

## СМЕШАННОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ГЦК ЖЕЛЕЗО-ПАЛЛАДИЕВЫХ СИЛАВАХ

А. З. Меньшиков, С. К. Сидоров, И. Н. Кузьмин

Метод малоуглового неупругого рассеяния нейтронов на спиновых волнах, основанный на измерении граничного угла рассеяния ( $\theta_0$ ) [1, 2], позволяет определить знак и величину интегралов обменного взаимодействия между различными парами атомов в сплавах. Впервые возможности этого метода были продемонстрированы на примере железо-никелевых сплавов с ГЦК решеткой [2], где удалось экспериментально доказать предполагавшееся ранее [3] антиферромагнитное взаимодействие между атомами железа.

Известно, что железо-палладиевые сплавы проявляют свойства во многом аналогичные железо-никелевым. В частности, они также являются инварными. В связи с этим представляло интерес изучить параметры обменного взаимодействия в этой системе.

В настоящей работе проведено полное исследование малоуглового неупругого магнитного рассеяния на спиновых волнах в концентрированных железо-палладиевых сплавах следующих составов: 25, 40, 50, 55, 60, 64, 66, 68 ат.% железа в палладии. Сплавы выплавлялись из чистых компонентов в вакууме и проходили гомогенизирующий отжиг в течение 100 час. Для получения разупорядоченного состояния сплавы истирались в порошок, который затем прессовался в таблетки диаметром 20 мм и толщиной 3 - 5 мм. Порошки, в которых образовывалась мартенсит деформации, закаливались в масле от 1100 °С для получения однофазного состояния. Исследование рентгеновского диффузного фона на месте сверхструктурных рефлексов показало отсутствие в образцах какого-либо дальнего порядка. Однако ближний порядок сохранился.

Нейтронное исследование проводилось на установке, которая была смонтирована на одном из касательных каналов реактора ИВВ-2. Изменилась угловая зависимость разности счета рассеянных нейтронов от образца, в котором намагничивающее поле было направлено параллельно и перпендикулярно вектору рассеяния. Использовался белый пучок нейтронов, который имел расходимость порядка 12 угловых минут. Отсечение быстрых нейтронов проводилось с помощью кварцевого фильтра. Расстояние между образцом и счетчиком составляло порядка 2,7 м. Счетчик перемещался перпендикулярно оптической оси установки на подвижном столике, фиксация которого осуществлялась с точностью 0,15 угловых минут. Измерения проводились при трех температурах: кипящего азота, комнатной, кипящей воды и трех магнитных полях: 2,5; 5,0 и 10 кэ. Величина граничного угла оценивалась по середине спада угловой зависимости  $I_{11-L}$ . Чтобы исключить влияние расходимости пучка нейтронов было проведено исправление экспериментальной кривой на аппаратурные искажения дисперсионной формы и пока-

зино, что середина спада кривой  $I_{II-1}$  хорошо соответствует резкому обрыву исправленной кривой.

