УДК 538.221

А. И. Спольник, А. С. Абызов, И. В. Волчок, М. А. Чегорян

Ферромагнитный резонанс в металлах с неферромагнитными включениями

(Представлено академиком НАН Украины С. В. Пелетминским)

Розширення лінії феромагнітного резонансу (ФМР) немагнітними включеннями проаналізовано в моделі двомагнонних процесів релаксації. Знайдено залежність величини цього розширення від об'ємної концентрації, розмірів включень, тиску, створюваного ними, а також від пружних модулів феромагнетика та включень.

В настоящей работе исследуется влияние на ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) второй неферромагнитной фазы, находящейся в ферромагнитной металлической матрице в виде мелкодисперсных частиц. Такие системы применяются, в частности, в реакторостроении для уменьшения распухания металлических конструкций [1]. Физические закономерности поведения ширины линии в них могут лечь в основу методики изучения и контроля кинетики трансформации включений в процессе различных воздействий на металл, например, тепловых и радиационных.

Ниже рассматриваются две возможные причины влияния мелкодисперсной фазы на ширину линии ФМР, поведение которой несет информацию о диссипативных процессах, происходящих в магнитной подсистеме ферромагнетика.

Первая причина — рассеяние прецессии намагниченности при ФМР на размагничивающих полях в объеме включений. Это связано с изменением энергии магнитодипольного взаимодействия вследствие "вырезания" из однородно намагниченного ферромагнетика объема V_p, занимаемого включениями. Такая модель влияния объемных неоднородностей на ширину линии использовалась в ряде работ (см., например, [2, 3]). Рассматривая неферромагнитные включения как полости в ферромагнитном образце, в соответствии с [2], приходим к следующему результату для ширины линии ΔH_p, обусловленной наличием в ферромагнетике N сферических включений, каждое из которых имеет объем V_0 и радиус R:

$$\Delta H_p \simeq 9\pi M_0 \frac{V_p}{V} \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha}} R, \tag{1}$$

где M_0 — намагниченность насыщения ферромагнетика; α — обменная постоянная; $V_p = NV_0$; V — объем ферромагнетика.

Оценка величины ΔH_p для никеля, содержащего 1% включений со средним размером $R \sim 10^{-6}$ см, дает $\Delta H_p \sim 10^3$ Э. Заметим, что это значение ΔH_p согласуется с результатами работы [3] и на порядок превосходит ширину линии ФМР в "бездефектных" образцах никеля [4].

Второй причиной уширения линии ФМР при определенных условиях могут стать неоднородные напряжения, которыми окружены включения. Уширение линии, обусловленное неоднородными напряжениями вокруг дислокаций, подробно исследовано в целом ряде работ (см., например, [5, 6]). По аналогии с [6], исходя из выражения для магнитоупругой энергии и заменяя тензор деформации вокруг дислокаций на тензор деформации, возникающей при наличии в ферромагнитной среде сферического включения [7], было получено следующее выражение для ширины линии ФМР:

$$\Delta H'_p \cong 10^8 \left(\frac{B_1^2}{M_0^3}\right)(1+\sigma)^2 \left(\frac{p}{E}\right)^2 n_p \frac{R^6}{\alpha^{3/2}}, \tag{2}$$

где B_1 — магнитоупругая постоянная; σ — коэффициент Пуассона и E — модуль Юнга ферромагнетика; p — давление, оказываемое включением на матрицу; $n_p = N/V$ — количество включений в единице объема.

Сравним величины первого и второго эффектов, найдя отношение выражений (2) и (1):

$$\frac{\Delta H'_p}{\Delta H_p} \simeq \frac{(B_1^2/M_0^3)}{M_0}(1+\sigma)^2 \left(\frac{p}{E}\right)^2 \frac{R^2}{\alpha}. \tag{3}$$

Предположив, что ферромагнитной матрицей является никель, для которого $B_1 = 6{,}2 \times \times 10^7$ эрг $\cdot$ см$^{-3}$, $M_0 = 485$ Гс, $\alpha \sim 10^{-12}$ см^2, $\sigma = 0{,}28$, получим:

$$\frac{\Delta H'_p}{\Delta H_p} \sim \left(\frac{p}{E}\right)^2 \frac{R^2}{\alpha}. \tag{4}$$

В выражение (4) входит давление p, создаваемое включением. Свяжем это давление с упругими свойствами ферромагнитной матрицы и включения. Для этого представим, что в ферромагнитной матрице с упругими параметрами E_m и σ_m вырезано отверстие радиусом R_2 и в него вставлено сферическое включение радиусом $R_1 (R_1 > R_2)$ с упругими параметрами E_i и σ_i. Так как $R_1 > R_2$, то матрица растянется на величину ΔR_2, а сфера сожмется на ΔR_1, т. е.

$$\Delta R_1 \simeq \Delta R_2; \qquad \Delta R = R_1 - R_2. \tag{5}$$

В дальнейшем предполагается, что

$$\Delta R \ll R_1 \qquad \text{и} \qquad R \approx R_1 \approx R_2. \tag{6}$$

В случае отсутствия внешних объемных сил теория упругости дает такие выражения для тензоров деформации и напряжений:

$$U_{rr} = a - \frac{2b}{r^3}; \qquad U_{\theta\theta} = U_{\varphi\varphi} = a + \frac{b}{r^3}, \qquad U_{r\theta} = U_{\theta\varphi} = U_{r\varphi} = 0, \tag{7}$$

$$\sigma_{rr} = a\frac{E}{1-2\sigma} - \frac{E}{1+\sigma}\frac{2b}{r^3}, \qquad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\varphi} = a\frac{E}{1-2\sigma} + b\frac{E}{(1+\sigma)r^3}. \tag{8}$$

Компоненты вектора деформации следующие:

$$U_r = ar + \frac{b}{r^2}, \qquad U_0 = U_\varphi = 0. \tag{9}$$

Все особенности деформации определяются значениями констант a и b.

