ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОПРОВОДА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

MICROWIRE PRODUCTION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION

CZU: 621.318.1. **https://doi.org/10.59295/spd2025e.120**

Сергей БАРАНОВ
ORCID: 0009-0001-1111-4893
E-mail: sabaranov07@mail.ru
Молдавский государственный университет, Кишинэу, Республика Молдова

Summary. *The paper analyzes technological aspects of the Taylor-Ulitovsky method used to produce microwires of various structures.Natural ferromagnetic resonance (NFMR) in cast glass-coated amorphous magnetic micro- and nanowires was theoretically and experimentally studied. The NFMR phenomenon is due to the large residual stresses appearing in the core of the microwire during the casting process. These stresses, along with magnetostriction, determine magnetoelastic anisotropy. Besides residual stresses, the NFMR frequency is influenced by externally applied stresses on the microwire or the composite containing the so-called stress effect (SE).*

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

Keywords: *Cast glass-coated amorphous magnetic micro- and nanowire, Magnetostriction, Natural ferromagnetic resonance*

ВВЕДЕНИЕ

В качестве цели настоящей работы – мы хотели бы обратить внимание на возможность решения ряда технологических проблем, связанных с производством и применением микро- и нанопроводов.

Одна из рассматриваемых проблем может быть связана с повышением механической прочности окон в промышленных зданиях и жилых домах. Другая проблема связана с электромагнитным экранированием. Обе эти проблемы связаны с защитой от террористических актов, поскольку террористы используют концентрированные электромагнитные импульсы для уничтожения компьютеров или другого электронного оборудования.

Эти задачи могут быть решены путем изготовления оконных стекол, армированных литыми аморфными микро- и нанопроводами в стеклянной оболочке (ЛАМНСО), имеющими специальный состав и структуру, что, с одной стороны, повышает их прочность на разрыв при механическом разрушении, а также придает им, с другой стороны, экранирующие свойства от электромагнитного излучения.

Предложенные идеи связаны с технологией производства литого аморфного микро- и нанопровода в стеклянной оболочке. 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 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, 7-10]. 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 экранирования остальной части организма.

ПРОИЗВОДСТВО МИКРОПРОВОДА

Известно, что ЛАМНСО изготовляется модифицированным методом Тейлора-Улитовского (см. [1-4]). 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).

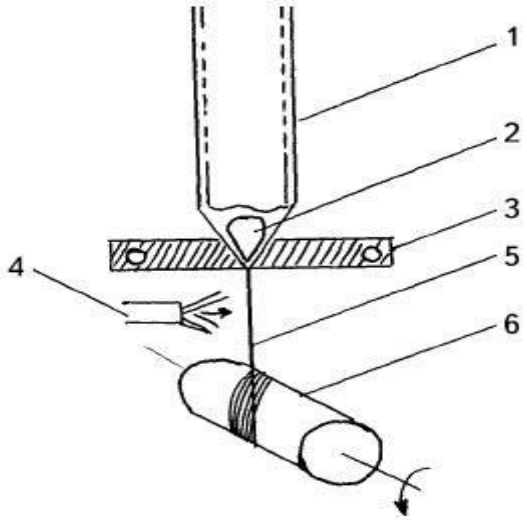


Рисунок 1. Процесс литья микропровода: *1* -стеклянная трубка; *2*- капля металла; *3* –индуктор; *4* –вода; *5* -микропровод со стеклянным покрытием; *6* – вращающаяся катушка для приема

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 ε ~ 2 – 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:

$$R_C \sim \eta^{5/3} V_d^{1/3} \sigma^{2/3}{}_s, \quad (1a)$$

где $k = 1/3$.

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

$$R_C \sim \eta^{4/3} V_d^{2/3} \sigma^{1/3}{}_s, \quad (1b)$$

где $k = 2/3$.

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

$$R_C \sim \eta V_d \quad (1c)$$

Эти формулы подтверждены экспериментом.

