

## МАГНИТОУПРУГОСТЬ И ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ФОНОНОВ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

В.М.Зверев, В.П.Силин

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

117924 Москва, Россия

Поступила в редакцию 29 мая 1996 г.

Для определения количественного влияния тепловых фононов на магнитные свойства ферромагнетиков, обусловленного магнитоупругостью, проведен анализ экспериментальных данных для ряда ферромагнетиков. Установлено аномально сильное влияние тепловых фононов на магнитные свойства инварных железо-платиновых сплавов. Эффект определяется сдвиговой магнитоупругостью.

PACS: 75.30.-m

Ким высказал гипотезу о влиянии тепловых фононов на магнитные свойства ферромагнетиков из-за зависимости от намагниченности скорости продольных звуковых волн (см., например, [1]). Теория, сформулированная в работах [2-5], показала, что подобное влияние тепловых фононов на магнитные свойства обусловлено эффектом магнитоупругости, приводящим к зависимости от намагниченности  $M$  модуля всестороннего сжатия при постоянной намагниченности  $K_M$  и модуля сдвига  $G_M$ . Это положение теории [2-5] открывает возможность для реального количественного определения вклада тепловых фононов в магнитные свойства ферромагнетиков.

В настоящем сообщении реализуется идея феноменологического подхода работы [6], свободного от модельных представлений о природе ферромагнетизма и магнитоупругости. В таком подходе сравнительно небольшой набор параметров, определяемых экспериментально, позволяет сделать необходимые утверждения. Для ряда ферромагнетиков анализ экспериментального материала показывает, что зависимость упругих модулей от намагниченности имеет вид

$$K_M = K + K' M^2, \quad G_M = G + G' M^2. \quad (1)$$

Это приводит к подобной зависимости от намагниченности дебаевских температур [4], отвечающих продольным,  $\Theta_M^l = \Theta_l + \Theta_l' M^2$ , и поперечным,  $\Theta_M^t = \Theta_t + \Theta_t' M^2$ , акустическим фононам, где

$$\frac{\Theta_l'}{\Theta_l} = \frac{3K' + 4G'}{2(3K + 4G)}, \quad \frac{\Theta_t'}{\Theta_t} = \frac{G'}{2G}. \quad (2)$$

Мы ограничимся рассмотрением ферромагнетиков, температура Кюри которых не мала по сравнению с дебаевской температурой. Тогда количественное влияние тепловых фононов на константу Кюри

$$C = C_{el}(1 - X), \quad (3)$$

температурную производную квадрата спонтанной намагниченности вблизи фазового перехода

$$\frac{dM^2}{dT} = \left( \frac{dM^2}{dT} \right)_{el} \frac{1}{1 - X}, \quad (4)$$

на скачок теплоемкости  $\delta C_v$ , отнесенный к температуре Кюри  $T_c$

$$\frac{\delta C_v}{T_c} = \left( \frac{\delta C_v}{T_c} \right)_{el} \frac{1}{(1-X)^2}, \quad (5)$$

а также на барическую производную температуры Кюри

$$\frac{dT_c}{dP} \simeq \left( \frac{dT_c}{dP} \right)_{el} (1-X) \quad (6)$$

и в соответствие с этим на скачок коэффициента теплового расширения объема ферромагнетика при  $T = T_c$

$$\delta\beta \simeq \delta\beta_{el}/(1-X) \quad (7)$$

определяется сравнением с единицей безразмерного параметра (ср. [6])

$$X = 2CC_{ph}(\Theta'/\Theta). \quad (8)$$

Здесь индекс *el* обозначает электронные вклады в соответствующие величины;

$$C_{ph} = 3\kappa/\nu \quad (9)$$

– высокотемпературный вклад акустических фононов в теплоемкость, где  $\nu$  – объем элементарной ячейки кристалла,  $\kappa$  – постоянная Больцмана,

$$\frac{\Theta'}{\Theta} = \frac{1}{3} \left( \frac{\Theta'_l}{\Theta_l} + 2 \frac{\Theta'_t}{\Theta_t} \right) = \left( \frac{\Theta'}{\Theta} \right)_G + \left( \frac{\Theta'}{\Theta} \right)_K, \quad (10)$$

