указаны номера образцов (см. таблицы)

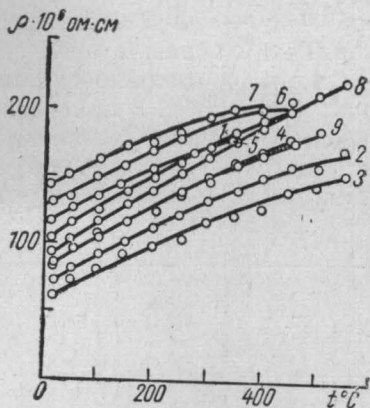


Рис. 3. Зависимость удельного электрического сопротивления  $\rho$  от температуры для сплавов Fe—Si—Al, различного состава

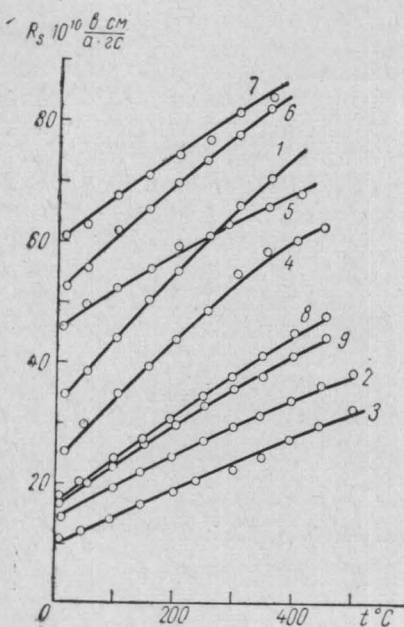


Рис. 2. Зависимость ферромагнитной постоянной  $R_s$  спонтанного поля Холла от температуры для сплавов Fe—Si—Al

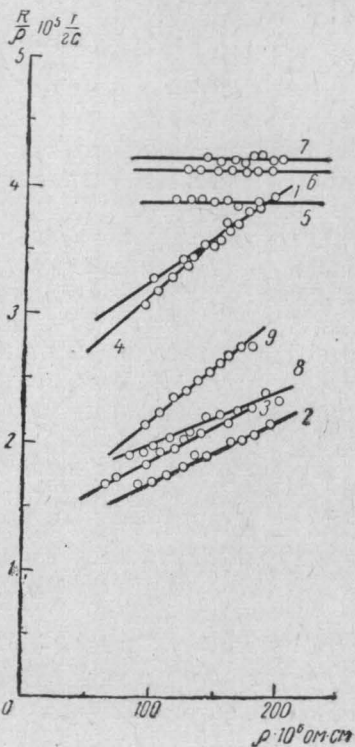


Рис. 4. Зависимость величины  $\frac{R_s}{\rho}$  от  $\rho$  для сплавов Fe—Si—Al различного состава

Из рис. 4 видно, что между величинами  $\frac{R_s'}{\rho}$  и  $\rho$  в интервале температур 0—400—500°С наблюдается линейная зависимость для всех образцов. Таким образом, опыт подтверждает формулу (2), и величины  $R_s$  и  $\rho$  связаны соотношением вида  $R_s' = a'\rho + b'\rho^2$ , где  $a' = 4\mu a$  и  $b' = 4\mu b$ . На рис. 4 и в табл. 2 приведены величины параметров  $a$  и  $b$ . В табл. 2 приведены значения удельного электрического сопротивления при комнатной температуре, которые у исследованных сплавов близки к остаточному электрическому сопротивлению.

Таблица 1

№ образца	Si, %	Al, %	Fe, %
1	9,5	5,5	85
2	11	4	85
3	12	3	85
4	9	6	85
5	8	8	84
6	9,5	7	83,5
7	9	8	83
8	10	4	86
9	10	3	87

Таблица 2

№ образца	$R_s \cdot 10^{10}$	$\rho \cdot 10^6$	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^4$
1	32,2	92,1	2,93	0,63
2	15	90	1,20	0,50
3	10,9	65	1,33	0,52
4	24,9	82,4	2,19	0,97
5	46	115	3,86	~0
6	52,5	127	4,10	~0
7	61	140	4,22	~0
8	18,1	94	1,57	0,43
9	16,7	87	1,34	0,84

Из табл. 2 видно, что величины параметров  $a$  и  $b$  зависят от состава сплава. Изменение концентрации компонентов влияет на оба параметра. Параметр  $a$  имеет большую величину у сплавов с большим электрическим сопротивлением. Параметр  $a$  исследованных сплавов 1—9 на порядок меньше, чем у Fe и сплавов Fe—Si и Fe—Al. У некоторых наших сплавов, например у сплава (5—7), параметр  $b$  близок к нулю. Таким образом, у сплавов типа «сендаст», так же как и у сплава типа пермаллой, параметр  $b$  мал. Однако в отличие от сплавов типа пермаллой параметр  $a$  у сплавов типа «сендаст» весьма велик, что приводит к большим значениям  $R_s$  у этих сплавов. Как следует из формулы (3), величина параметра  $a$  пропорциональна  $\rho_0$ . При малых  $\Delta M_H$  параметр  $a$  может и не быть малым, если  $\rho_0$  достаточно велико.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность профессору Е. И. Кондорскому за предложенную тему и обсуждение результатов настоящей статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Karplus R., Luttinger J. M. Phys. Rev., **95**, 1154, 1954; Luttinger J. M. Phys. Rev., **112**, 195, 1958.
2. Ирхин Ю. П., Шавров В. Г. ЖЭТФ, **42**, 1233, 1962; Ирхин Ю. П., Абельский Ш. Ш. «Физика твердого тела», **6**, 1635, 1964.
3. Кондорский Е. И., Черемушкина А. В., Курбаниязов Н. «Физика твердого тела», **6**, 539, 1964.
4. Кондорский Е. И. ЖЭТФ, **6**, 2085, 1964.
5. Masamoto. Sci. report of the Tohoku imp. univ. 1936; Займовский А. С., Селисский Я. П. Сб. «Техническая физика». Энергетическое изд-во, 1947.
6. Кикоин А. К. Phys. Rev., **36**, 1503, 1930.
7. Черемушкина А. В. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астроном., № 2, **7**, 1957; № 1, **7**, 1958.

Поступила в редакцию  
20. 11 1964 г.

Кафедра  
магнетизма