

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.4:539.213.27:53.096:53.098

МАГНИТНАЯ ПРЕДЫСТОРИЯ И СТРЕССИМПЕДАНСНЫЙ ЭФФЕКТ В АМОРФНЫХ ПРОВОДАХ CoFeNbSiB

© 2022 г. Д. А. Букреев^а, *, М. С. Деревянко^а, Д. Н. Голубев^а, А. А. Моисеев^а, А. В. Семиров^а

^аИркутский государственный университет, ул. К. Маркса, 1, Иркутск, 664003 Россия

*e-mail: da.bukreev@gmail.com

Поступила в редакцию 03.03.2022 г.

После доработки 01.04.2022 г.

Принята к публикации 04.04.2022 г.

Исследовано влияние растягивающих механических напряжений и аксиального магнитного поля на импеданс аморфных проводов $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$, предварительно намагниченных циркулярным магнитным полем постоянного электрического тока. Предварительное циркулярное намагничивание приводит к заметным изменениям импеданса проводов, а воздействие растягивающих механических напряжений и аксиального магнитного поля возвращают импеданс к первоначальным значениям. Предложено использование обнаруженных закономерностей для создания запоминающих датчиков деформаций.

Ключевые слова: магнитоимпеданс, аморфные сплавы, сенсоры, магнитная предыстория, гистерезис магнитоимпеданса

DOI: 10.31857/S0015323022080022

ВВЕДЕНИЕ

На самых ранних этапах изучения магнитоимпедансного эффекта, заключающегося в зависимости электрического импеданса магнитомягкого проводника от напряженности внешнего магнитного поля [1, 2], было замечено, что данному эффекту свойственен гистерезис. Данное явление связано с магнитным гистерезисом и стало предметом многочисленных научных исследований [3–6]. В случае объектов цилиндрической геометрии гистерезис магнитоимпеданса изучали как при аксиальном, так и циркулярном перемагничивании [7].

На примере микропроводов на основе кобальта было показано, что существенный вклад в гистерезис магнитоимпеданса может внести магнитное взаимодействие кора и оболочки [7, 8]. При этом выраженность гистерезиса зависела от напряженности внешнего аксиального магнитного поля, используемого для предварительного намагничивания микропровода. Более того, при предварительном намагничивании микропровода с геликоидальной анизотропией сначала аксиальным, а затем циркулярным магнитным полем, начальный импеданс (импеданс, измеренный в нулевом внешнем магнитном поле) зависит от взаимной ориентации этих полей (левый винт или правый винт) [7].

Влияние предварительного намагничивания аксиальным и циркулярным магнитными полями на магнитоимпеданс также было обнаружено в случае аморфных проводов CoFeNbSiB [9]. Было установлено, что начальный импеданс сильно зависит от того, полями какого направления, аксиального или циркулярного, какой напряженности и в какой последовательности проводили их предварительное намагничивание. Обнаруженные закономерности не укладывались в модель взаимодействия “кор-оболочка”, и авторы предположили, что они связаны с изменениями магнитной доменной структуры оболочки проволок.

Нужно также отметить, что гистерезис магнитоимпеданса в материалах с анизотропией высокого порядка может быть связан со спин-переходом фазовым переходом [10].

Гистерезис магнитоимпеданса приводит к нежелательной вариации показаний магнитоимпедансных датчиков, в том числе перспективных для биологии и медицины [11, 12]. Одним из путей устранения гистерезиса является термообработка, в результате которой происходит гомогенизация аморфного сплава [5].

С другой стороны, благодаря гистерезису магнитоимпеданса можно говорить о создании быстродействующих элементов памяти [7] или энергонезависимых запоминающих датчиков тока [9].

Гистерезис магнитоимпеданса может стать инструментом изучения магнитомягких проводников с неоднородным распределением магнитных свойств по сечению [6], своего рода инструментом для магнитоимпедансной томографии.

