

УДК 669.018:548.76

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. И. ГОМАНЬКОВ, Е. В. КОЗИС, Б. Н. МОХОВ

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЕВЫХ ИНВАРОВ

(Представлено академиком Г. В. Курдюмовым 30 VI 1975)

Магнитная неоднородность железо-никелевых инваров определяет аномальное поведение многих физических свойств этих сплавов и, в частности, концентрационную и температурную зависимость среднего атомного магнитного момента $\bar{\mu}$. Однако характер неоднородности до сих пор однозначно не определен и в настоящей работе магнитная структура инваров исследована методами магнитного рассеяния тепловых нейтронов.

Малоугловое магнитное диффузное рассеяние нейтронов от закаленных поликристаллов с содержанием Ni от 40 до 32% естественного изотопического состава изучалось на нейтронном дифрактометре с $\lambda = 1,59 \text{ \AA}$ в интервале углов $0,1 \leq S \leq 1,0$ ($S = 4\pi(\sin \theta)/\lambda$) при 90° К. Образцы строго одинакового диаметра 7 мм и высоты 60 мм содержат общее количество примесей не более 0,1 ат.%. Так как мартенситное превращение в образце с 32% Ni не наблюдалось и при 4,2° К, по-видимому, из-за примесей Mn и Si, то этот сплав исследован также при 4,2° К. Интенсивности малоуглового магнитного рассеяния нейтронов получены вычитанием рассеяния железо-никелевого образца с 55% Ni из интенсивностей рассеяния инварного образца после соответствующей нормировки при $S > 0,6$. При практически равных амплитудах ядерного рассеяния Fe и Ni таким способом вычитаются все виды ядерного рассеяния, магнитное многократное рассеяние и магнитное рассеяние, обусловленное близким атомным порядком, сохранившимся в закаленных сплавах ⁽¹⁾. Последний тип рассеяния учитывается в сечениях диффузного магнитного рассеяния с помощью интерполяции данных ⁽²⁾. Для расчета магнитных сечений малоуглового рассеяния нейтронов используется рассеяние от эталонного образца ванадия.

Дифракция нейтронов на монокристалле (шарик диаметром 9 мм) с 35% Ni изучалась при 4,2 и 300° К на нейтронном дифрактометре с $\lambda = 1,07 \text{ \AA}$. Измерения интенсивностей нейтронов проведены в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ в интервале углов $6 \leq 2\theta \leq 40^\circ$ и $8 \leq 2\theta \leq 55^\circ$, соответственно. Температуру образцов контролировали термпарой золото (кобальт) — медь.

На рис. 1а представлены дифференциальные сечения рассеяния в зависимости от S , полученные при 90° К. Учет лауэвского магнитного рассеяния по данным ⁽²⁾ повышает значения $d\sigma/d\Omega$ на 0,025—0,030 барн в зависимости от состава сплава. Крутой подъем точек при $S \leq 0,1$ обусловлен в основном неупругим рассеянием на спиновых волнах, для которого существует критическое значение S_c , зависящее от λ и $(T_c - T)$, где T_c — температура Кюри. Оценка, проведенная аналогично ⁽³⁾, для сплава с 35% дает значение $S_c = 0,052$.

Угловая зависимость $d\sigma/d\Omega$ на рис. 1а характерна для сплавов, в которых возникает магнитная неоднородность матрицы вокруг примесных

атомов. Тогда, согласно ⁽⁴⁾

$$d\sigma/d\Omega = 0,0486 \cdot C(1-C) [M(S)]^2, \quad (1)$$

где C — концентрация примеси, а

$$M(S) = \int_V \rho(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{S}\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

есть Фурье-преобразование плотности возмущения магнитного момента.

Линейная зависимость $(d\sigma/d\Omega)^{-1/2}$ от S^2 при малых S , показанная на рис. 1б, указывает, что $M(S)$ описывается лорентцианом вида $M(S) = M(0)/(1+\kappa^{-2}S^2)$, где κ — обратный параметр протяженности возмущения.

