

## ВОЗВРАТНЫЙ ПЕРЕХОД АНТИФЕРРОМАГНЕТИК – СПИНОВОЕ СТЕКЛО В РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ГЦК-ЖЕЛЕЗА

Г.А. Такзей, А.М. Костышин, И.И. Сыч

В разупорядоченных ГЦК-сплавах FeNiCr обнаружен двойной температурный переход парамагнетик – антиферромагнетик – спиновое стекло.

Исследованию так называемых "возвратных" явлений в системах с конкурирующим обменом посвящено значительное количество работ. Однако в подавляющем большинстве случаев как теоретически, так и экспериментально изучались двойные температурные переходы "парамагнетик – ферромагнетик – спиновое стекло" (ПМ – ФМ – СС)<sup>1, 2</sup>. Некоторые расчеты, выполненные в гейзенберговской<sup>3</sup> и изинговской<sup>4</sup> моделях, показывают, что фаза типа СС может также возникать в результате эволюции магнитной структуры неупорядоченного антиферромагнетика (АФМ) при его охлаждении. Однако экспериментальные работы, в которых предпринимались попытки изучения переходов ПМ – АФМ – СС<sup>5–7</sup>, имеют эпизодический характер и не вносят должной ясности в рассматриваемый вопрос.

В настоящей работе на примере разупорядоченных АФМ сплавов системы  $\text{Fe}_{\text{C}}\text{Ni}_{80-\text{C}}\text{Cr}_{20}$  впервые показано, что в определенной области составов в нулевом магнитном поле действительно происходит двойной температурный переход ПМ – АФМ – СС. В сплавах, в которых случайный обмен играет менее существенную роль, такой переход возможен лишь в присутствие достаточно сильного магнитного поля.

Для выяснения возможности протекания температурного перехода ПМ – АФМ – СС использовалось одно из основных свойств СС – возникновение необратимых явлений ниже температуры  $T_f$  его замерзания. Для всех без исключения СС при временах измерения  $\sim 10^2$  с наблюдаются явления термомагнитной предыстории<sup>2</sup>, т. е. после охлаждения ниже  $T_f$  в магнитном поле (FC) намагниченность СС выше его намагниченности после охлаждения в нулевом поле (ZFC). Температура, при которой FC и ZFC намагниченности совпадают и является температурой  $T_f(H)$  замерзания в заданном магнитном поле<sup>3</sup>.

На рис. 1 в качестве примера приведены температурные зависимости ZFC (светлые точки) и FC (тёмные точки) намагниченности сплава  $Fe_{6.6}Ni_{1.4}Cr_{2.0}$ , полученные в магнитных полях различной напряженности. Видно, что, например, в поле  $H = 0.5$  кЭ ниже  $T = 11$  К возникает необратимость намагниченности. В соответствии со сказанным выше, данную температуру можно отождествить с температурой  $T_f$  замерзания СС при заданном  $H$ . По мере увеличения приложенного к образцу магнитного поля  $T_f$  монотонно возрастает (отмечено прерывистыми стрелками). Важно подчеркнуть, что полученная закономерность коренным образом отличается от зависимости  $T_f(H)$  для систем с переходами ПМ – СС и ФМ – СС. В последнем случае  $T_f$  всегда уменьшается с увеличением  $H$ <sup>2, 8</sup>.

Попутно отметим, что по мере увеличения магнитного поля аномально быстро понижается температура  $T_N$  максимума намагниченности  $I$  (отмечено сплошными стрелками), связанного, согласно нейтронографическим данным<sup>9</sup>, с возникновением в сплаве АФМ порядка. Из рис. 1 ясно, что с возрастанием поля разность  $T_N - T_f$  уменьшается. Наконец, при  $H > 10$  кЭ характер температурных зависимостей  $I(T)$  не отличается от таковых для обычных СС. Следовательно, для рассматриваемого сплава при  $H > 10$  кЭ линии  $T_f(H)$  и  $T_N(H)$  в  $H$ - $T$  плоскости должны пересечься. Иллюстрацией этого может служить соответствующая фазовая диаграмма (рис. 2, а), из которой видно, что в нулевом магнитном поле действительно происходит двойной температурный переход ПМ – АФМ – СС. С увеличением поля температурная область существования СС (3) расширяется, а АФМ фазы (2) сужается. Выше критического магнитного поля  $H_c \approx 11$  кЭ происходит лишь переход из ПМ фазы (1) в фазу СС.

