ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В МИКРОПРОВОДЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

NATURAL FERROMAGNETIC RESONANCE IN MICROWIRE AND ITS APPLICATION

С.А. БАРАНОВ[1], *ORCID:*
[1] Госуниверситет, Институт прикладной физики, Молдова

УДК 537.624.21, 537.622.4* e-mail: sabaranov07@mail.ru

Теоретически и экспериментально изучен естественный ферромагнитный резонанс (ЕФМР) в литых аморфных магнитных микро и нанопроводах со стеклянной оболочкой. Явление ЕФМР обязано большим остаточным напряжениям, которые возникают в сердечнике микропровода в процессе литья. Эти напряжения вместе с магнитострикцией определяют магнитоупругую анизотропию. Помимо остаточных напряжений, на частоту ЕФМР влияют внешние напряжения, приложенные к микропроводу или к композиту, содержащему последний (так называемый так называемый стресс-эффект (СЭ)).

Зависимость частоты ЕФМР от деформации и внешних напряжений для микропроводов предлагается использовать при дистанционной диагностике в медицине.

Ключевые слова: *литой аморфный микро- и нанопровод в стеклянной оболочке, магнитострикция, естественный ферромагнитный резонанс.*

The natural ferromagnetic resonance (NFMR) in cast glass-coated amorphous magnetic micro and nanowires has been studied theoretically and experimentally. The NFMR reveals large residual stresses appearing in the microwire core in the course of casting. These stresses, together with the magnetostriction, determine the magnetoelastic anisotropy. Beside the residual internal stresses, the NFMR frequency is influenced by external stresses applied to the microwire or to the composite containing the latter (the so-called stress effect).

The dependence of the NFMR frequency on the deformation and external stresses for the microwires is proposed to be used in the distant diagnostics of dangerous deformations in medicine.

Keywords: *cast glass coated amorphous magnetic micro- and nanowire, magnetostriction, natural ferromagnetic resonance.*

ВВЕДЕНИЕ

Технология производства литого аморфного микро- и нанопровода в стеклянной оболочке (ЛАМНСО), изготовленного методом Тейлора-Улитовского представлена, например, в [1-4] (см. ниже). Явление естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) для литых микро- и нанопроводов с магнитной жилой в стеклянной оболочке (ЛАМНСО) изучено многими научными группами

(основные результаты представлены в работах [3-7]). В последнее время ЕФМР привлекает с точки зрения использования для бесконтактной диагностики деформации удаленных объектов [7]. Это возможно, благодаря стресс-эффекту (СЭ) в ЕФМР. СЭ приводит к изменению частоты ЕФМР при деформации контролируемого объекта и, соответственно, механически связанной с ним магнитной жилы в ЛАМНСО. Изменение частоты ЕФМР может быть обнаружено при помощи высокочастотного приема отраженного сигнала радаром вблизи частоты ЕФМР по его отклонениям от первоначального значения [7]. Предлагаемое здесь дистанционное тестирование позволит осуществлять контроль указанных деформаций и напряжений.

В работе [7] нами предполагалось, что эти объекты могут быть объектами инфраструктуры, а именно: мосты, плотины, дамбы, башни ветреных генераторов, высотные дома и трубы тепловых электростанций, набережные и т.д. Диагностика применима также и к перемещающимся объектам: это автомобили, самолеты, дроны, ракеты и т.д. Всем им могут грозить разрушения вследствие природных, или техногенных, а также и технологических катаклизмов (включая повторные или долговременные воздействия напряжений и деформаций). В настоящее время на данную тему, а именно, на возможность реализации предлагаемого метода контроля нами проведены уже и другие, более подробные исследования. Были проанализированы СЭ конкретно к практическому применению (согласно [7]) в медицине. Исследованы изменения частоты естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), которые определялись радаром по изменению поглощения электромагнитной волны на объекте с ЛАМНСО. Эти эффекты возникали от приложенных внешних механических напряжений. Экспериментально было исследовано поглощение композитных материалов в виде экранов со встроенными отрезками из ЛАМНСО. Выполнены и теоретические исследования, которые показали, что значительная доля поглощения может быть отнесена и к геометрическому резонансу [3, 4, 7]. Наибольший эффект ожидается также для нанопроводов, когда радиус жилы соизмерим с толщиной скин-слоя.