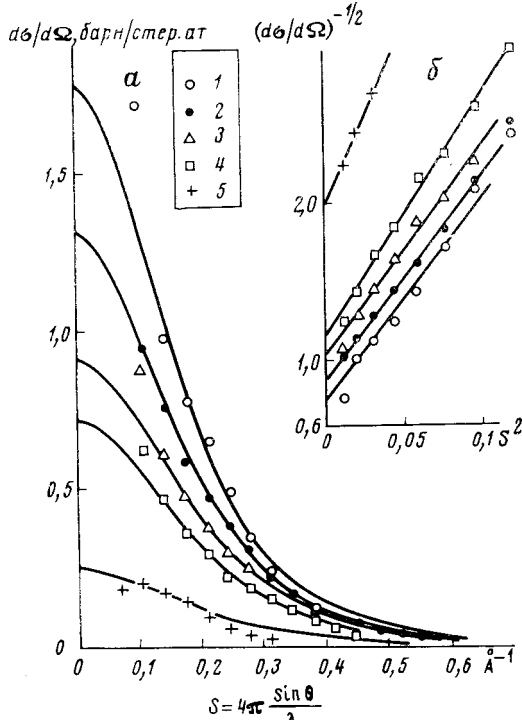


Рис. 1

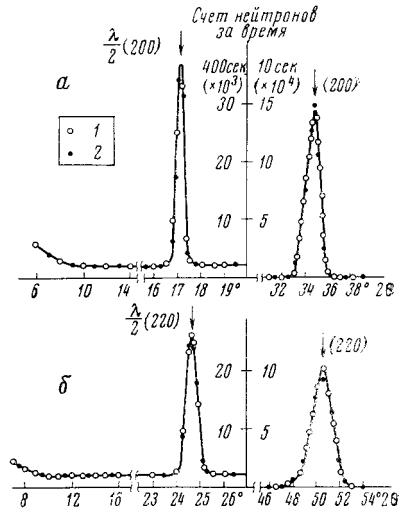


Рис. 2

Рис. 1. а — сечение малоуглового магнитного рассеяния нейтронов на инварных сплавах: 1 — 32% Ni, 2 — 34% Ni, 3 — 35% Ni, 4 — 36% Ni, 5 — 38% Ni; б — зависимость $(d\sigma/d\Omega)^{-1/2}$ от S^2

Рис. 2. Нейтронограммы монокристалла с 35% Ni: а — направление $\langle 100 \rangle$, б — направление $\langle 110 \rangle$. $T=4,2^\circ \text{ K}$ (1); 300° K (2)

ния. На рис. 1б по $(d\sigma/d\Omega)_0$ при $S=0$ и κ рассчитываются зависимости $d\sigma/d\Omega$ от S , которые представлены на рис. 1а сплошными кривыми и наилучшим образом соответствуют экспериментальным точкам. Значения $(d\sigma/d\Omega)_0$ и κ , полученные при 90° K , приведены в табл. 1. Измерения при $4,2^\circ$ даны в последней строке.

Линейный рост $(d\sigma/d\Omega)_0$ и κ при увеличении концентрации атомов Fe в сплаве свидетельствуют, что возмущение моментов матрицы, создаваемое каждой добавочной примесью, не зависит от уже существующих возмущений. При этом падение $\bar{\mu}$ и изменение знака $d\bar{\mu}/dC$ (5) указывает на

отрицательный характер возмущений. Учитывая размеры неоднородностей, оцененные по малоугловому рассеянию нейтронов в приближении Гинье ⁽¹⁾, следует считать, что концентрации возмущающих примесей достаточно малы. Тогда можно предположить, что центрами возмущений являются атомы Fe, окруженные только атомами Fe в первой координационной сфере. Концентрации таких атомов, рассчитанные с учетом ближнего атомного порядка ⁽⁴⁾, а также значения суммарного уменьшения магнитного момента в области возмущения $M(0)$ представлены в табл. 1.