Наряду с магнитоимпедансом активно продолжает изучаться стрессимпеданс. Данный эффект заключается в изменении импеданса под действием механических напряжений и наблюдается в тех же объектах, что и магнитоимпеданс [13–16]. Однако лишь в малой части работ, посвященных стрессимпедансу, обсуждается его гистерезис [14]. А работы, в которых исследовали бы стрессимпеданс аморфных магнитомягких проводов после предварительного намагничивания циркулярным магнитным полем, не встречаются совсем. Хотя эти исследования имели бы практическую ценность при разработке датчиков механических напряжений на основе стрессимпеданса [17].

В настоящей статье обсуждаются влияние растягивающих механических напряжений и аксиального магнитного поля на импеданс аморфных проводов CoFeNbSiB , предварительно намагниченных циркулярным магнитным полем постоянного электрического тока.

ОБРАЗЦЫ

И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

В качестве образцов выступали отрезки аморфного провода состава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ длиной 30 мм и радиусом $r_0 = 90$ мкм. Намагниченность насыщения составляла около 320 кА/м.

Измерение модуля электрического импеданса Z проводили на установке, которая разработана авторами и описана в работе [16]. Действующее значение силы переменного тока I_{AC} , протекающего вдоль образца, составляло 1 мА. Его частоту f варьировали в диапазоне от 2 до 80 МГц. Аксиальное магнитное поле H_z создавали парой колец Гельмгольца, его максимальная напряженность, H_z^{\max} , составляла 12 кА/м. Циркулярное магнитное поле H_ϕ , используемое для предварительного намагничивания, создавали постоянным током I_{pr} , протекающим по образцу вдоль его длины. Максимальная сила этого тока составляла 100 мА, чему соответствовали напряженность у поверхности проволоки H_ϕ^{\max} около 177 А/м и плотность тока $j = 3.9 \times 10^6$ А/м². Согласно [18], нагрев проводов CoFeNbSiB при прохождении тока такой плотности не приводит к необратимым структурным изменениям, как и к необратимым изменениям импеданса.

Растягивающие механические напряжения σ создавали аксиальной силой. Их максимальное значение составляло 400 МПа.

Перед измерением импеданса выполняли предварительное намагничивание образца следующим образом: 1) намагничивание образца аксиальным магнитным полем напряженностью H_z^{\max} ; 2) отключение поля H_z^{\max} ; 3) намагничивание образца циркулярным магнитным полем H_ϕ , создаваемым током I_{pr} ; 4) отключение тока I_{pr} . Взаимная ориентация полей H_z^{\max} и H_ϕ не оказывала заметного влияния на импеданс образца. Отметим, что во время измерения импеданса ток I_{pr} был отключен, т.е. циркулярное магнитное поле отсутствовало.

Величину магнитоимпедансного эффекта определяют с помощью выражения

$$MI(H_z) = \frac{Z(H_z) - Z(H_z^{\max})}{Z(H_z^{\max})} \times 100\%. \quad (1)$$

Относительное изменение импеданса после предварительного циркулярного намагничивания рассчитывали по формуле

$$(\Delta Z/Z)_\phi = \frac{Z_0(I_{pr}) - Z_0(I_{pr} = 0)}{Z_0(I_{pr} = 0)} \times 100\%, \quad (2)$$

где $Z_0(I_{pr})$ – импеданс, измеренный при $H_z = 0$ и $\sigma = 0$ после предварительного циркулярного намагничивания полем, создаваемым током I_{pr} . В свою очередь, $I_{pr} = 0$ означает, что предварительное циркулярное намагничивание не проводили.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитоимпедансный эффект на частоте 2 МГц в отсутствие механических напряжений достигает величины 900% (рис. 1а), однако возрастающий участок в малых полях выражен слабо, что говорит о преимущественно аксиальной анизотропии [19]. С приложением растягивающих механических напряжений зависимость $MI(H_z)$ приобретает вид “один пик”. Высота этого пика с ростом σ уменьшается.