В научной литературе существуют параллельные исследования по использованию гигантского магнитного импеданса (ГМИ) для измерений подобных СЭ (см., например, [8]). Однако, использование эффекта ГМИ не технологично (этот вопрос уже освещался в [7]) и здесь рассматриваться не будет. Отметим, что влияние СЭ на ГМИ исследовалось и в [9].

Ценность предложенного здесь метода заключена в простоте его осуществления (см. ниже). Микропровод, если его использовать для диагностики напряжений внутри костной системы, должен быть помещен внутри исследуемого объекта. С помощью СВЧ сканирования и анализа сигнала приемного устройства (радара) можно будет определять напряжения и деформацию костного объекта. Чтобы не облучать весь организм СВЧ излучением, ЛАМНСО можно использовать в поглощающих материалах для экранировки остальной части организма.

ТЕХНОЛОГИЯ

Известно, что ЛАМНСО изготовляется модифицированным методом Тейлора-Улитовского (см. [1-4] и рис.1). Напомним, что для изготовления ЛАМНСО металлический сплав (в форме тонкого прутка) помещается в стеклянную трубку, благодаря тому, что он разогревается до плавления стекла, а потом и металла в высокочастотном индукторе (см. рис.1). Часть стеклянной трубки, прилегающая к расплавленному металлу, размягчается, обволакивая металлическую каплю. Из капли вытягивают капилляр, заполняемый жидким металлом из сплава. Металл образует жилу микропровода, а стенки капилляра из силикатного стекла – ее стеклянную оболочку (которая часто служит и изоляцией). В зависимости от состава металлической капли (которая расположена в расплавленном состоянии в микрованне из силикатного стекла) и от скорости литья ЛАМНСО, структура жилы микро- и нанопровода может быть моно- или поликристаллической, аморфной и нанокристаллической (причем, возможно совмещение этих структур в жиле).

Для непрерывности процесса дозаправка капли может производиться с помощью специального приспособления (на рис. 1 оно не указано)

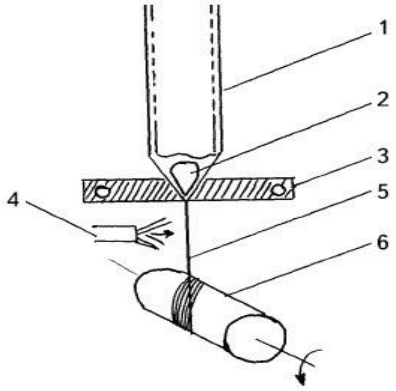


Рис. 1. Процесс литья ЛАМНСО (см. [1-5]).

1. Стеклянная трубка. 2. Капля металла. 3. Индуктор для разогрева капли металла в диапазоне КГц. 4. Вода или масло для закалки ЛАМНСО. 5. Микро- и нанопровод со стеклянным покрытием – называемый ЛАМНСО. 6. Вращающаяся катушка для приема ЛАМНСО.

В [3] получена формула для радиуса микропровода R_g (внешний радиус стеклянной оболочки), который оценивается по формуле:

$$R_C \sim A\eta^{2-k} V_d^k \sigma^{1-k}_s, \quad (1)$$

где k - параметр, зависящий от скорости разливки ($0 < k < 1$); ρ - средняя плотность микропровода; V_d - скорость разливки; σ_s - поверхностное натяжение; η - динамическая вязкость стекла:

$$\eta \sim \eta_0 \exp\{\Delta H/RT + c[\exp(\varepsilon/RT) - 1]\}$$

где $\varepsilon \sim 2 \cdot 10$ кДж / моль, $\Delta H \sim 10^2$ кДж / моль, R - универсальная газовая постоянная, η_0 (начальная вязкость стекла) и c ($c \sim 0{,}4–0{,}9$) - материальные постоянные, $A \sim 1/\rho$.