где

$$\left( \frac{\Theta'}{\Theta} \right)_G = \frac{K + 2G}{3K + 4G} \frac{G'}{G}, \quad \left( \frac{\Theta'}{\Theta} \right)_K = \frac{K'}{2(3K + 4G)} \quad (11)$$

определяются, соответственно, коэффициентами сдвиговой магнитоупругости  $G'$  и магнитоупругости всестороннего сжатия  $K'$ . Формулы (10) и (11) позволяют представить параметр (8) в виде  $X = X_G + X_K$ , где слагаемые

$$X_G = 2CC_{ph} \left( \frac{\Theta'}{\Theta} \right)_G, \quad X_K = 2CC_{ph} \left( \frac{\Theta'}{\Theta} \right)_K \quad (12)$$

характеризуют вклады тепловых фононов в магнитные свойства (3) – (7), обусловленные, соответственно, учетом сдвиговой магнитоупругости и магнитоупругости всестороннего сжатия.

Ниже сообщаются количественные оценки параметра  $X$ , полученные на основании анализа экспериментальных данных для чистых металлов никеля и железа, для инварных железо-никелевых сплавов  $Fe_{1-x}Ni_x$  ( $0.30 < x \leq 0.45$ ), тройных сплавов  $Fe_{0.65}(Ni_{1-x}Mn_x)_{0.35}$  ( $0 \leq x \leq 0.13$ ) и для инварных железо-платиновых сплавов  $Fe_{1-x}Pt_x$  ( $x = 0.28, 0.25$ ) с различными значениями параметра  $S$ , определяющего степень упорядочения атомов в кристаллической решетке.

Обсудим экспериментальное определение коэффициентов магнитоупругости. Коэффициент сдвиговой магнитоупругости  $G'$  может быть непосредственно определен с помощью экспериментальных данных работ [7–13] для магнитоупругих вкладов  $\Delta C'$  и  $\Delta C_{44}$  в сдвиговые модули  $C'$  и  $C_{44}$  кубических кристаллов, представляемых как функции квадрата намагниченности  $\Delta C' = C''M^2$

и  $\Delta C_{44} = C'_{44} M^2$ , с последующим усреднением по Фойгту  $G' = (2C'' + 3C'_{44})/5$ . Модуль всестороннего сжатия при постоянной намагниченности  $K_M$  не изменяется непосредственно на эксперименте. Поэтому для определения коэффициента магнитоупругости  $K'$  необходимо вычислить модуль  $K_M$  на основании экспериментальных данных и термодинамического соотношения [10]

$$\frac{1}{K_B} - \frac{1}{K_M} = 2\gamma M \left( \frac{\partial w}{\partial B} \right)_{P,T} \quad (13)$$

Таблица 1

Упругие модули и магнитоупругие коэффициенты, определенные на основе экспериментальных данных