Концентрация  $C_0$  возникновения АФМ порядка в сплавах системы  $Fe_{C}Ni_{8.0-C}Cr_{2.0}$  лежит в пределах 62 – 63 ат.%<sup>9</sup>. При  $C < C_0$  для сплавов характерны температурные переходы ПМ – СС<sup>10</sup>. В то же время, в изученном выше сплаве концентрация железа лишь незначительно превышает  $C_0$ . Поэтому в нем существенную роль играет конкурирующий обмен. Представляет интерес выяснить, будет ли происходить температурный переход ПМ – АФМ – СС в сплавах  $Fe_{C}Ni_{8.0-C}Cr_{2.0}$ , в которых вклад случайного обмена в общую обменную энергию менее существен. На рис. 2, б приведена  $H$ - $T$  фазовая диаграмма сплава  $Fe_{6.8}Ni_{1.2}Cr_{2.0}$ , из которой видно, что при  $H = 0$  наблюдается только переход ПМ – АФМ. Однако в интервале магнитных полей  $H_0 \approx 5 < H < H_c \approx 17$  кЭ, как и в ранее рассмотренном случае, происходит переход ПМ – АФМ – СС. Вполне понятно, что при еще большем увеличении вклада АФМ взаимодействия при одновременном уменьшении доли случайного обмена  $H_0$  и  $H_c$  будут возрастать и в предельном случае "чистого" АФМ область СС (3) исчезнет.

Следует отметить, что сделанный выше вывод о наличии перехода ПМ – АФМ – СС в рассмотренных сплавах основан на результатах измерений ZFC и FC статической намагниченности. Между тем, для СС традиционными являются исследования динамической магнитной восприимчивости. На рис. 3 приведены температурные зависимости вещественной  $\chi'_0$  и минимум  $\chi''_0$  составляющих динамической магнитной восприимчивости сплава  $Fe_{6.6}Ni_{1.4}Cr_{2.0}$ . Как и следовало ожидать,  $\chi'_0(T)$  имеет максимум при температуре Нееля  $T_N = 29$  К и сплаву аномалию в виде перегиба в районе  $T_f = 9$  К. Для фиксации фазовых переходов в магнитоупорядоченных фазах гораздо удобнее изучать минимум восприимчивость  $\chi''_0(T)$ , которая описывает динамику магнитных моментов системы<sup>11</sup>. Действительно, из рис. 3 видно, что на кривой  $\chi''_0(T)$  вблизи  $T_f$  наблюдается резкая аномалия, свидетельствующая о переходе сплава в состояние СС. Существенно, что температура  $T_f$ , полученная из измерений  $\chi''_0(T)$ ,

хорошо согласуется со значением, определенным из экстраполяции кривой  $T_f(H)$  на нулевое поле (рис. 2, а).

Приведем теперь полную магнитную фазовую диаграмму сплавов  $\text{Fe}_C \text{Ni}_{80-C} \text{Cr}_{20}$ , построенную по данным настоящей и более ранних работ <sup>10, 11</sup> (вставка на рис. 3). На ней впервые экспериментально выделены области составов, для которых характерны двойные температурные переходы ПМ – ФМ – СС (1 – 7 – 5) и ПМ – АФМ – СС (1 – 2 – 3). В настоящей работе мы не останавливаемся на обсуждении природы фазы СС, возникающей в результате последнего перехода, и на возможности проявления эффектов случайного поля. Эти вопросы будут детально рассмотрены позднее.

