

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

Спольник А.И. д.физ.-мат.н., проф., Волчок И.В. к.физ.-мат.н., доц.,
Калиберда Л.М. доц., Чегорян М.А. к.физ.-мат.н., доц.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко*

Исследовано влияние на ширину линии ферромагнитного резонанса наличия неферромагнитной фазы, находящейся в ферромагнитной матрице в виде мелкодисперсных частиц.

Постановка проблемы. Наличие различных нарушений кристаллической структуры ферромагнетика отражается на ширине линии ферромагнитного резонанса (ФМР). В реакторостроении для уменьшения радиационного набухания металлических конструкций находят применение двухфазные системы: металл-мелкодисперсные включения [1]. Представляется интересным исследование влияния таких включений на ширину линии ФМР. Физические закономерности поведения ширины линии в таких двухфазных системах могут лечь в основу методики изучения и контроля кинетики трансформации включений в процесс различных воздействий на металл.

Анализ последних исследований. Исследование влияния объёмных неоднородностей (пор) на ширину линии ФМР проведено в ряде работ (см., например, [2,3]).

Цель. Теоретически исследовать поведение ширины линии ФМР в металлическом ферромагнетике, содержащем мелкодисперсные неферромагнитные включения.

Результаты исследований. В работе рассмотрены 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 объёме включений. Это связано с изменением энергии магнитодипольного взаимодействия вследствие “вырезания” из однородно намагниченного ферромагнетика объёма V_p , занимаемого включениями. Такая модель влияния объёмных 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 объём V_0 и радиус R :

$$\Delta H_p \simeq 9\pi M_0 \frac{V_p}{V} \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha}} \cdot R, \quad (1)$$

где M_0 – намагниченность насыщения ферромагнетика, α – обменная постоянная, $V_p = N \cdot V_0$, V – объём 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:

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

где B_1 – магнитоупругая постоянная, σ – коэффициент Пуассона и E – модуль Юнга ферромагнетика, p – давление, оказываемое включением на матрицу, $n_p = \frac{N}{V}$ – количество включений в единице объёма.

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

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

Предположив, что ферромагнитной матрицей является никель, для которого $B_1 = 6,2 \cdot 10^7$ эрг·см⁻³, $M_0 = 485$ Гс, $\alpha \sim 10^{-12}$ см², $\sigma = 0,28$, получим:

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

В выражении (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 радиуса R_2 и в него вставлено сферическое включение радиуса 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.

$$\Delta R_1 \cong \Delta R_2 ; \Delta R = R_1 - R_2. \quad (5)$$

В дальнейшем предполагается, что

$$\Delta R \ll R_1 \text{ и } R \approx R_1 \approx R_2. \quad (6)$$

В случае отсутствия внешних объёмных сил теория упругости даёт следующие выражения для тензоров деформации и напряжений:

$$U_{rr} = a - \frac{2b}{r^3}; \quad U_{\theta\theta} = U_{\varphi\varphi} = a + \frac{b}{r^3}. \quad (7)$$

$$U_{r\theta} = U_{\theta\varphi} = U_{r\varphi} = 0.$$

$$\sigma_{rr} = a \frac{E}{1-2\sigma} - \frac{E}{1+\sigma} \frac{2b}{r^3};$$

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

Компоненты вектора деформации

$$U_r = ar + \frac{b}{r^2}, \quad U_\theta = U_\varphi = 0. \quad (9)$$

Все особенности деформации определяются значениями констант a и b . В случае бесконечной матрицы, деформация при $r \rightarrow \infty$ равна нулю, то есть

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

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

$$U_r^m = \frac{b_m}{r^2},$$

$$\sigma_{rr}^m = -\frac{E_m}{1+\sigma_m} \frac{2b_m}{r}. \quad (11)$$

В случае сферической симметрии деформация в центре включения отсутствует и

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

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

$$U_r^i = a_i r;$$

$$\sigma_{rr}^i = a_i \frac{E_i}{1-2\sigma_i}. \quad (13)$$

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

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

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

(6), получим

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

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

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

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

Эта ситуация может возникнуть при охлаждении ферромагнитного металла от температуры плавления $T_{пл}$ 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

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

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

Из (4) следует, при таком давлении и размерах включений $R \sim 10^{-6}$ см $\frac{\Delta H'_p}{\Delta H_p} \sim 10^{-3}$, 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.

Список использованных источников

1. М. Томпсон. Дефекты и радиационные повреждения в металлах.- М.: Мир, 1971.-367 с.
2. Белозоров Д.П., Спольник А.И. Рассеяние однородной прецессии намагниченности на порах. // УФЖ.-1977.-Т.22, вып.10.-С.1652-1657.
3. Белозоров Д.П., Золотницкий Ю.В., А.Г. Равлик, Спольник А.И., Черемской П.Г. Рассеяние однородной спиновой волны на анизомерных ориентировочных порах //ФТТ.-1977.-Т.19, вып. 5.- С. 1414-1419.
4. Андерс А.Г., Спольник А.И. Температурная зависимость ширины линии ФМР в монокристаллах никеля //ФТТ.-1974.-Т.16, вып. 11.- С.3406-3410.
5. Ахизер А.И., Бойко В.С., Спольник А.И. К теории уширения линии

- ферромагнітного резонанса дислокаціями //ФТТ.-1974.-Т.16, вып.11.-С. 3411-3416.
6. Ахизер А.И., Ганн В.В., Спольник А.И. Теория дислокационного уширения линии однородного ферромагнитного резонанса //ФТТ.-1975.-Т.17, вып.8.-С.2340-2346.
 7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости.- М.: Наука.- 1965.-203 с.

Анотація

ФЕРРОМАГНІТНИЙ РЕЗОНАНС В ДВУХФАЗНИХ СИСТЕМАХ

Спольник О.І., Волчок І.В., Каліберда Л.М., Чегорян М.О.

Досліджено вплив на ширину лінії ферромагнітного резонансу неферромагнітної фази, яка знаходиться в ферромагнітній матриці у вигляді дрібнодисперсних частинок.

Abstract

FERROMAGNETIC RESONANCE IS IN DIPHASIC SYSTEMS

A. Spolnik, I. Volchok, L. Kaliberda, M. Chegoryan

Influence of non-ferromagnetic phase on the width of line of ferromagnetic resonance is investigated. Non-ferromagnetic phase is in ferromagnetic matrix as finely-dispersed particles.

УДК 637.358.073:539.376

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУРОВАНОГО ПРОДУКТУ

Колеснікова М.Б. к.т.н., доц., Перцевий М.Ф. асп., Ситник Т.М. маг.

Харківський державний університет харчування та торгівлі

Гурський П.В. к.т.н., доц.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Досліджено вплив компонентного складу на структурно-механічні властивості продукту структурованого на основі сиру кисломолочного. Установлена залежність умовних модулів пружності та високоеластичного від виду та вмісту рецептурних компонентів.

Постановка проблеми. Технологічні аспекти одержання структурованих продуктів з використанням борошна ядра соняшника базуються на створенні високодисперсних стійких у часі емульсійних систем, що характеризуються