Приведем простейшее решение задачи расчета остаточных напряжений (на поверхности между силикатным стеклом и металлом) 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]:

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

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

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

$$\sigma_m = \varepsilon E_1, \quad \varepsilon = (\alpha_1 - \alpha_2)(T^* - T) \approx 5 \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

α_i – коэффициенты термического расширения (КТР) 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 *($D_c = 2R_c$)*:

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

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:

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

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 металла (они представлены в [3]):

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

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

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

где

Эти формулы подтверждаются экспериментально

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ МИКРОПРОВОДА

Теория НФМР представлена в работах [3-7]. Для ферромагнитного металлического цилиндра (с малым радиусом R_m), находящегося в ЛАМНСО, глубина скин-слоя определяется:

$$\text{™} \sim [\text{¬}(\text{⌠}\text{⌠}_0)_e\Sigma_2]^{-1/2} \sim \text{™}_0(\text{⌠})_e^{-1/2}, \quad (3)$$

где $(\text{⌠}\text{⌠}_0)_e$ – эффективная высокочастотная магнитная проницаемость, а Σ_2 - электропроводность микропровода, ¬ - частота СВЧ.

В случае ЛАМНСО относительная высокочастотная магнитная проницаемость может достигать величины ~ 10^3в диапазоне частот ~ (9 - 10) ГГц; в этом случае глубина скин-слоя уменьшается до (1 - 2) мкм.

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

$$(\omega/\gamma)^2 = (Hk + 4\pi M_s)\cdot Hk, \quad (3, \text{а})$$

где M_s - намагничивание насыщенности и γ -гиромагнитное отношение [3, 7]. Величина анизотропии оценивается, как $Hk \sim 3\,\lambda\sigma/M_s$, где λ - постоянная магнитострикция, и σ –эффективные механические напряжения в металлической жиле ЛАМНСО.

Для частоты ФМР и ЕФМР можно получить:

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

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

Таким образом, изменение геометрических параметров ЛАМНСО, приложенного внешнего напряжения и, главное, за счет магнитострикции позволяет перекрывать частотный диапазон от 1 до 12 ГГц, что создает предпосылки для применения ЛАМНСО для предложенных выше целей.

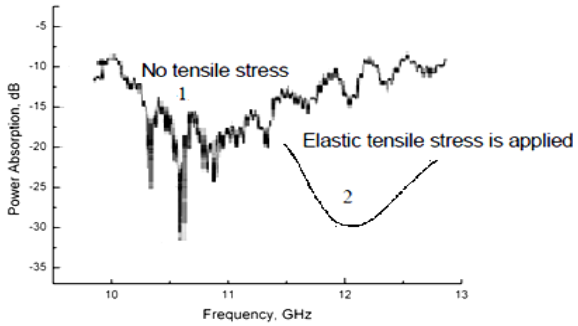


Рисунок 2. а) - средние поглощающие способности экрана, содержащего микропровода с ЕФМР в микроволновых частотах в пределах от (10 - 12) ГГц для микропроводов из$Fe_{68}C_4B_{16}Si_{10}Mn_2$ (R_m ~ 5 мкм, x~ 5); б) – гипотетическая кривая поглощения в случае внешнего давления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье отражены основные результаты теории и эксперимента для производства литых микропроводов со стеклянной оболочкой. Метод непрерывного литья микропроводов со стеклянным покрытием (метод Тейлора–Улитовского) имеет некоторые ограничения, определяемые физическими свойствами металла и стекла. Диапазон рабочих температур литья специфичен для данного состава металлического сплава и определенного типа стекла, т. е. для каждой пары металлический сплав — стекло.

Предложены простые аналитические выражения для остаточных напряжений в металлической сердцевине микропровода, которые наглядно показывают их зависимость от отношения радиуса микропровода к радиусу металлического ядра и от соотношения модулей Юнга стекла и металла (см. формулы (1) и (2)). Теоретическое моделирование в соответствии с теорией термоупругой релаксации показывает, что остаточные напряжения возрастают от оси микропровода до поверхности его металлического сердечника, что соответствует полученным ранее экспериментальным данным. Таким образом, при изготовлении литых микропроводов методом Тейлора–Улитовского остаточные напряжения достигают максимальных значений на поверхности металлического сердечника.

Особенностью этих литых микропроводов является наличие остаточных напряжений, возникающих из-за разницы коэффициентов теплового расширения металлического сплава и стеклянного покрытия. Эта особенность является основным фактором, определяющим физические свойства таких микропроводов, в частности, их магнитные свойства.

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.

Рассмотрено применение микропроводов в композитах для улучшения поглощающих характеристик экранирования.