Значение магнитного момента на примесном атоме Fe не определяется с помощью настоящей методики и предполагается близким к 0 или даже имеет небольшую отрицательную величину ⁽⁸⁾.

Таблица 1

Содержание Ni, ат. %	$(d\sigma/d\Omega)_0$, барн/стер. ат.	χ , А	C, %	$M(0)$, μ_B
40	$0,039 \pm 0,008$	0,38	0,09	30 ± 3
38	$0,250 \pm 0,025$	0,34	0,15	58 ± 3
36	$0,718 \pm 0,072$	0,29	0,25	78 ± 4
35	$0,907 \pm 0,091$	0,28	0,31	77 ± 4
34	$1,321 \pm 0,13$	0,26	0,39	84 ± 4
32	$1,778 \pm 0,18$	0,22	0,61	78 ± 4
32	$1,410 \pm 0,14$	0,24	0,61	69 ± 4

Зависимость $(d\sigma/d\Omega)_0$ от концентрации Ni в табл. 1 содержит и температурное изменение $M(0)$, присущее ферромагнитной системе с немагнитными примесями ⁽⁷⁾. На это указывают значения $(d\sigma/d\Omega)_0$ сплава с 32% Ni, измеренные при двух температурах, а также сравнение $(d\sigma/d\Omega)_0$ с данными ⁽³⁾, полученными для сплава с 35% Ni при 300° К. При низких температурах изменение $M(0)$ определяется в основном температурной зависимостью $(T_c - T)^{-4/3}$ ⁽⁷⁾, поэтому температурный вклад при 90° К существен для сплавов с 32 и 34% Ni и резко уменьшен в сплавах с большим содержанием Ni.

Таким образом, магнитная неоднородность ферромагнитной матрицы в исследованных инварах создается областями с пониженными значениями атомных магнитных моментов вокруг кластеров, состоящих только из атомов Fe в пределах первой координационной сферы.

В сплавах с содержанием Ni менее 22%, когда концентрация возмущающих центров становится более 4% и области возмущения сильно перекрываются, по-видимому, возможно образование дальнего антиферромагнитного порядка типа γ -Fe ⁽⁸⁾. Непосредственное исследование таких сплавов при 4,2° К невозможно из-за мартенситного превращения, но можно полагать, что при этих составах в антиферромагнитной матрице, в свою очередь, образуются области магнитной поляризации вокруг ферромагнитных центров и $(d\sigma/d\Omega)_0$ запишется как ⁽⁴⁾

$$(d\sigma/d\Omega)_0 = 0,0486 \cdot C' (1 - C') [M_i + M_h]^2, \quad (2)$$

где C' — концентрация облаков магнитной поляризации, M_i — $3d$ -момент в центре облака, следующий обычному $3d$ -форм-фактору и M_h — момент, индуцированный в матрице с форм-фактором $f = (1 + \chi^{-2} S^2)^{-1}$. Полагая, что при малых C' , $\bar{\mu} = C' (M_i + M_h)$, из уравнения (2) и данных ⁽⁵⁾ рассчитываются значения $C' = 7,2\%$ и $M_i + M_h = 20,8 \mu_B$ для сплава с 32% Ni при 4,2° К.

Значения C' указывают, что области магнитной поляризации должны сильно перекрываться. Поэтому нелинейные эффекты перекрытия делают приведенный выше анализ рассеяния на сплаве с 32% Ni качественным. Однако значение C' близко к рассчитанной по биномиальному распределению концентрации кластеров, содержащих от 7 до 12 атомов Ni в бли-

жайшем окружении атома Fe. Возможно, что эти образования и являются зародышами ферромагнетизма в инварах при содержании Ni около 20%, как предполагается в работе ⁽⁹⁾.