В случае бесконечной матрицы деформация при $r \to \infty$ равна нулю, т. е.

$$U_r(r \to \infty) = a_m r + \frac{b_m}{r^2} = 0. \tag{10}$$

Для выполнения этого условия необходимо $a_m = 0$. Тогда для матрицы получаем

$$U_r^m = \frac{b_m}{r^2}, \qquad \sigma_{rr}^m = -\frac{E_m}{1+\sigma_m}\frac{2b_m}{r}. \tag{11}$$

В случае сферической симметрии деформация в центре включения отсутствует и

$$U_r(r=0) = a_i r + \frac{b_i}{r^2} = 0. \tag{12}$$

Это имеет место только при $b_i = 0$. Тогда для включения справедливы уравнения

$$U_r^i = a_i r, \qquad \sigma_{rr}^i = a_i\frac{E_i}{1-2\sigma_i}. \tag{13}$$

Здесь индексы i и m относятся к включению и матрице соответственно.

Из условия механического равновесия на границе $\sigma_{rr}^i(R) = \sigma_{rr}^m(R) = -p$ и из выражений (11) и (13) с учетом (6) получаем

$$a_i\frac{E_i}{1-2\sigma_i} = -\frac{E_m}{1+\sigma_m}\frac{2b_m}{R^3} = -p. \tag{14}$$

Используя уравнение непрерывности $U_r^i|_{R_2} = U_r^m|_{R_1}$, а также условия (5) и (6), получим

$$-a_i R + \frac{b_m}{R^2} = \Delta R. \tag{15}$$

Из уравнений (14) и (15) получим выражение для давления

$$p = \frac{\Delta R}{R}\left\{\frac{1-2\sigma_i}{E_i} + \frac{1+\sigma_m}{2E_m}\right\}^{-1}. \tag{16}$$

Такое давление оказывает включение на несжимаемую матрицу, когда радиус отверстия в матрице меньше радиуса включения на величину ΔR.

Эта ситуация может возникнуть при охлаждении ферромагнитного металла от температуры плавления $T_{\text{пл}}$ до некоторой температуры T, в процессе которого в матрице образуются включения с коэффициентом линейного расширения α_i, отличающимся от коэффициента линейного расширения α_m матрицы. В этом случае

$$\frac{\Delta R}{R} = (\alpha_m - \alpha_i)(T_{\text{пл}} - T). \tag{17}$$

При условии, что коэффициенты α отличаются незначительно ($\alpha \sim 10^{-6}$ K^{-1}), оценка величины p по формуле (5) с учетом (6) дает $p \sim 10^{-3}E$.

Из (4) следует, что при таком давлении и размерах включений $R \sim 10^{-6}$ см $\Delta H_p'/\Delta H_p \sim \sim 10^{-3}$, т. е. вторым эффектом можно пренебречь. С увеличением R вклад второго эффекта возрастает и, начиная с $R \sim 10^{-4}$ см, он сравним по величине с первым.

Представляется интересным проведение измерений ширины линии ФМР в таких двухфазных системах. Это позволит при известных из независимых измерений величинах n_p и R экспериментально определить величину давления p, которое включения оказывают на матрицу.

1. *Томпсон М.* Дефекты и радиационные повреждения в металлах. – Москва: Мир, 1971. – 367 с.
2. *Белозоров Д. П., Спольник А. И.* Рассеяние однородной прецессии намагниченности на порах // Укр. физ. журн. – 1977. – **22**, вып. 10. – С. 1652–1657.
3. *Белозоров Д. П., Золотницкий Ю. В., Равлик А. Г. и др.* Рассеяние однородной спиновой волны на анизомерных ориентировочных порах // Физика тверд. тела. – 1977. – **19**, вып. 5. – С. 1414–1419.
4. *Андерс А. Г., Спольник А. И.* Температурная зависимость ширины линии ФМР в монокристаллах никеля // Там же. – 1974. – **16**, вып. 11. – С. 3406–3410.
5. *Ахиезер А. И., Бойко В. С., Спольник А. И.* К теории уширения линии ферромагнитного резонанса дислокациями // Там же. – С. 3411–3416.
6. *Ахиезер А. И., Ганн В. В., Спольник А. И.* Теория дислокационного уширения линии однородного ферромагнитного резонанса // Там же. – 1975. – **17**, вып. 8. – С. 2340–2346.
7. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория упругости. – Москва: Наука, 1965. – 203 с.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко

Поступило в редакцию 21.04.2009

A. I. Spolnik, A. S. Abyzov, I. V. Volchok, M. A. Chegoryan

Ferromagnetic resonance in metals with nonmagnetic inclusions

The ferromagnetic resonance line broadening by nonmagnetic inclusions is analyzed using the model of two-magnon relaxation processes. Its value depending on the volume concentration, size of inclusions, pressure created by them, and the elastic moduli of a ferromagnetic and inclusions is determined.