Формула (1) предполагает следующее асимптотики:

1. Если значение скорости вытягивания микропровода предельно маленькая, то значение R_c велико, и мы получаем формулу

$$R_C \sim \eta^{5/3} V_d^{1/3} \sigma_s^{2/3} \tag{1a}$$

где $k = 1/3$.

2. Если скорость разливки достаточно высока, то для R_c получаем :

$$R_C \sim \eta^{4/3} V_d^{2/3} \sigma_s^{1/3} \tag{1b}$$

где $k = 2/3$.

2. В пределе чрезвычайно высокой скорости разливки, при $k \to 1$, получаем:

$$R_C \sim \eta V_d \tag{1c}$$

Приведенные формулы подтверждены экспериментом.

После получения микропровода простая модель его сечения представлялась так [3]

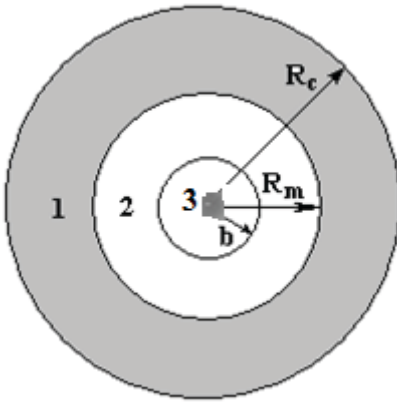


Рис. 2. Схема сечения микропровода.

1- силикатное стекло, 2- область больших упругих напряжений металлической жилы (МЖ), 3 –область, где существенна релаксация МЖ, 4- черное пятно, где неприменима макроскопическая теория в МЖ (но там будет продольный зародыш намагничивания).

Приведем простейшее решение задачи расчета остаточных напряжений (на поверхности между областями 1 и 2) для ЛАМНСО, которое уже рассматривалось, например, в [3].

Формулы для радиальной – $\sigma_{r(0)}$, тангенциальной – $\sigma_{,\varphi(0)}$ и осевой – $\sigma_{z(0)}$ компонент напряжений имеют вид [3]:

$$\sigma_{r(0)} = \sigma_{\varphi(0)} = P = \sigma_m \frac{kx}{\left(\frac{k}{3}+1\right)x + \frac{4}{3}},$$

$$\sigma_{z(0)} = P\frac{(k+1)x+2}{kx+1},$$

$$x = \left(\frac{Rc}{Rm}\right)^2 - 1,$$

$$\sigma_m = \varepsilon E_1, \qquad \varepsilon = (\alpha_1 - \alpha_2)(T^* - T), \tag{2}$$

α_i – коэффициенты термического расширения *(KTP)* металла (*i=1*) и стекла (*i=2*); *T**–температура застывания композита в области контакта металла и стекла (*T**~800–1000 K);

T – температура, при которой проводится эксперимент; R_m – радиус металлической жилы микропровода *($d_m = 2R_m$)*; R_c – внешний радиус стеклянной оболочки микропровода *($D_c = 2\,R_c$)*;

$$k = \frac{E_2}{E_1} \sim (0{,}3 \div 0{,}5),$$

E_i – модули Юнга (металла (*i=1*) и стекла (*i=2*)).

Для упрощения приведенных формул коэффициенты Пуассона для стекла и металла взяты ~ 1/3. Согласно (1) наибольшим напряжением является продольное напряжение:

$$\sigma_{z(0)} \sim (2 \div 3)P,$$

то есть:

$$\sigma_{z(0)} > \sigma_{r,\varphi(0)},$$

а максимум величины *P* определится как:

$$P \rightarrow 0{,}5\sigma_m \sim 10^9 \text{ Па}.$$

При дополнительной продольной деформации, имеющей место в случае, когда микропровод внедрен в твердую матрицу, которая сама деформируется под действием внешних воздействий, в выражение для остаточного осевого натяжения в металлической жиле добавляется член:

$$\sigma_{ez} = \frac{P_0}{S_m(k\ x\ +1)}, \tag{2,a}$$

где P_0 - это приложенная сила к композиту и, соответственно, к жиле микропровода, $S_m = \pi R_m^{\ 2}$ - площадь сечения жилы микропровода, k - отношение модуля Юнга оболочки к модулю Юнга микропровода, x –отношение площади оболочки к площади микропровода (см. (1).