Низкие значения *C* (табл. 1) должны исключать существование дальнего антиферромагнитного порядка в сплавах исследованного состава. Действительно, на рис. 2 представлены нейтронограммы монокристалла с 35% Ni, полученные при 4,2 и 300° К. В пределах статистической ошибки измерений, дифракционные картины для обеих температур совпадают. Статистическая погрешность фона понижена до 1% при повторных измерениях. Обращает внимание отсутствие отражений на углах $2\theta < 25^\circ$ в направлении $\langle 110 \rangle$. Это значит, что в сплаве нет дальнего антиферромагнитного порядка, предполагаемого в работе ⁽¹⁰⁾ с температурой Нееля 15° К.

На нейтронограммах присутствуют отражения $\frac{\lambda}{2}(200)$ и $\frac{\lambda}{2}(220)$,

обусловленные наличием в спектре нейтронов с $\lambda/2$ и совпадающие с положениями антиферромагнитных отражений γ -Fe ⁽⁸⁾. В табл. 2 приве-

Т а б л и ц а 2

<i>T</i> , °К	$\frac{I_{\lambda/2}(200)}{I(200)}$, %	$\frac{I_{\lambda/2}(220)}{I(220)}$, %
4.2	0,19±0,01	0,17±0,01
300	0,21±0,01	0,17±0,01

дены отношения интегральных интенсивностей соответствующих отражений, в зависимости от температуры без учета экстинкции. Из табл. 2 видно, что отношение интегральных интенсивностей остается неизменным и равно вкладу компоненты $\lambda/2$ в интенсивность первичного пучка ⁽¹¹⁾. Возможные типы дальнего

антиферромагнитного порядка могут наблюдаться только в пределах указанной погрешности измерений.

Из полученных результатов следует вывод об отсутствии (в пределах указанной выше чувствительности) дальнего антиферромагнитного порядка в классическом инваре, что поддерживает оценки *C* в табл. 1. Однако если неферромагнитные примеси Fe в центрах областей с пониженными значениями магнитных моментов в исследованных сплавах обладают магнитным моментом, ориентированным противоположно моментам окружающих атомов, то может образоваться ближний антиферромагнитный порядок, который трудно наблюдаем при приведенных в табл. 1 концентрациях примесей.

В исследованных составах наблюдается атомное упорядочение по типу Ni₃Fe с низкими значениями параметров ближнего порядка ⁽¹⁾. В предложенной модели их влияние на магнитную структуру инваров сводится к небольшому изменению концентрации возмущающих кластеров.

Центральный научно-исследовательский
институт черной металлургии
им. И. П. Бардина
Москва

Поступило
25 VI 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Гоманьков, Е. В. Козис, Е. И. Мальцев. Тр. Международн. конфер. по магнетизму МКМ-73, т. 3, 160 (1974). ² M. F. Collins, R. V. Jones, R. D. Lowde, J. Phys. Soc. Japan, v. 17, Suppl. B III, 19 (1962). ³ S. Komura, G. Lippman, W. Schmatz, J. Appl. Cryst., v. 7, 233 (1974). ⁴ G. G. Low, Adv. Phys., v. 18, № 74, 371 (1969). ⁵ J. Crangle, G. C. Hallam, Proc. Roy. Soc. A, v. 272, 119 (1963). ⁶ В. А. Макаров, И. М. Пузей и др., ЖЭТФ, т. 67, 771 (1974). ⁷ S. W. Lovesey, W. Marshall, Proc. Phys. Soc., v. 86, 613 (1966). ⁸ S. C. Abrahams, L. Guttman, J. S. Kasper, Phys. Rev., v. 127, 2052 (1962). ⁹ B. Window, J. Appl. Phys., v. 44, № 6, 2853 (1973). ¹⁰ С. Ф. Дубинин, С. К. Сидоров и др., ЖЭТФ, т. 18, 550 (1973). ¹¹ В. И. Гоманьков, Д. Ф. Литвин и др., ФММ, т. 14, 26 (1962).