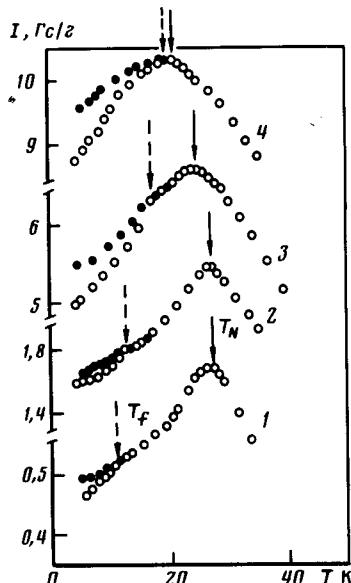


Рис. 1

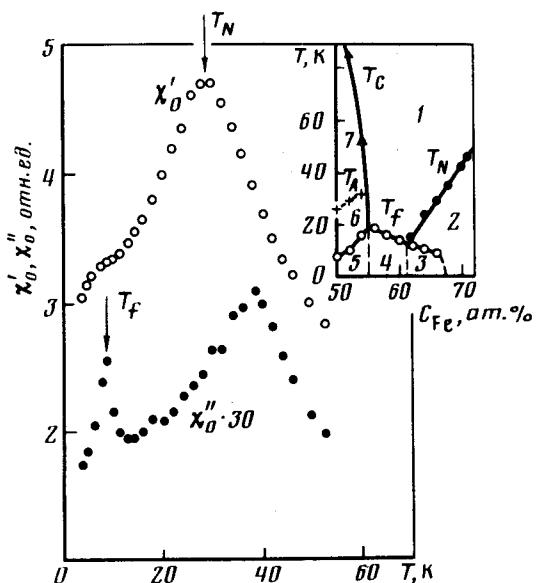


Рис. 3

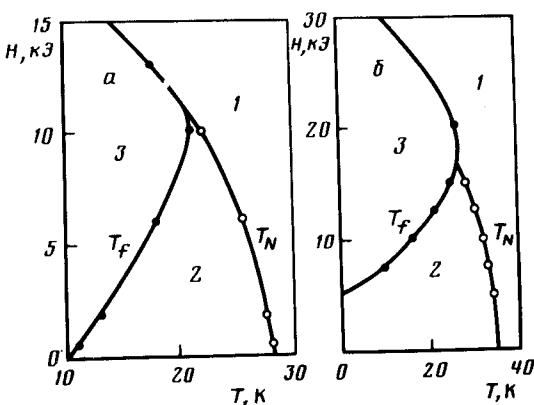


Рис. 2

Рис. 3. Температурная зависимость вещественной  $\chi'_0$  и мнимой  $\chi''_0$  составляющих динамической магнитной восприимчивости сплава  $\text{Fe}_{66} \text{Ni}_{14} \text{Cr}_{20}$  в перемагничивающем поле 10 кОе на частоте 240 Гц. На вставке: полная магнитная фазовая диаграмма сплавов  $\text{Fe}_C \text{Ni}_{80-C} \text{Cr}_{20}$ .  $T_c$ ,  $T_N$  и  $T_f$  – температуры Кюри, Нееля и замерзания СС,  $T_A$  – температура возникновения асперомагнитного состояния; 1 – ПМ, 2 – АФМ, 3 – область СС, 4, 5 – области существования СС, 6 и – асперомагнитная и ФМ области

Рис. 1. Температурные зависимости ZFC (светлые точки) и FC (темные точки) на магнитности  $I$  сплава  $\text{Fe}_{66} \text{Ni}_{14} \text{Cr}_{20}$  в магнитных полях различной напряженности: 1 – 0,5; 2 – 1,8; 3 – 6; 4 – 10 кОе.  $T_N$  – температура Нееля,  $T_f$  – температура замерзания СС

Рис. 2.  $H$ - $T$  фазовые диаграммы сплавов  $\text{Fe}_{66} \text{Ni}_{14} \text{Cr}_{20}$  (а) и  $\text{Fe}_{68} \text{Ni}_{12} \text{Cr}_{20}$  (б). 1 и 2 – ПМ и АФМ области, 3 – область СС

В заключение отметим, что основные результаты работы – вид полной магнитной фазовой диаграммы и  $H$ - $T$  диаграмм АФМ сплавов  $\text{Fe}_C \text{Ni}_{80-C} \text{Cr}_{20}$  – качественно согласуются с теоретическими предсказаниями <sup>4</sup>.

Благодарим Б.А.Иванова и Е.Ф.Шендера за полезные обсуждения, В.Г.Барьяхтара за внимание к работе.

### Литература

1. *Fischer K.H.* Phys. Stat. Sol., 1983, **b116**, 357; 1985, **b130**, 13.
2. *Huang C. Y.* J. Magn. Magn. Mater., 1985, **51**, 1.
3. *Medvedev M. V., Goryanova S.M.* Phys. Stat. Sol., 1980, **b98**, 143.
4. *Коренблит И.Я., Шендер Е.Ф.* ЖЭТФ, 1985, **89**, 1785.
5. *Datta T., Thornberry D., Jones E., Ledbetter H.M.* Solid State Comm., 1984, **52**, 515.
6. *Lecomte G. V., Lohneysen H., Bauhofer W., Guntherodt G.* Solid State Comm., 1984, **52**, 535.
7. *Gelard J., Bensamka F., Bertand D., Fert A.R., Redoules J.P., Legrand S.* J. Phys., 1983, **C16**, L939.
8. *Такзей Г.А., Костышин А.М., Гребенюк Ю.П.* ФТТ, 1984, **26**, 2722.
9. *Majumdar A.K., Blanckenhagen P.J.* J. Magn. Magn. Mater., 1983, **40**, 227.
10. *Меньшиков А.З., Такзей Г.А., Теплых А.Е.* ФММ, 1982, **54**, 465.
11. *Такзей Г.А., Костышин А.М.* Письма в ЖЭТФ, 1984, **40**, 308; *Такзей Г.А., Костышин А.М., Гребенюк Ю.П., Сыч И.И.* ЖЭТФ, 1985, **89**, 2181.

Институт металлофизики  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
13 марта 1986 г.