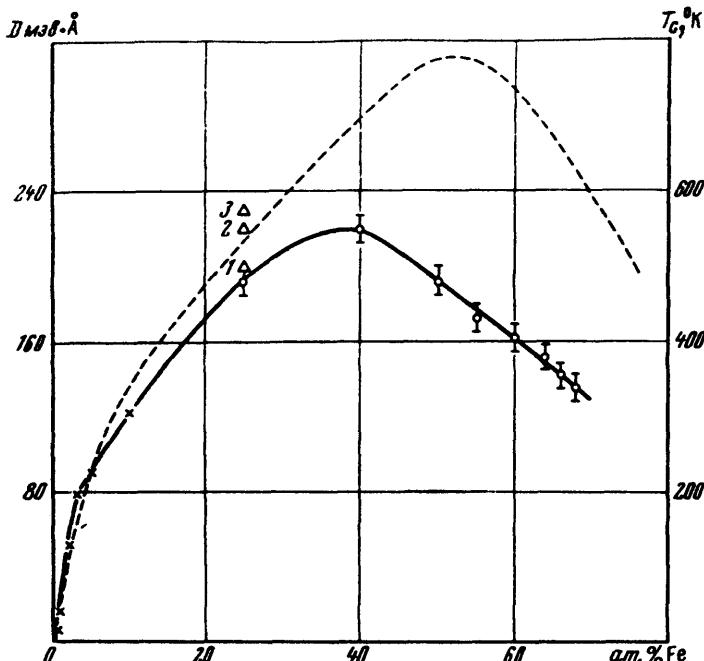


Рис. 1. Концентрационная зависимость коэффициента  $D$  железо-палладиевых сплавов:  $\Phi$  – данные настоящей работы,  $\times$  – данные Стингфеллоу [4],  $\Delta$  – данные работы [6] для различных степеней порядка: 1 –  $\eta = 0,3$ ; 2 –  $\eta = 0,5$ ; 3 –  $\eta = 1,0$ . Пунктиром показана зависимость точки Кюри от концентрации по данным [7], которая также как и  $D$  зависит от  $I_{\text{эфф}}$

В приближении квадратичного закона дисперсии спиновых волн ( $E = Dq^2$ ) граничный угол  $\theta_0$ , не зависящий от длины волны рассеяния нейтронов связан с коэффициентом  $D$  следующим образом:

$$\sin \theta_0 = \frac{\hbar^2}{2m_0 D}, \quad (1)$$

где  $m_0$  – масса нейтрона,  $q$  – волновой вектор. Для вычисления  $D$  использовались значения  $\theta_0$ , экстраполированные на нуль магнитного поля и нуль температуры [2]. Полученные величины представлены на рис. 1 светлыми кружками. Там же показаны крестиками коэффициенты  $D$  из работы [4], измеренные этим же методом для сплавов с концентрацией железа в палладии до 10 ат%. Треугольниками изображены значения  $D$  для сплава  $Pd_3Fe$  с различной степенью дальнего порядка, рассчитанные в [5, 6] из кривых дисперсии магнитного спектра, снятых с помощью трехкристального спектрометра. Как видно наши данные находятся в хорошей взаимосвязи с предыдущими исследованиями.

В приближении только ближайших соседей и совершенно разупорядоченных сплавов можно записать, что

$$D = \frac{1}{3} Z R_n^2 I_{\text{эфф}} \bar{S} \quad (2)$$

и

$$I_{\text{эфф}} \bar{S}^2 = I_{11} S_1^2 (1 - c)^2 + 2 I_{12} S_1 S_2 c (1 - c) + I_{22} S_2^2 c^2, \quad (3)$$

где  $\bar{S} = S_1(1 - c) + S_2 c$  и  $S_1, S_2$  – атомные спины палладия (первого сорта) и железа (второго сорта),  $I_{11}, I_{12}, I_{22}$  – обменные интегралы между атомами, находящимися на ближайших расстояниях один от другого,  $c$  – концентрация атомов железа,  $Z$  – число ближайших соседей,  $R_n$  – радиус ближайшей координационной сферы. Выражения (2) и (3) позволяют определить обменные параметры по экспериментально измеренным значениям  $D$  и  $\bar{S}$ .

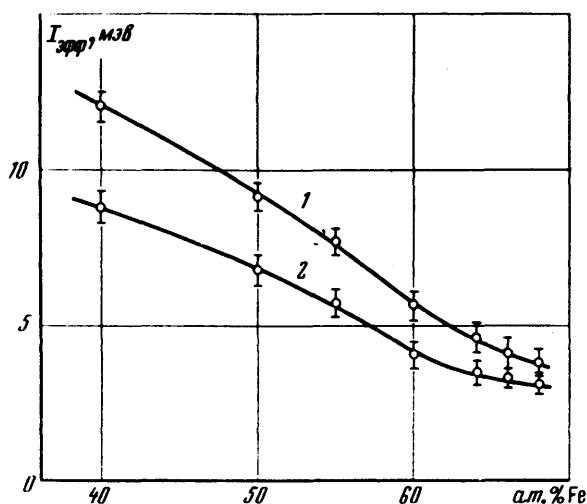


Рис. 2. Зависимость эффективного обменного интеграла от концентрации: 1 – для экспериментально измеренных атомных спинов  $S_1 = 0,18$ ;  $S_2 = 1,4$ ; 2 – для квантовых спинов  $S_1 = 1/2$  и  $S_2 = 3/2$