Приведем также формулы для напряжений внутри области 2 (они получены в [3]) :

$$\sigma_r \approx P_1'\left(1-\frac{b_1^2}{r^2}\right),$$

$$\sigma_\varphi \approx P_1'\left(1+\frac{b_1^2}{r^2}\right), \tag{2b}$$

где $$P_1' \approx \frac{P_1}{1-\left(b_1/R_m\right)^2} \approx P_1 \approx P.$$

Эти формулы подтверждаются экспериментально

ПРИМЕНЕНИЕ

Теория НФМР представлена в работах. [3-6]. Для ферромагнитного металлического цилиндра (с малым радиусом R_m), находящегося в ЛАМНСО, глубина скин-слоя определяется:

$$\delta \sim [\omega(\mu\mu_0)_e\Sigma_2]^{-1/2} \sim \delta_0(\mu)_e^{\ -1/2}, \tag{3}$$

где $(\mu\mu_0)_e$ – эффективная высокочастотная магнитная проницаемость, а Σ_2 - электропроводность микропровода, ω - частота СВЧ.

В случае ЛАМНСО относительная высокочастотная магнитная проницаемость может достигать величины $\mu \sim 10^3$ в диапазоне частот $\omega \sim (9 \ldots 10)$ ГГц ; в этом случае δ уменьшается до (1 ... 2) μм.

Известно (см. [3-5]), что если $R_m > \delta$, то общее выражение для частоты ферромагнитного резонанса (ФМР или для ЕФМР) ω равно:

$$(\omega/\gamma)^2 = (H_k + 4\pi M_s)\cdot H_k, \tag{3a}$$

где M_s - намагничивание насыщенности и γ -гиромагнитное отношение [3, 7]. Область анизотропии оценивается, как $H_k \sim 3\ \lambda\sigma/M_s$, где λ - постоянная магнитострикция, и σ - механические напряжения.

Для частоты ФМР и ЕФМР можно получить

$$\omega(GHz) \approx \omega o\left(\frac{0.4x}{0.4x+1}+\frac{\sigma_{ez}}{\sigma_o}\right)^{1/2}, \tag{4}$$

где $\omega_o(GHz) \approx 1,5(10^6 \lambda)^{1/2}$.

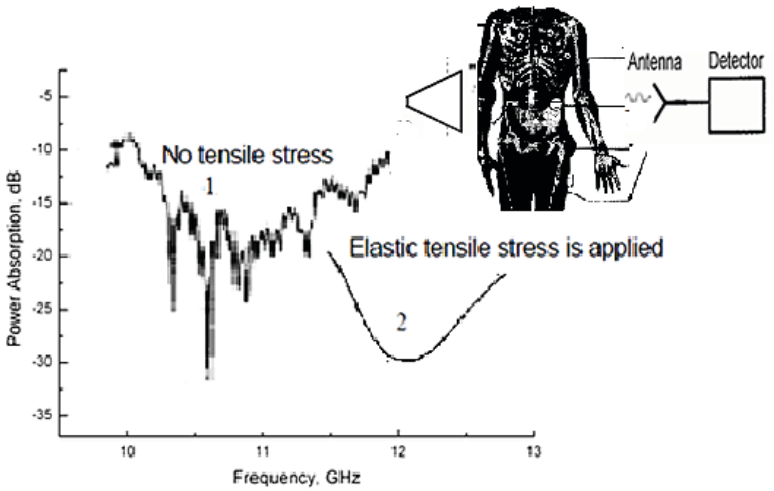


Рис. 3. Частотные зависимости поглощения для образцов композитов с отрезками ЛАМНСО (технология приготовления и измерения образов приведена в [3], а магнитные СВЧ свойства в [7]). Представлены следующие результаты измерений:
1 – Кривая поглощения композита, содержащего отрезки ЛАМНСО для СВЧ частот в пределах от (10 … 12) ГГц для $Fe_{68}C_4B_{16}Si_{10}Mn_2$ (где x ~ 3-5).
2 - Кривая поглощения для СВЧ излучения для данного материала в случае внешнего давления.

