

СОСУЩЕСТВОВАНИЕ ФЕРРО- И АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В ИНВАРНЫХ ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ

С.Ф. Дубинин, С.К. Сидоров, С.П. Теплоухов,
В.Е. Архипов.

Нейтроннографическим методом исследовалась магнитная структура неупорядоченного сплава $Fe_{0,63}Ni_{0,37}$. Впервые было показано, что при температуре жидкого железа наряду с обычным ферромагнитным порядком, имеет место антиферромагнитное упорядочение типа $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0)$. По температурной зависимости пиковой интенсивности антиферромагнитного рефлекса была измерена точка Нееля $T_N = 15^\circ K$. Результаты измерений интерпретируются в рамках неколлинеарной магнитной структуры.

Для объяснения явления инварности Кондорский [1] высказал гипотезу о том, что в ферромагнитных сплавах Fe-Ni с ГЦК кристаллической решеткой обменные интегралы удовлетворяют условию:

$$I_{11} > 0; \quad I_{12} > 0; \quad I_{22} < 0, \quad (1)$$

где индексом 1 обозначены атомы никеля, а индексом 2 атомы железа. В [2] эта гипотеза нашла экспериментальные подтверждения.

На основе предложенной в [3] модели неколлинеарной магнитной структуры для бинарных неупорядоченных сплавов, в которых обменные интегралы удовлетворяют условию (1), удалось объяснить наблюдающиеся в сплавах Fe-Ni аномальные концентрационные зависимости среднего магнитного момента на атом сплава при $0^\circ K$ [4], температуры Кюри [5] и малоуглового рассеяния нейтронов [6], а также температурные зависимости намагниченности и коэффициента линейного расширения [5].

Эта модель позволяет предположить, что в инварных сплавах при низких температурах (так как I_{22} существенно меньше I_{11} и I_{12}) возможно сосуществование ферро- и антиферромагнитного дальнего порядка, при котором средние значения проекции магнитного момента на направление спонтанной намагниченности образуют ферромагнитную структуру, а проекции магнитного момента на перпендикулярное направление - антиферромагнитную структуру.

О наличии антиферромагнитного превращения в инварных сплавах Fe-Ni косвенно свидетельствуют также данные работы [7].

Для экспериментального подтверждения высказанного предположения нами было проведено нейтроннографическое исследование неупорядоченного сплава Fe-Ni с содержанием 63 ат% Fe в температурном интервале от 4,2 до $30^\circ K$ по методике, описанной в [8].

Длина волны нейтронов, полученных отражением от свинцового кристалла-монокроматора, составляла $\lambda = 1,07 \text{ \AA}$. Примесь нейтронов с $\lambda/2$ и $\lambda/3$ были соответственно 0,5 и 0,25%.

На рис. 1, б приведен рефлекс, полученный с образца при температуре 4,2°K. (На нейтронограмме, снятой при комнатной температуре, этот рефлекс полностью отсутствует). Для сравнения его относительной интенсивности на рис. 1, а приведен пик (111), имеющий вклад ядерного и ферромагнитного рассеяния. Как видно из рис. 1, а на котором приведена температурная зависимость пиковой интенсивности первого рефлекса, интенсивность уменьшается более чем на половину при температуре 15°K, а затем слабо падает с ростом температуры.