Из настоящих измерений были рассчитаны значения параметров обменного взаимодействия для железо-палладиевой системы методом наименьших квадратов с использованием всего ряда исследованных сплавов, за исключением первого с самым малым содержанием железа. Этот сплав, по-видимому, в большей степени примыкает к серии сплавов, с малыми примесями железа в палладии, исследованных Стрингфеллоу [4], для которых несправедлива формула (3) для вычисления  $I_{\text{эфф}}$  из-за наличия "гигантских" моментов.

Для значений атомных спинов  $S_1 = 0,18$  и  $S_2 = 1,4$ , взятых из экспериментальной зависимости среднего магнитного момента железо-палладиевых сплавов, измеренной нами и в работах [8, 9], получены следующие значения обменных параметров:

$$I_{11} = (47 \pm 5) \text{ мэв}, \quad I_{12} = (41 \pm 4) \text{ мэв} \quad \text{и} \quad I_{22} = -(1,0 \pm 0,1) \text{ мэв}.$$

Если принять квантовые значения спинов  $S_1 = 1/2$  и  $S_2 = 3/2$ , то величины обменных параметров изменятся следующим образом:

$$I_{11} = (7,5 \pm 0,5) \text{ мэв}, \quad I_{12} = (20 \pm 2) \text{ мэв} \quad \text{и} \quad I_{22} = -(2,1 \pm 0,2) \text{ мэв}.$$

Таким образом, в настоящей работе впервые показано, что в концентрированных железо-палладиевых сплавах с ГЦК решеткой имеется смешанное ферро- и антиферромагнитное взаимодействие между атомами. Также как и в железо-никелевых сплавах параметр обменного взаимодействия между атомами железа является отрицательным, но меньшим по абсолютной величине. Последнее обстоятельство хорошо объясняет тот факт, что средний магнитный момент в Fe - Pd сплавах начинает отклоняться от закона смешения при большей концентрации железа (70 ат%), чем в железо-никелевых сплавах (60 ат%) [10].

Авторы благодарят В.А.Торопова за помощь в создании экспериментальной установки.

Институт физики металлов  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
19 мая 1972 г.

### Литература

- [1] M.W.Stringfellow. A.E.R.E., Rep. R, 4335, 1966.
- [2] M.Hatherly, K.Hirakawa, R.Lowde, J.Mallett, M.Stringfellow, B.Torrie. Proc. Phys. Soc., 84, 55, 1964.
- [3] Е.И.Кондорский. ЖЭТФ, 35, 1579, 1958.
- [4] M.W.Stringfellow. J. Phys. C. (Proc. Phys. Soc.), 1, 1699, 1968.
- [5] B.Antonini, R. Medina, F.Menzinger. Solid State Communic., 9, 257, 1971.
- [6] F.Menzinger, F.Sacceti, R.Teichner. Solid State Communic., 9, 1579, 1971.
- [7] A.Kussman, K. Jessen. J. Phys. Soc. Japan, 17, 136, 1962.
- [8] H.Fujimori, H.Saito. J.Phys. Soc. Japan, 20, 293, 1965.
- [9] E.O.Wollan, J.W.Cable, W.C.Koehler, M.K.Wilkinson. J. Phys. Soc. Japan, 17, 111, 38, 1962.
- [10] А.З.Меньшиков, С.К.Сидоров, В.Е.Архипов. ЖЭТФ, 61, 311, 1971.