На вставке в правом верхнем углу приведен рисунок: схема СВЧ сканирования (с помощью радара), которую можно применять для диагностики напряжений внутри костной системы человека.

ВЫВОДЫ

Приведены (полученные нами ранее [3, 7]) простые аналитические выражения для остаточных напряжений в металлической жиле микро - и нанопровода. Эти остаточные напряжения зависят, например: от отношения внешнего радиуса микро - и нанопровода к радиусу металлической жилы, от отношения модулей Юнга стекла и металла, и от разности коэффициентов термического расширения стекла и металла. Общая теория остаточных напряжений (см., например, [3]) показывает, что остаточные напряжения увеличиваются на поверхности металлической жилы. Это согласуется с изученными нами экспериментальными данными (см., например, [3]). Можно резюмировать, что при изготовлении ЛАМНСО методом Тейлора-Улитовского возникают остаточные напряжения, максимальные значения которых достигаются на поверхности металлической жилы (см. [3-7]) в отличие от прежних теорий (см,, например, [2]).

Для ЛАМНСО частота ЕФМР зависит от остаточных напряжений и приложенных внешних механических напряжений. Явление ЕФМР, которое открыто нами в ЛАМНСО [3, 7], позволяет создавать новые материалы, работающие в области СВЧ с широким диапазоном частот. Существенное свойство ЕФМР в ЛАМНСО характеризуется тем, что в ЛАМНСО существует стресс-эффект (СЭ). Этот СЭ может быть использован для бесконтактной диагностики деформаций в отдаленных объектах. Эти объекты будут периодически сканироваться радаром (с плавающей частотой), чтобы определять отклонения от начальной частоты NFMR. Таким способом можно отследить потенциально опасные деформации и напряжения у любых исследуемых объектов.

Предложенный метод более простой для практической реализации, чем методы работы [8]. Однако ЛАМНСО, если его использовать для диагностики напряжений внутри костной системы, должен быть помещен внутри исследуемого объекта. С помощью СВЧ сканирования и анализа сигнала приемного устройства (радара) можно будет определять напряжения и деформацию костного объекта. Чтобы не облучать весь организм СВЧ излучением, аналогичные материалы с ЛАМНСО можно использовать для экранировки остальной части организма.

Известно, что ЛАМНСО с положительной магнитострикцией обладает прямоугольной петлей гистерезиса с большим скачком Баркгаузена (БСБ), коэрцитивную силу которого можно регулировать как остаточными, так и внешними механическими напряжениями (см., например, [2, 3, 9, 10]). Увеличение остаточных или внешне приложенных продольных напряжений приводит к увеличению коэрцитивной силы. С одной стороны – это служит, на наш взгляд, еще одним доказательством существования продольной магнитной структуры в ЛАМНСО с положительной магнитострикцией, предложенной в [3]. И хотя это экспериментально и теоретически доказано в работах [3, 10], но до сих пор ряд моментов обсуждается и является спорным. Так, например, в работе [11] подробно обследуется магнитная структура микропроводов с других позиций.

Свойством перемагничивания с помощью БСБ обладают различные провода (включая микро- и нанопровода), и магнитная структура их может отличаться от магнитной структуры ЛАМНСО. При этом и возможность длительного существования их в определенном (одном из двух) намагниченном состоянии, и скачкообразный переход из одного намагниченного состояния в другое называют эффектом магнитной бистабильности (по аналогии с подобными эффектами в других разделах физики). Но конкретная доменная структура этих микро- и нанопроводов, как уже отмечено [3], может отличаться друг от друга. Поэтому имеет смысл более широкого теоретического изучения явления бистабильности в магнитных материалах, которое не будет зависеть от конкретной магнитной структуры.

Обычно технология получения бистабильного ферромагнетика (БФ) сводится к формированию в материале резко выраженного градиента магнитного потенциального рельефа, возможного, например, как в ЛАМСО, при наличии квазиод-

ноосной магнитной анизотропии. Тогда оба бистабильных состояния абстрактно можно представить как энергетические уровни системы, разнесенные энергетическим барьером. Ранее БФ получали посредством термической и механической обработки. Так, в частности, была получена широко известная викаллоевая проволока Виганда. В отличие от проволоки Виганда ЛАМСО с положительной магнитострикцией с момента производства является БФ.