С повышением частоты переменного тока зависимости $MI(H_z)$ в отсутствие механических напряжений приобретают явно выраженный вид “два пика” (рис. 1б). Это говорит о том, что с ростом частоты толщина скин-слоя уменьшается, и ток сосредотачивается в области провода с преимущественно циркулярной анизотропией – в оболочке, если следовать модели распределения намагниченности “аксиально намагниченный кор–циркулярно намагниченная оболочка” [19, 20]. Благодаря

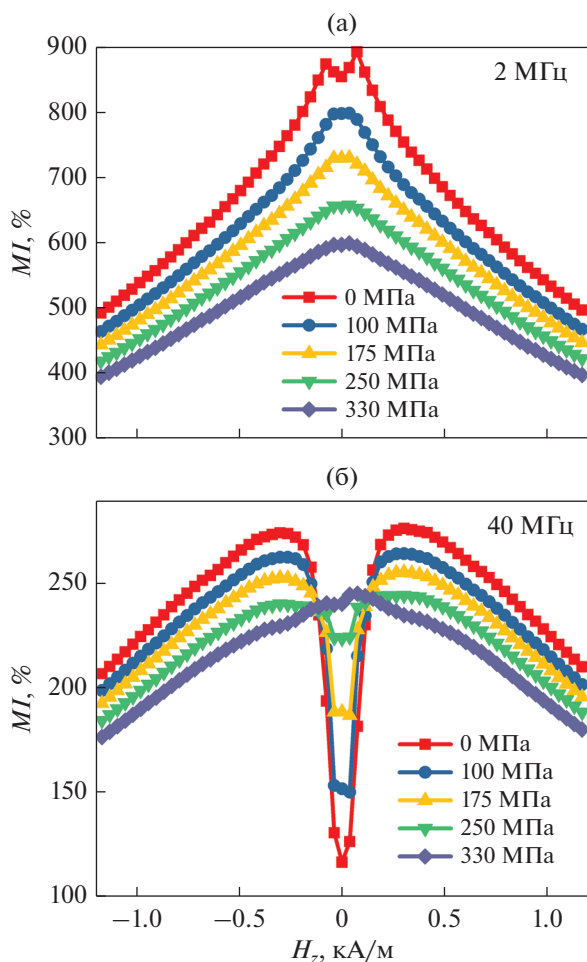


Рис. 1. Зависимости магнитоимпедансного эффекта в проволоках $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ от напряженности внешнего аксиального магнитного поля H_z при различных механических напряжениях σ . Предварительное циркулярное намагничивание проволок не выполняли ($I_{pr} = 0$). Зависимости получены на частотах переменного тока: (а) 2 МГц; (б) 40 МГц.

тому, что зависимости $MI(H_z)$ имеют вид “два пика”, влияние механических напряжений на магнитоимпеданс можно проследить более детально. Как видно, с ростом механических напряжений увеличивается значение MI в нулевом поле, а также уменьшается поле пика. Другими словами, наблюдается эволюция зависимостей от вида “два пика” к виду “один пик”. Это свидетельствует о положительной магнитострикции материала исследуемого провода [15]. Используя подход, предложенный в работе [21], можно оценить и ее величину: $\lambda_s \sim 10^{-7}$.