Металлы, сплавы	$K$ ( $10^2$ кбар)	$G$ ( $10^2$ кбар)	$C''$ ( $10^5$ )	$C'_{44}$ ( $10^5$ )	$G'$ ( $10^5$ )	$K'$ ( $10^5$ )
Ni	17.5	8.2	0.88	0.69	0.77	$0.5 \div 0.9$
Fe	13.5	6.8	0.034	0.010	0.02	0.04
Fe <sub>0.685</sub> Ni <sub>0.315</sub>	11.7	7.8	-0.75	-0.97	-0.88	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.668</sub> Ni <sub>0.332</sub>	12.1	7.6	-0.81	-0.72	-0.76	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.662</sub> Ni <sub>0.338</sub>	12.5	7.4	-0.84	-0.72	-0.77	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.647</sub> Ni <sub>0.353</sub>	$12.4 \div 14.6$	7.4	-0.88	-0.72	-0.78	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.623</sub> Ni <sub>0.377</sub>	12.6	7.2	-0.60	-0.38	-0.47	
Fe <sub>0.60</sub> Ni <sub>0.40</sub>	12.9	7.2	-0.50	-0.29	-0.37	
Fe <sub>0.575</sub> Ni <sub>0.425</sub>	12.9	7.2	-0.41	-0.24	-0.31	
Fe <sub>0.548</sub> Ni <sub>0.452</sub>	13.6	7.1	-0.30	-0.18	-0.23	
Fe <sub>0.65</sub> Ni <sub>0.35</sub>	$11.8 \div 15.0$	7.4	-0.78	-0.75	-0.76	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.65</sub> (Ni <sub>0.96</sub> Mn <sub>0.04</sub> ) <sub>0.35</sub>	$13.3 \div 13.7$	7.6	-0.78	-0.75	-0.76	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.65</sub> (Ni <sub>0.91</sub> Mn <sub>0.09</sub> ) <sub>0.35</sub>	$12.6 \div 13.4$	7.9	-0.78	-0.75	-0.76	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.65</sub> (Ni <sub>0.87</sub> Mn <sub>0.13</sub> ) <sub>0.35</sub>	$11.9 \div 13.1$	8.2	-0.78	-0.75	-0.76	$1.3 \div 1.5$
Fe <sub>0.72</sub> Pt <sub>0.28</sub> ( $S = 0$ )	$12.1 \div 15.8$	$7.0 \div 7.1$	-1.63	-1.47	-1.53	$1.0 \div 1.3$
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> ( $S = 0.85$ )	$12.6 \div 14.1$	$6.9 \div 7.0$	-1.42	-1.22	-1.30	$1.0 \div 1.3$
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> ( $S = 0.70$ )	$12.6 \div 14.1$	$6.9 \div 7.0$	-2.09	-2.12	-2.11	$1.0 \div 1.3$
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> ( $S = 0.60$ )	$12.6 \div 14.1$	$6.9 \div 7.0$	-1.91	-1.69	-1.78	$1.0 \div 1.3$
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> ( $S = 0.55$ )	$12.6 \div 14.1$	$6.9 \div 7.0$	-2.06	-1.78	-1.89	$1.0 \div 1.3$
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> ( $S = 0.40$ )	$12.6 \div 14.1$	$6.9 \div 7.0$	-1.96	-1.67	-1.79	$1.0 \div 1.3$

Здесь  $K_B$  - экспериментально измеряемый [7-13] модуль всестороннего сжатия при постоянной магнитной индукции,  $\gamma$  - коэффициент спонтанной магнито-стрикции [10, 14],  $(\partial w / \partial B)_{P,T}$  - вынужденная магнито-стрикция парапроцесса [14, 15]. Данные о температурной зависимости спонтанной намагниченности  $M$  брались из работ [16-18]. Таким способом определенные величины магнитоупругих коэффициентов  $G'$  и  $K'$  приведены в табл.1. В табл. 2 приведены экспериментальные данные о константе Кюри  $C$ , полученные на основе работ [19-23], и данные о фоновой теплоемкости  $C_{ph}$ , полученные с помощью формулы (9), в которой для интересующего нас случая ферромагнетиков с кубической решеткой использовано

$$v = a^3, \quad (14)$$

где  $a$  - постоянная решетки. Эти данные, а также данные табл. 1 позволили определить как  $(\Theta' / \Theta)_G$ ,  $(\Theta' / \Theta)_K$ , так и значения безразмерных параметров  $X_G$ ,  $X_K$  и  $X$ , которые также приведены в табл. 2. Отметим, что согласно данным табл.2 основной вклад тепловых фононов в магнитные свойства возникает от сдвиговой магнитоупругости, поскольку  $|X_G| \gg |X_K|$ , а не от магнитоупругости всестороннего сжатия, как это предполагалось в первоначальных простых моделях [1, 2].