Кроме технологии получения ЛАМСО существует технология фирмы «Унитика» (“Unitika Ltd”). Провода, сделанные по технологии «Унитика» (технология называется еще “in rotating water quenching”), обладают другой магнитной структурой [2] и отличными от ЛАМНСО магнитными характеристиками, хотя они также относятся к БФ. Кроме этого, существуют химические и электрохимические методы осаждения нанопроводов и получения наночастиц электроискровым способом. Ряд материалов, полученных по этим технологиям, также могут быть БФ.

Литература:

1. TAYLOR, G. F. A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses. Phys. Rev. 1924, vol. 23, p. 655–660.
2. VAZQUEZ, M.. Soft magnetic wires. Physica B: Condensed Matter. 2001, vol. 299. nr. 3-4, p. 302–313. Доступно: https://doi.org/10.1016/S0921-4526(01)00482-3
3. BARANOV, S. A., LARIN , V. S., TORCUNOV, A. V.. Technology, preparation and properties of the cast glass-coated magnetic microwires. Crystals. 2017, vol. 7, nr.136, p. 1 –12. Доступно: doi:10.3390/cryst7060136
4. HUA-XININ PENG, FAXIANG QIN, MANH-HUONG PHAN. Ferromagnetic microwires composites: from sensors to microwave applications. Springler. 2016. 245 p. Доступно: DOI 10.1007/978-3-319-29276-2
5. STAROSTENKO, S. N., ROZANOV, K. N., OSIPOV, A. V. . Microwave properties of composites with glass coated amorphous magnetic microwires. J. Magn. Magn. Mater. 2006, vol. 298 . nr.1, p. 56–64. Доступно: DOI: 10.1016 / j.jmmm.2005.03.004
6. YILIZ F., RAMEEV, B.Z., TARAPOV, S.I., TAGIPOV, L.R., AKTA, B. High-frequency magnetoresonance absorption in amorphous magnetic microwires. J. Magn. Magn.Mater. 2002, vol. 247, p. 222–229. Доступно: DOI 10.1016 S0304-8853(02)00187-7.
7. ADAR, E., YOSHER, A. M., BARANOV, S. A.. Natural ferromagnetic resonance in cast microwires and its application to the safety control of infrastructures. J. Phys Res Appl. 2020, nr. 3, p. 118-122. Доступно: DOI: 10.29328/journal.ijpra.1001028
8. NEMATOV, M. G., ADAM, A. M., PANINA, L.V., YUDANOV, N.A., DZHUMAZODA, A., MORCHENKO, A.T. , MAKHNOVSKY, D. P., QIN,

F.X.. Magnetic anisotropy and stress-magnetoimpedance (S-MI) in current-annealed Co-rich glass-coated microwires with positive magnetostriction J. Magn. Magn. Mater. 2019, vol. 474, p. 296–302. Доступно: DOI 10.1016/j.jmmm.2018.11.042.

9. BUZNIKOV, N.A., KIM, C.O.. Modeling of torsion stress giant magnetoimpedance in amorphous wires with negative magnetostriction // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, vol. 315. nr. 2 , p. 89–94. Доступно: DOI: 10.1016 / j.jmmm.2007.03.186
10. BARANOV, S. A.. A possibility of application of amorphous micro – and nanowires with the Barkhausen effect. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013, vol. 49, nr. 1, p. 61 –67. Доступно: DOI: 10.3103/S106837551301002X
11. ALEKHINA, IU., KOLESNIKOVA , V., RODIONOVA ,V., ANDREEV, N., PANINA, L, RODIONOVA. V., PEROV. N.. An Indirect Method of Micromagnetic Structure Estimation in Microwires. Nanomaterials. 2021, vol. 11, nr. 274, p.1-16. Доступно: https://doi.org/10.3390/nano11020274

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования проекта (№ 15.817.02.05A) «Физико-химические методы и инженерные аспекты получения новых материалов и поверхностей для многомасштабных технологий»