Вид зависимостей $(\Delta Z/Z)_\phi(I_{pr})$, характеризующих изменение импеданса в результате предварительного циркулярного намагничивания, на всех

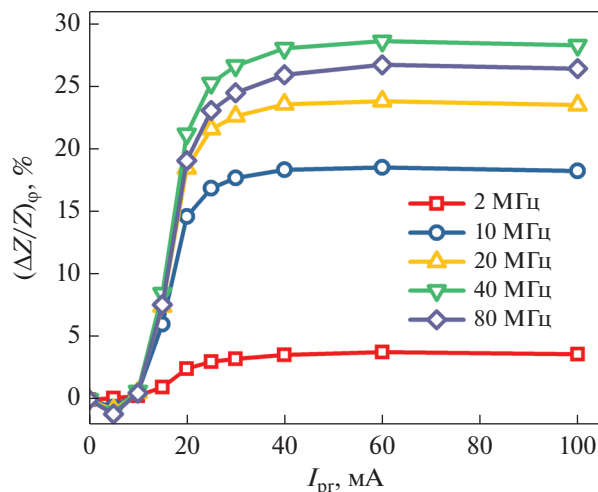


Рис. 2. Относительное изменение импеданса $(\Delta Z/Z)_\phi$ в результате предварительного циркулярного намагничивания током I_{pr} . Зависимости приведены для некоторых частот переменного тока в диапазоне от 2 до 80 МГц.

исследованных частотах переменного тока одинаков (рис. 2). Максимальных значений – более 25% – величина $(\Delta Z/Z)_\phi$ достигает на частоте около 40 МГц. Отметим также следующие особенности зависимостей $(\Delta Z/Z)_\phi$. В интервале I_{pr} от 0 до 10 мА наблюдали слабое изменение $(\Delta Z/Z)_\phi$. С дальнейшим увеличением I_{pr} наблюдали значительный рост $(\Delta Z/Z)_\phi$, продолжающийся приблизительно до 40 мА. После этого $(\Delta Z/Z)_\phi$ изменяется слабо: кривые выходят на плато.

На рис. 3 приведены стрессимпедансные зависимости для проволоки, предварительно намагниченной циркулярным полем тока $I_{pr} = 100$ мА. Видно, что на частоте переменного тока 2 МГц с увеличением механических напряжений импеданс уменьшается (рис. 3а). Это, как и в случае зависимости $MI(H_z)$, полученной на той же частоте (рис. 1а), говорит о том, что основной вклад в импеданс дает область с преимущественно аксиальной анизотропией. Также нужно отметить, что прямые и обратные ветви зависимости практически совпадают.

С повышением частоты переменного тока на зависимостях $Z(\sigma)$ появляется возрастающий участок: с ростом σ импеданс увеличивается, при некотором значении механических напряжений σ_p достигает максимума (например, на частоте 40 МГц $\sigma_p \approx 250$ МПа), а затем уменьшается (рис. 3б). Появление возрастающего участка связано с увеличением вклада оболочки проволоки, имеющей преимущественно циркулярную анизотропию. При этом прямая и обратная ветви зависимости