Таблица 2

Параметры, определяющие величину вклада тепловых фононов в магнитные свойства ферромагнетиков

Металлы, сплавы	$a$ (Å)	$C_{ph}$ ( $10^7 \frac{эрг}{см^3 К}$ )	$C$ (К)	$(\Theta'/\Theta)_G$ ( $10^{-8} \Gamma c^{-2}$ )	$(\Theta'/\Theta)_K$ ( $10^{-8} \Gamma c^{-2}$ )	$X_G$	$X_K$	$X$
Ni	3.52	0.95	0.05	3.8	0.3 ÷ 0.5	0.036	$(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$	0.04
Fe	2.866	1.76	0.17	0.12	0.03	0.007	0.002	0.009
Fe <sub>0.685</sub> Ni <sub>0.315</sub>	3.585	0.90	0.28	-4.6	1.0 ÷ 1.1	-0.23	0.05 ÷ 0.06	-(0.17 ÷ 0.18)
Fe <sub>0.668</sub> Ni <sub>0.332</sub>	3.585	0.90	0.28	-4.1	1.0 ÷ 1.1	-0.20	0.05 ÷ 0.06	-(0.14 ÷ 0.15)
Fe <sub>0.662</sub> Ni <sub>0.338</sub>	3.585	0.90	0.28	-4.3	1.0 ÷ 1.1	-0.22	0.05 ÷ 0.06	-(0.16 ÷ 0.17)
Fe <sub>0.647</sub> Ni <sub>0.353</sub>	3.585	0.90	0.28	-(4.2 ÷ 4.3)	0.9 ÷ 1.1	-(0.21 ÷ 0.22)	0.04 ÷ 0.06	-(0.15 ÷ 0.18)
Fe <sub>0.623</sub> Ni <sub>0.377</sub>	3.585	0.90	0.28	-2.6		-0.13		
Fe <sub>0.60</sub> Ni <sub>0.40</sub>	3.585	0.90	0.28	-2.0		-0.10		
Fe <sub>0.575</sub> Ni <sub>0.425</sub>	3.585	0.90	0.28	-1.7		-0.08		
Fe <sub>0.548</sub> Ni <sub>0.452</sub>	3.585	0.90	0.28	-1.3		-0.06		
Fe <sub>0.65</sub> Ni <sub>0.35</sub>	3.585	0.90	0.28	-(4.1 ÷ 4.2)	0.9 ÷ 1.2	-(0.20 ÷ 0.21)	0.04 ÷ 0.06	-(0.14 ÷ 0.17)
Fe <sub>0.65</sub> (Ni <sub>0.96</sub> Mn <sub>0.04</sub> ) <sub>0.35</sub>	3.585	0.90	0.28	-4.0	0.9 ÷ 1.1	-0.20	0.04 ÷ 0.06	-(0.14 ÷ 0.16)
Fe <sub>0.65</sub> (Ni <sub>0.91</sub> Mn <sub>0.09</sub> ) <sub>0.35</sub>	3.585	0.90	0.28	-3.9	0.9 ÷ 1.1	-0.20	0.04 ÷ 0.06	-(0.14 ÷ 0.16)
Fe <sub>0.65</sub> (Ni <sub>0.87</sub> Mn <sub>0.13</sub> ) <sub>0.35</sub>	3.585	0.90	0.28	-3.8	0.9 ÷ 1.1	-0.19	0.04 ÷ 0.06	-(0.13 ÷ 0.15)
Fe <sub>0.72</sub> Pt <sub>0.28</sub> (S = 0)	3.749	0.79	0.31	-(8.6 ÷ 8.9)	0.7 ÷ 1.0	-(0.42 ÷ 0.44)	0.03 ÷ 0.05	-(0.37 ÷ 0.41)
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> (S = 0.85)	3.73	0.80	0.29	-(7.4 ÷ 7.5)	0.7 ÷ 1.0	-(0.34 ÷ 0.35)	0.03 ÷ 0.05	-(0.29 ÷ 0.32)
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> (S = 0.70)	3.73	0.80	0.29	-(12.0 ÷ 12.2)	0.7 ÷ 1.0	-(0.56 ÷ 0.57)	0.03 ÷ 0.05	-(0.51 ÷ 0.54)
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> (S = 0.60)	3.73	0.80	0.29	-(10.2 ÷ 10.3)	0.7 ÷ 1.0	-(0.47 ÷ 0.48)	0.03 ÷ 0.05	-(0.42 ÷ 0.45)
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> (S = 0.55)	3.73	0.80	0.29	-(10.8 ÷ 11.0)	0.7 ÷ 1.0	-(0.50 ÷ 0.51)	0.03 ÷ 0.05	-(0.45 ÷ 0.48)
Fe <sub>0.75</sub> Pt <sub>0.25</sub> (S = 0.40)	3.73	0.80	0.29	-(10.2 ÷ 10.4)	0.7 ÷ 1.0	-(0.47 ÷ 0.48)	0.03 ÷ 0.05	-(0.42 ÷ 0.45)

Из данных табл.2 следует сравнительно слабое влияние тепловых фононов на магнитные свойства никеля и железа, для которых параметр  $X$  не превышает нескольких процентов. Для сравнения укажем работу [24], в которой на основе модельных расчетов такое влияние оценивалось для железа на уровне 20%.