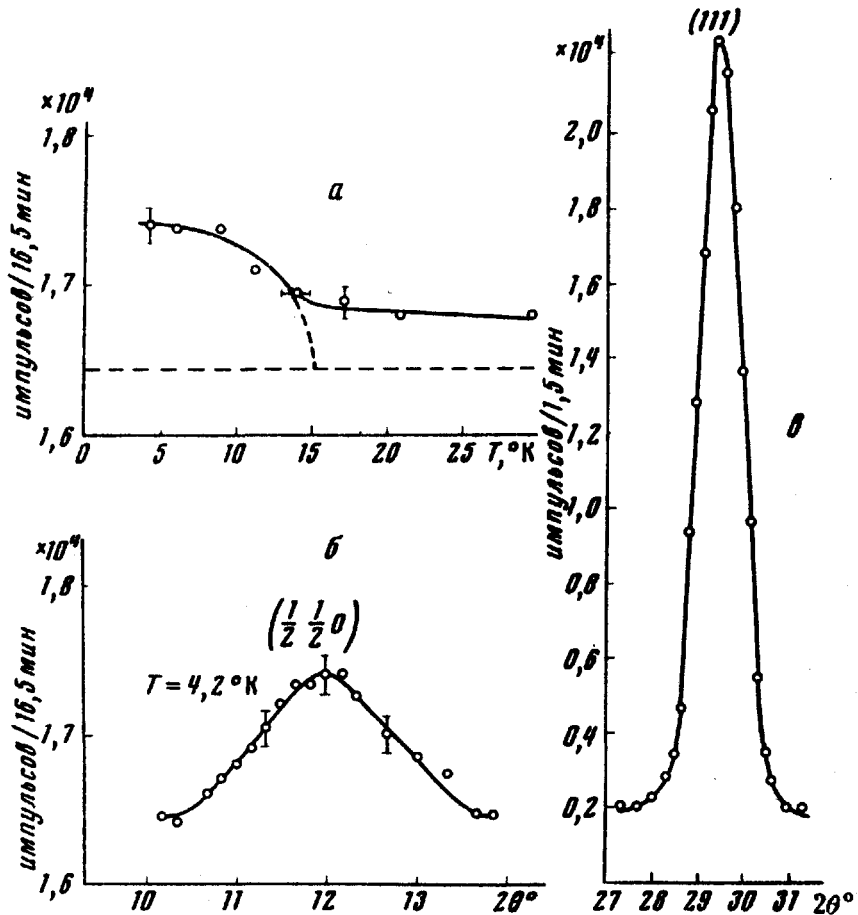


Рис. 1. а – Температурная зависимость пиковой интенсивности рефлекса $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$, б – рефлекс $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ при $T = 4,2^\circ\text{K}$, в – рефлекс (111) при $T = 4,2^\circ\text{K}$

По нашему мнению, рефлекс, изображенный на рис. 1, б имеет антиферромагнитное происхождение. В пользу антиферромагнитной природы этого рефлекса свидетельствует зависимость его интенсивности от температуры с точкой перехода около 15°K, а также угловое положение, соответствующее большому межплоскостному расстоянию, что может

быть связано с кратным увеличением магнитной элементарной ячейки по сравнению с кристаллохимической.

Наиболее хорошее согласие с экспериментальными данными наблюдается для удвоенной по направлениям x и y магнитной элементарной ячейки, изображенной на рис. 2.

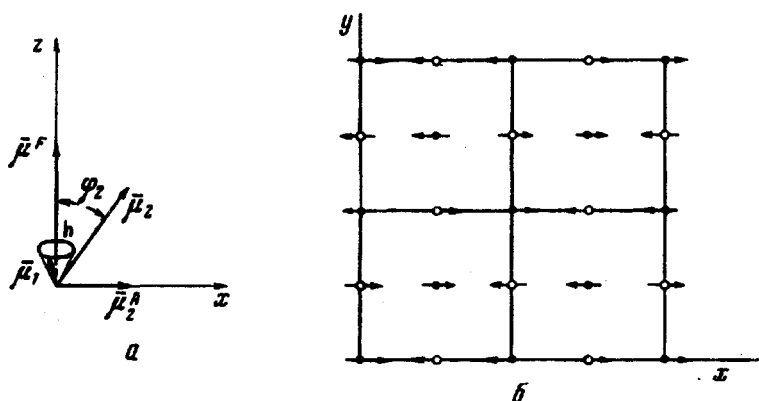


Рис. 2. *a* — Ориентация средних значений магнитных моментов железа и никеля относительно z — направления в узле 000, *б* — антиферромагнитное упорядочение четвертого рода для перпендикулярных составляющих магнитных моментов железа. Зачерненные кружки относятся к атомам на уровне $z = 0$, а незачерненные к атомам на уровне $z = 1/2a$

Слагающие магнитных моментов 1 и 2 на направление z образуют ферромагнитный порядок и в силу их эквивалентности по всем узлам на рис. 2, *a* условно изображены их величина и направление только в начале координат. В соответствии с [3, 4] среднее (по всем узлам кристаллической решетки) значение z — проекции магнитного момента сплава при 0°K можно записать в виде:

$$\bar{\mu}^F = \cos \phi_1 (1 - c) \mu_1 + \cos \phi_2 c \mu_2 = \cos \phi_1 \bar{\mu}_1 + \cos \phi_2 \bar{\mu}_2, \quad (2)$$

где c — концентрация атомов 2 в сплаве, равная вероятности замещения узла решетки атомов 2; $\mu_1 = 0,6 \mu_B$ и $\mu_2 = 2,8 \mu_B$ — магнитные моменты атомов никеля и железа соответственно; ϕ_1 и ϕ_2 — эффективные углы, на которые отклоняются магнитные моменты атомов Ni и Fe от направления спонтанной намагниченности, способ вычисления которых приведен, например, в [4].