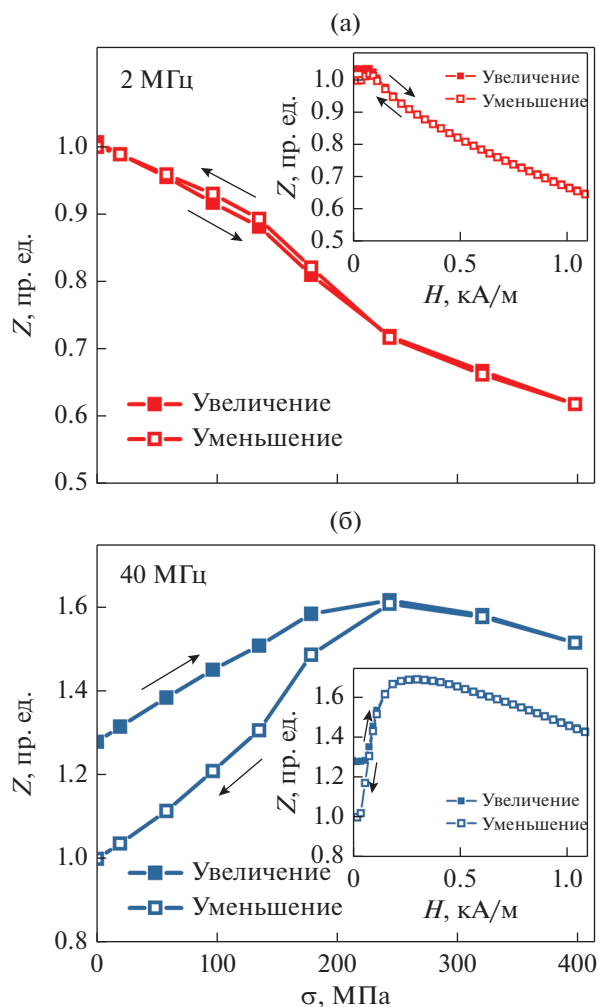


Рис. 3. Зависимости приведенных значений импеданса Z от величины растягивающих механических напряжений σ (закрашенные маркеры: механические напряжения увеличиваются; открытые маркеры: механические напряжения уменьшаются). На вставках: зависимости импеданса от напряженности внешнего аксиального магнитного поля H_z (закрашенные маркеры: напряженность поля увеличивается; открытые маркеры: напряженность поля уменьшается). Зависимости получены после предварительного циркулярного намагничивания постоянным током $I_{pr} = 100$ мА на частотах переменного тока: (а) 2 МГц; (б) 40 МГц.

при $\sigma < \sigma_p$ не совпадают: обратная ветвь идет заметно ниже.

Магнитоимпедансные зависимости $Z(H_z)$ проволоки, предварительно намагниченной магнитным полем тока $I_{pr} = 100$ мА, ведут себя аналогично зависимостям $Z(\sigma)$ (рис. 3, вставки): на высоких частотах переменного тока обратная ветвь идет ниже прямой ветви; на низких частотах ветви практически совпадают. Близки и пределы, в которых изменяется импеданс.

Если предварительное циркулярное намагничивание не выполняется ($I_{pr} = 0$), то прямые и обратные ветви на зависимостях $Z(\sigma)$ и $Z(H_z)$ практически совпадают с ветвями, полученными при уменьшающихся σ и H_z соответственно (на рис. 3 не показаны).

Как это обсуждали в работе [9], аксиальное магнитное поле изменяет магнитную доменную структуру, наведенную в оболочке провода предварительным циркулярным намагничиванием, что и приводит к несовпадению прямых и обратных ветвей зависимостей $Z(H_z)$ (рис. 3, вставки). Как мы определили выше, исследуемые проволоки имеют положительную магнитострикцию, поэтому растягивающие механические напряжения, как и аксиальное магнитное поле, ориентируют намагниченность вдоль длины провода. Другими словами, действие растягивающих механических напряжений оказывается аналогичным действию аксиального магнитного поля, и они изменяют магнитную доменную структуру, сформировавшуюся после предварительного циркулярного намагничивания. По этой причине прямые и обратные ветви зависимостей $Z(\sigma)$ также не совпадают.

Эффект изменения состояния, наведенного предварительным циркулярным намагничиванием, в результате действия растягивающих механических напряжений может быть использован для создания запоминающего сенсора деформаций.

Относительную разность значений импеданса на прямой и обратной ветвях зависимости $Z(\sigma)$ рассчитывали по формуле

$$(\Delta Z/Z)_\sigma = \frac{Z_{incr}(\sigma) - Z_{decr}(\sigma)}{Z_{decr}(\sigma)} \times 100\%, \quad (3)$$

где $Z_{incr}(\sigma)$ и $Z_{decr}(\sigma)$ – значения импеданса при упругих напряжениях σ на прямой и обратной ветвях зависимости $Z(\sigma)$, приведенной на рис. 3. Обнаружили, что с ростом частоты переменного тока и при $\sigma < \sigma_p$ $(\Delta Z/Z)_\sigma$ сначала увеличивается, достигает максимума вблизи некоторой частоты f_m , а затем уменьшается (рис. 4). При $\sigma = 0$ частота f_m приблизительно равна 40 МГц и с увеличением σ повышается. При $\sigma > \sigma_p$ величина $(\Delta Z/Z)_\sigma$ становится близкой к нулю.