Значительно существеннее роль тепловых фононов в магнитных свойствах инварных железо-никелевых и тройных железо-никель-марганцевых сплавов, для которых в зависимости от состава сплава параметр  $X$  достигает  $-(13 \div 18)\%$ .

Особенно сильное влияние тепловых фононов на магнитные свойства обнаружено в инварных железо-платиновых сплавах. Так, для неупорядоченного сплава  $Fe_{0.72}Pt_{0.28}$  имеем  $X \simeq -40\%$ , а для сплава  $Fe_{0.75}Pt_{0.25}$  параметр  $X$  изменяется в пределах от  $-30\%$  до  $-50\%$  в зависимости от степени упорядочения сплава. Можно утверждать, что такой большой эффект представляется аномальным.

Предложенный и проведенный здесь подход указывает на те экспериментально измеряемые параметры, использование которых может позволить выявить другие ферромагнитные материалы с аномально сильным влиянием тепловых фононов на магнитные свойства.

Работа выполнена в рамках проекта 96-02-17318-а Российского фонда фундаментальных исследований.

1. D.J.Kim, Phys. Rep. **171**, 129 (1988).
2. В.М.Зверев, В.П.Силин, ЖЭТФ **93**, 709 (1987).
3. В.М.Зверев, В.П.Силин, ФММ **65**, 895 (1988).
4. В.М.Зверев, В.П.Силин, ФТТ **30**, 1989 (1988).
5. V.M.Zverev and V.P.Silin, Physica B **159**, 43 (1989).
6. V.P.Silin and V.M.Zverev, Phys. Lett. A **184**, 315 (1994).
7. G.A.Alers, J.R.Neighbours, and H.Sato, J. Phys. Chem. Solids **13**, 40 (1960).
8. D.J.Dever, J. Appl. Phys. **43**, 3293 (1972).
9. G.Hausch and H.Warlimont, Acta Metallurgica **21**, 401 (1973).
10. M.Shiga, K.Makita, K.Uematsu et al., Phys.: Condens. Matter **2**, 1239 (1990).
11. G.Hausch, J. Phys. Soc. Japan **37**, 819 (1974).
12. H.C.Ling and W.S.Owen, Acta Metallurgica **31**, 1343 (1983).
13. Ll.Mañosa, G.A.Saunders, H.Rahdi et al., Phys. Rev. B **45**, 2224 (1992).
14. K.Sumiyama, M.Shiga, Y.Murioka et al., J. Phys. F: Metal Phys. **9**, 1665 (1979).
15. S.Ishio and M.Takahashi, J. Magn. Magn. Mater. **50**, 271 (1985).
16. J.Crangle and G.C.Hallam, Proc. Roy. Soc. **272**, 119 (1963).
17. J.Crangle and G.M.Goodman, Proc. Roy. Soc. A **321**, 477 (1971).
18. K.Sumiyama, M.Shiga, and Y.Nakamura, J. Phys. Soc. Japan **40**, 996 (1976).
19. M.Shiga, J. Phys. Soc. Japan **22**, 539 (1967).
20. S.Arajs and D.S.Miller, J. Appl. Phys. **31**, 986 (1960).
21. S.Arajs and R.V.Colvin, J. Phys. Chem. Solids **24**, 1233 (1963).
22. J.S.Kouvel and R.H.Wilson, J. Appl. Phys. **32**, 435 (1961).
23. K.Sumiyama, M.Shiga, and Y.Nakamura, J. Phys. Soc. Japan **48**, 1393 (1980).
24. E.A.Turov and V.I.Grebennikov, Physica B **159**, 56 (1989).