Конфликт интересов. Автор заявляет, что у него нет известных финансовых конфликтов интересов, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Taylor, G.F. A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses. *Physical Review.* 1924;23(5): 655–660.
2. Vazquez, M. Soft magnetic wires. *Physica B: Condensed Matter.* 2001; 299(3-4): 302–313.
3. Baranov, S.A., Larin V.S., Torcunov A. V. Technology, preparation and properties of the cast glass-coated magnetic microwires. *Crystals.* 2017; 7(6): 1 –12.
4. Peng, H.X., Qin F. X., Phan M.H. Ferromagnetic microwires composites: from sensors to microwave applications. Springler: 2016. 245 p. https://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. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.*2006; 298 (1): 56–64.
6. Yıldız, F., Rameev B. Z., Tarapov S. I., Tagirov, L. R.,Aktaş B. High-frequency magnetoresonance absorption in amorphous magnetic microwires.*Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2002; 247(2): 222–229.
7. Adar, E., Yosher, A. M., Baranov, S. A. Natural ferromagnetic resonance in cast microwires and its application to the safety control of infrastructures. *International Journal of Physics Research and Applications*. 2020;3(1): 118-122.
8. Nematov, M. G., Adam, A. M., Panina, L.V., … Qin F. X. Magnetic anisotropy and stress-magnetoimpedance (S-MI) in current-annealed Co-rich glass-coated microwires with positive magnetostriction. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2019;474: 296–302.
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;315(2): 89–94.
10 Buznikov, N.A., Svalov, A. V., Kurlyandskaya, G. V., Influence of the parameters of permalloy-based multilayer film structures on the sensitivity of magnetic impedance effect, *Phys. Met. Metallogr.* 2021, 122, 223–229.

Источник финансирования: *Работа выполнена при поддержке Молдавского национального проекта и проекта Приднестровского университета имени Шевченко.*

Рисунки

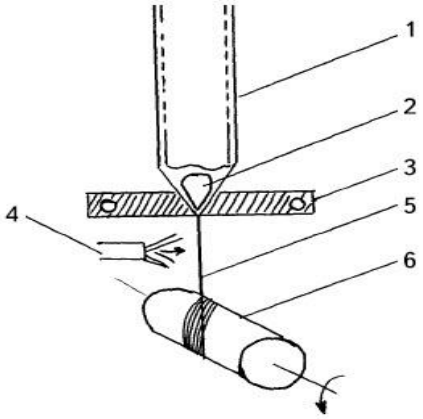


Рис. 1. Процесс литья микропровода: *1* -стеклянная трубка; *2*- капля металла; *3* –индуктор; *4* –вода; *5* -микропровод со стеклянным покрытием; *6* – вращающаяся катушка для приема

Fig. 1. Process of microwires: *1* -glass tube; *2* -drop of metal; *3* –inductor; *4* –water; *5* -glass-coated microwire; *6* - rotating receiving bobbin

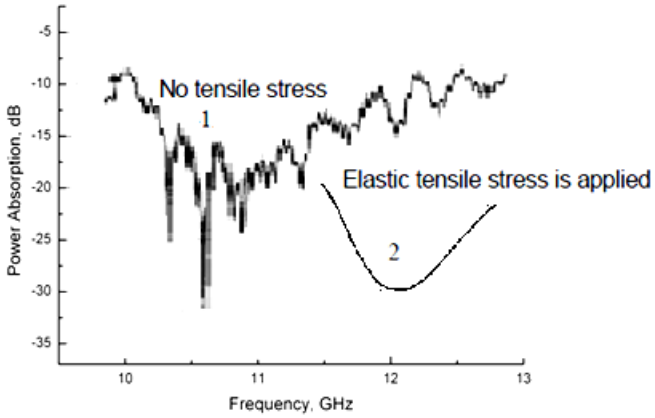


Рис.2. *1* **-** средние поглощающие способности экрана, содержащего микропровода с ЕФМР в микроволновых частотах в пределах от (10 - 12) ГГц для микропроводов из$Fe_{68}C_4B_{16}Si_{10}Mn_2$ (R_m ~ 5 мкм, *x*~ 5); 2 – гипотетическая кривая поглощения в случае внешнего давления

Fig. 2. *1* **–** average absorption characteristics of a shielding containing a microwire composite exhibiting NFMR at microwave frequencies ranging from (10 - 12) GHz for $Fe_{68}C_4B_{16}Si_{10}Mn_2$ microwires (R_m ~ 5 μm, *x* ~ 5); *2* – hypothetical absorption curve in case of an external pressure