Обнаруженное увеличение $(\Delta Z/Z)_\sigma$ с повышением частоты переменного тока можно объяснить с точки зрения скин-эффекта – чем выше f , тем больше вклад оболочки провода, где после предварительного циркулярного намагничивания в основном и происходят все изменения. Уменьшение $(\Delta Z/Z)_\sigma$ на частотах выше f_m , вероятно, связано с увеличением вклада шероховатостей на поверхности провода. Смещение максимума частотной зависимости $(\Delta Z/Z)_\sigma(f)$ вправо с увеличением растягивающих напряжений вызвано уменьшением магнитной проницаемости аксиально намагни-

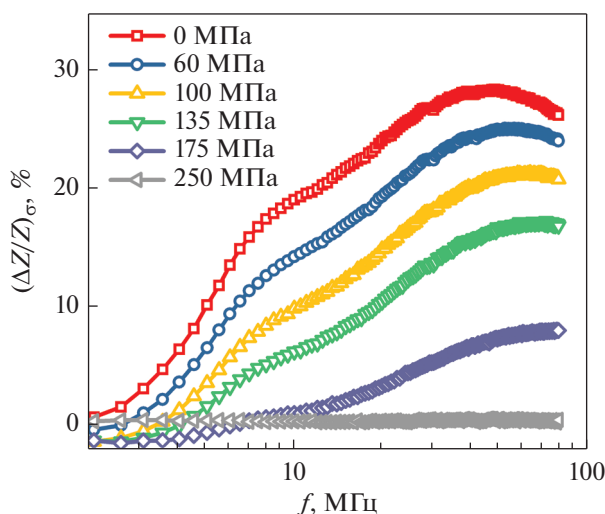


Рис. 4. Зависимости величины $(\Delta Z/Z)_{\sigma}$, рассчитанной по формуле (3), от частоты переменного тока, приведенные для различных значений растягивающих механических напряжений.

ченного кора, что приводит к увеличению толщины скин-слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе исследования было изучено влияние растягивающих механических напряжений и аксиального магнитного поля на импеданс аморфных проводов $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ с малой положительной магнитострикцией, предварительно намагниченных циркулярным магнитным полем постоянного электрического тока.

Установлено, что увеличение импеданса в результате предварительного циркулярного намагничивания превышает 25%. После воздействия как растягивающих механических напряжений, так и аксиального магнитного поля импеданс возвращается к значениям, имевшимся до предварительного циркулярного намагничивания.

Предложено использование эффекта изменения состояния, наведенного предварительным циркулярным намагничиванием, в результате действия растягивающих механических напряжений для создания запоминающего сенсора деформаций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00709, <https://rscf.ru/project/22-22-00709/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panina L.V., Mohri K.* Magneto-impedance effect in amorphous wires // *Appl. Phys. Letters*. 1994. V. 65. P. 1189–1191.

2. *Beach R.S., Berkowitz A.E.* Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire // *Appl. Phys. Letters*. 1994. V. 64. P. 3652–3654.

3. *Sommer R.L., Chien C.L.* Role of magnetic anisotropy in the magnetoimpedance effect in amorphous alloys // *Appl. Phys. Letters*. 1995. V. 67. P. 857–859.

4. *Sinnecker J.P., Tiberto P., Kurlyandskaya G.V., Sinnecker E.H.C.P., Vázquez M., Hernando A.* Hysteretic giant magneto impedance // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 84. P. 5814–5816.

5. *Vázquez M., Sinnecker J.P., Kurlyandskaya G.V.* Hysteretic Behavior and Anisotropy Fields in the Magneto-Impedance Effect // *Mater. Sci. Forum*. 1999. V. 302–303. P. 209–218.

