КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.245

К. П. БЕЛОВ, А. Н. ГОРЯГА, А. И. КОКОРЕВ

К МЕТОДИКЕ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В АМОРФНЫХ И МИКТОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

В последнее время большое внимание уделяется изучению характера магнитных превращений в материалах, в которых при $T<T_{пр}$ наряду с упорядоченными магнитными моментами имеются и неупорядоченные. Такие вещества, будучи однофазными по всему объему, имеют две магнитные фазы. Они получили название смешанных магнетиков или «миктомагнетиков»; в этих веществах имеются кластеры с упорядоченными спинами и отдельно неупорядоченные спины (ферромагнетик+«спиновое стекло», ферримагнетик+«спиновое стекло»). Большой интерес представляет исследование вблизи температуры Кюри также аморфных ферромагнетиков.

В этих материалах определяются следующие критические параметры магнитного превращения:

параметр f в зависимости $\sigma_s/\sigma_{s_0} \sim (1-T/\Theta)^f$, где σ_s — удельная самопроизвольная намагниченность вблизи точки Кюри, а σ_{s_0} — удельная самопроизвольная намагниченность при 0 К;

параметр δ в зависимости $(\sigma_i)_{T=\Theta} \sim H^{1/\delta}$, где σ_i — намагниченность парапроцесса;

параметр γ в зависимости $\chi_0 \sim (T-\Theta)^{-\gamma}$, где χ_0 — начальная восприимчивость вблизи Θ со стороны высоких температур, т. е. при $T>\Theta$.

В таких магнитных соединениях область магнитных превращений является сильно размытой, поэтому трудно с достаточной точностью определить температуру фазового перехода из неупорядоченного спинового состояния в упорядоченное. По-видимому, это и явилось причиной того, что при исследовании данных магнитных материалов с успехом применяется предложенный в работе [1] метод «термодинамических коэффициентов», основанный на термодинамической теории фазовых превращений второго рода Ландау [2]. Позднее аналогичный метод, основанный на теории молекулярного поля, был предложен Арроттом [3].

В работе [1] было показано, что намагниченность σ ферромагнетиков вблизи температуры Кюри подчиняется уравнению

$$\alpha\sigma + \beta\sigma^3 = H, \tag{1}$$

где $\sigma=\sigma_i+\sigma_s$ при $T<\Theta$, $\sigma=\sigma_i$ при $T\geqslant\Theta$, α и β — термодинамические коэффициенты. Коэффициент β в окрестности температуры Кюри имеет только положительный знак, а коэффициент α зависит от температуры следующим образом:

$$\alpha = \alpha'_\Theta(T-\Theta), \text{ где } \alpha'_\Theta = \left(\frac{d\alpha}{dT}\right)_{T=\Theta}.$$

Для удобства пользования уравнение (1) лучше записать в виде

$$\alpha + \beta\sigma^2 = H/\sigma. \qquad (2)$$

Для каждой температуры строится зависимость $(H/\sigma)(\sigma^2)$. Значение коэффициента α определяется величиной отрезка, отсекаемого от оси ординат прямой частью зависимости $(H/\sigma)(\sigma^2)$. Температура Кюри Θ находится экстраполяцией кривой $\alpha(T)$ на ось температур, т. е. когда $\alpha=0$. Величина самопроизвольной намагниченности σ_s находится путем экстраполяции прямой части зависимости (H/σ) (σ^2) на ось абсцисс. Из уравнения (2) видно, что при $T>\Theta$ величина начальной восприимчивости $\chi_0=1/\alpha$.

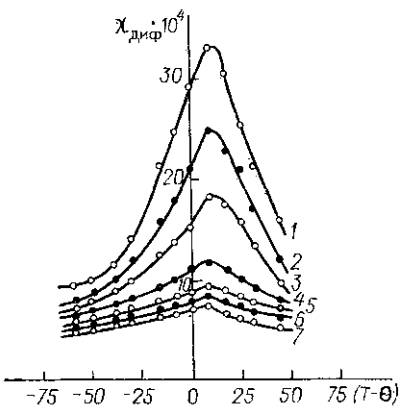

Рис. 1. Температурная зависимость восприимчивости парапроцесса феррита $Li_{0,2}Zn_{0,8}Fe_{2,2}O_4$. $H=0,5$ (*1*), 1 (*2*), 3 (*3*), 4 (*4*), 6 (*5*), 8 (*6*) и 10 (*7*) кЭ

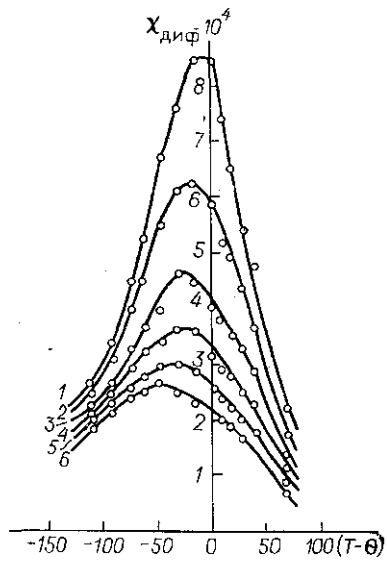

Рис. 2. Температурная зависимость восприимчивости парапроцесса феррита $Mg_{1,5}FeTi_{0,5}O_4$. $H=1$ (*1*), 2 (*2*), 4 (*3*), 6 (*4*), 8 (*5*) и 10 (*6*) кЭ