Как видно из таблицы, экспериментальные значения $\bar{\mu}^F$ и температуры Кюри сплава — T_c (приведенной к температуре Кюри никеля — T_1), определенные из данных по намагниченности насыщения, хорошо согласуются с расчетными значениями вычисленными по формуле (2) и по формуле (14) из [5].

Физ. св-во	$\bar{\mu}^F, \mu_B$	T_c / T_1	$\bar{\mu}_2^A, \mu_B$	T_N / T_1
Расчет	1,75	1,0	0,85	$\approx 0,05$
Эксперим.	$1,72 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,05$	$0,63 \pm 0,20$	$0,024 \pm 0,002$

Перпендикулярные составляющие магнитных моментов атомов железа, как видно из рис. 2, б образуют антиферромагнитное упорядочение четвертого рода в ГЦК решетке.

Перпендикулярные составляющие магнитных моментов атомов никеля, по-видимому, не должны образовывать антиферромагнитного порядка. Так как любое правильное расположение их относительно соответствующих проекций моментов железа, в силу условий (1), существенно понижает температуру Нееля, а значит является энергетически невыгодным.

Направление антиферромагнитного вектора было выбрано вдоль [100], так как согласно [9] последующие разрешенные рефлексы $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 1)$ и $(\frac{1}{2} \frac{3}{2} 0)$ в этом случае должны быть значительно слабее рефлекса $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0)$ в соответствии с экспериментальными данными.

Величина антиферромагнитной составляющей магнитного момента, определенная из интенсивности рефлекса $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0)$ удовлетворительно согласуется с расчетным значением $\bar{\mu}_2^A = \sin \phi_2 c \mu_2$ (см. таблицу).

Нетрудно записать приведенное выражение температуры Нееля для структуры, изображенной на рис. 2, б.

$$T_N/T_1 = -c \sin \phi_2 \frac{S_2(S_2+1)}{S_1(S_1+1)} \frac{2}{3} \frac{\gamma_{22}}{\gamma_{11}}, \quad (3)$$

где $c \sin \phi_2$ — эффективная доля атомов сорта 2, имеющих спин $S_2 = 3/2$; $S_1 = 1/2$ — спин атомов никеля; множитель $\frac{2}{3}$ учитывает, то что из шести магнитных моментов во второй координационной сфере четыре направлены антипараллельно, а два параллельно моменту, расположенному в начале координат; γ_{22}/γ_{11} отношение констант молекулярного поля, значение которого приближенно может быть взято из [5] равным $-0,05$.

Как видно из таблицы, расчетное значение T_N/T_1 качественно согласуется с наблюдаемым на эксперименте.

Институт физики металлов
Академии наук СССР УНЦ

Поступила в редакцию
17 сентября 1973 г.

Литература

- [1] Е.И.Кондорский. ЖЭТФ, 37, 1879, 1959.
- [2] M.Hatherly, K.Hirakawa, R.D.Lowde, J.F. Mallet, M.W.Stringfellow. Proc. Roy. Soc., 84, 55, 1964.
- [3] С.К.Сидоров, А.В.Дорошенко. ФММ, 18, 811, 1964; Phys. Stat sol., 16, 737, 1966.
- [4] С.К.Сидоров, А.В.Дорошенко. ФММ, 19, 786, 1965.

- [5] С.Ф.Дубинин, С.К.Сидоров, Э.З.Валиев. *Phys. stat sol (b)*, **46**, 337, 1971.
- [6] В.Е.Архипов, А.З.Меньшиков, С.К.Сидоров. *Письма в ЖЭТФ*, **12**, 356, 1970.
- [7] В.Л.Седов. *Письма в ЖЭТФ*, **14**, 499, 1971.
- [8] K.Hirakawa, H.Ikeda. *J. of Appl. Phys.*, **11**, 82, 1972.
- [9] L.M.Corliss, N.Elliott, J.M.Hastings. *Phys. Rev.*, **117**, 929, 1960.
-