6. *Arzuza L.C.C., Béron F., Pirota K.R.* High-frequency GMI hysteresis effect analysis by first-order reversal curve (FORC) method // *J. Magn. Magn. Mater.* 2021. V. 534. P. 168008.

7. *Ipatov M., Zhukova V., Zhukov A., Gonzalez J.* Current controlled switching of impedance in magnetic conductor with tilted anisotropy easy axis and its applications // *Sci. Reports*. 2016. V. 6. P. 36180.

8. *Freijo J.J., Hernando A., Vázquez M., Méndez A., Ramanan V.R.* Exchange biasing in ferromagnetic amorphous wires: A controllable micromagnetic configuration // *Appl. Phys. Letters*. 1999. V. 74. P. 1305–1307.

9. *Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Kudryavtsev V.O., Semirov A.V.* Influence of the magnetic prehistory of amorphous magnetically soft wires on their electrical impedance // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. V. 303. P. 111669.

10. *Kurlyandskaya G.V., Bebenin N.G., Vas'kovsky V.O.* Giant magnetic impedance of wires with a thin magnetic coating // *Phys. Met. Metal*. 2011. V. 111. P. 133–154.

11. *Yang Z., Chlenova A.A., Golubeva E.V., Volchikov S.O., Guo P., Shcherbinin S.V., Kurlyandskaya G.V.* Magneto-impedance Effect in the Ribbon-Based Patterned Soft Ferromagnetic Meander-Shaped Elements for Sensor Application // *Sensors*. 2019. V. 19. P. 2468.

12. *Buznikov N.A., Kurlyandskaya G.V.* A Model for the Magnetoimpedance Effect in Non-Symmetric Nanostructured Multilayered Films with Ferrogel Coverings // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 5151.

13. *Knobel M., Sanchez M.L., Velazquez J., Vazquez M.* Stress dependence of the giant magneto-impedance effect in amorphous wires // *J. Phys. Condensed Matter*. 1995. V. 7. P. L115–L120.

14. *Gazda P., Nowicki M., Szewczyk R.* Comparison of Stress-Impedance Effect in Amorphous Ribbons with Positive and Negative Magnetostriction // *Materials*. 2019. V. 12. P. 275.

15. *Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Kurlyandskaya G.V., Semirov A.V.* Temperature Dependence of the Impedance of Amorphous Elastically Deformed CoFeSiB Ribbons // *Phys. Met. Metal*. 2021. V. 122. P. 1075–1080.

16. *Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Semirov A.V., Savin P.A., Kurlyandskaya G.V.* Magneto-impedance and Stress-Impedance Effects in Amor-

- phous CoFeSiB Ribbons at Elevated Temperatures // *Materials*. 2020. V. 13. P. 3216.
17. Mohri K., Uchiyama T., Shen L.P., Cai C.M., Panina L.V. Sensitive micro magnetic sensor family utilizing magneto-impedance (MI) and stress-impedance (SI) effects for intelligent measurements and controls // *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2001. V. 91. P. 85–90.
 18. Semirov A.V., Gavriilyuk A.A., Kudryavtsev V.O., Moiseev A.A., Bukreev D.A., Semenov A.L., Ushchapovskaya Z.F. The effect of annealing on impedance properties of elastically deformed soft magnetic wires // *Russian J. Nondestructive Testing*. 2007. V. 43. P. 639–642.
 19. Usov N.A., Antonov A.S., Lagar'kov A.N. Theory of giant magneto-impedance effect in amorphous wires with different types of magnetic anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* 1998. V. 185. P. 159–173.
 20. Vázquez M., Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications // *J. Phys. D: Applied Physics*. 1996. V. 29. P. 939–949.
 21. Knobel M., Gómez-Polo C., Vázquez M. Evaluation of the linear magnetostriction in amorphous wires using the giant magneto-impedance effect // *J. Magn. Magn. Mater.* 1996. V. 160. P. 243–244.