Как известно, важным параметром для изучения характера магнитного превращения в смешанных магнетиках и аморфных магнитных сплавах является дифференциальная восприимчивость парапроцесса $\chi_{диф}$. По зависимости $\chi_{диф}$ от магнитного поля можно судить о характере магнитного перехода в смешанных магнетиках («спиновое стекло», ферромагнетизм и т. д.). Например, как было установлено в работе [4], наблюдаемое в области магнитного перехода смещение максимума на кривой $\chi_{диф}(T)_{H=const}$ с увеличением магнитного поля в сторону низких температур является критерием наличия перехода «спиновое стекло» в смешанных магнетиках.

Непосредственные измерения величины $\chi_{диф}$ магнитных материалов с малой намагниченностью являются довольно трудоемкими. Однако метод «термодинамических коэффициентов» позволяет сравнительно просто рассчитать величину $\chi_{диф}$. Дифференцируя уравнение (1) по H, получаем

$$\alpha\frac{\partial\sigma}{\partial H} + 3\beta\sigma^2\frac{\partial\sigma}{\partial H} - 1 = 0, \quad \frac{\partial\sigma}{\partial H}(\alpha + 3\beta\sigma^2) = 1, \quad \frac{\partial\sigma}{\partial H} = \chi_{диф} = \frac{1}{\beta + 3\beta\sigma^2}. \qquad (3)$$

Таким образом, для каждой температуры, зная коэффициенты α и β, а также величину σ при определенном значении поля, можно сравнительно легко по формуле (3) определить величину $\left(\frac{\partial\sigma}{\partial H}\right)_{H=\text{const}}$ и, следовательно, найти ее температурную зависимость в районе точки Кюри.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены результаты для двух разбавленных ферритов со структурой шпинели:

$$Li_{0,2}Zn_{0,6}Fe_{2,2}O_4 \text{ и } Mg_{1,5}FeTi_{0,5}O_4,$$

в которых согласно мёссбауэровским исследованиям [5, 6] в создании ферримагнетизма принимают участие не все магнитные ионы, т. е. наряду с упорядоченными спинами имеются и неупорядоченные. Видно, что с увеличением магнитного поля у Li—Zn-феррита максимум на кривой $(\chi_{диф})_{H=\text{const}}=f(T-\Theta)$, так же как и у ферромагнетиков, смещается в сторону высоких температур, а у образца Mg—Ti смещение максимума $\chi_{диф}$ с увеличением поля идет в сторону низких температур.

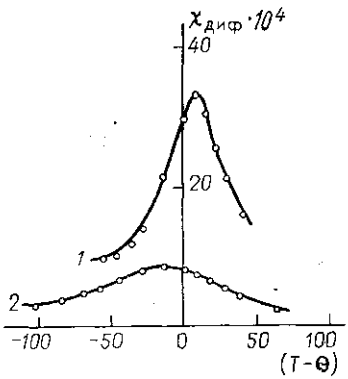

Рис. 3. Температурные зависимости $\chi_{диф}$ при $H=1$ кЭ: *1* — для феррита $Li_{0,2}Zn_{0,8}Fe_{2,2}O_4$ и *2* — для феррита $Mg_{1,5}FeTi_{0,5}O_4$

Для сравнения на рис. 3 приведены температурные зависимости $\chi_{диф}$ при $H=1$ кЭ для двух образцов. Видно, что Mg—Ti-феррит имеет наиболее размытую область магнитного превращения и значительно меньшую величину $\chi_{диф}$ в точке перехода, чем Li—Zn-феррит. Таким образом, принимая во внимание результаты работы [4], можно считать, что у образца Mg—Ti имеет место магнитный переход типа «спиновое стекло».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов К. П., Горяга А. Н. К термодинамическому описанию намагничивания ферромагнетиков вблизи температуры Кюри. — Физ. металлов и металловедение, 1956, 2, с. 4—9.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. Н. Статистическая физика. М., 1964, гл. XIV.
3. Arrott A. Criterion for ferromagnetism from observation of magnetic isotherms.— Phys. Rev., 1957, **108**, p. 1934—1936.
4. Verbeek B. H., Neiuwenhuys G. J., Stocker H., Mydosh J. A. Differential susceptibility $\chi(T, H)$ of the mixed magnetic system PdFeMn.— J. de Physique. Colloque C6, supplément au N 8, 1978, **39**, p. 916—917.
5. Joung J. W., Smit J. Mössbauer effect in lithium-zinc ferrites.— Appl. Physics, 1971, **42**, p. 2344—2348.
6. De Grave E., Dauwe C., Govaert A., De Sitter J. Incomplete magnetic ordering in $Fe_{2(1-y)}Mg_{1+y}Ti_yO_4$ spinels with intermediate composition.— J. Appl. Phys., 1977, **12**, p. 131—136.

Поступила в редакцию
30.10.79