

## 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  $\Delta H_p$ , 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,  $\alpha$  – обменная постоянная,  $V_p = N \cdot V_0$ ,  $V$  – объём ферромагнетика.

Оценка величины  $\Delta H_p$  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  $\Delta H_p$  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,  $\sigma$  – 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<sup>-3</sup>,  $M_0 = 485$  Гс,  $\alpha \sim 10^{-12}$  см<sup>2</sup>,  $\sigma = 0,28$ , 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  $\sigma_m$  вырезано отверстие радиуса  $R_2$  и в него вставлено сферическое включение радиуса  $R_1$  ( $R_1 > R_2$ ) с упругими параметрами  $E_i$  и  $\sigma_i$ . Так как  $R_1 > R_2$ , то матрица растянется на величину  $\Delta R_2$ , а сфера сожмется на  $\Delta R_1$ , 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  $\Delta R$ .

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  $\alpha_i$ , отличающимся от коэффициента линейного расширения  $\alpha_m$  матрицы. В этом случае

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

При условии, что коэффициенты  $\alpha$  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