

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.4:539.213.27:53.096:53.098

### ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИМПЕДАНСА АМОРФНЫХ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННЫХ ЛЕНТ $\text{CoFeSiB}$

© 2021 г. Д. А. Букреев<sup>a, \*</sup>, М. С. Деревянко<sup>a</sup>, А. А. Моисеев<sup>a</sup>,  
Г. В. Курляндская<sup>b, c</sup>, А. В. Семиров<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Иркутский государственный университет, ул. К. Маркса, 1, Иркутск, 664003 Россия

<sup>b</sup>Университет Страны Басков, Лейоа, 48940 Испания

<sup>c</sup>Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

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

Поступила в редакцию 09.07.2021 г.

После доработки 17.07.2021 г.

Принята к публикации 20.07.2021 г.

Исследована температурная зависимость магнитного импеданса быстроокаленных аморфных лент сплава  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$  в диапазоне температур от 295 до 405 К. Обнаружено, что растягивающие механические напряжения оказывают значительное влияние на характер температурной зависимости импеданса. Предложена модель, хорошо согласующаяся с результатами эксперимента, учитывающая температурные изменения намагниченности насыщения, константы эффективной магнитной анизотропии, константы магнитострикции и ее зависимость от величины механических напряжений.

**Ключевые слова:** магнитоимпеданс, аморфные сплавы, магнитомягкие сплавы, сенсоры

**DOI:** 10.31857/S001532302111005X

#### ВВЕДЕНИЕ

Неослабевающий интерес исследователей к аморфным магнитомягким лентам обусловлен многообразием процессов перемагничивания, наблюдающихся в материалах данного типа и обуславливающих широкие возможности их приложений в технике и медицине [1, 2]. Один из наблюдающихся в образцах в виде лент эффектов — магнитный импеданс (МИ). Явление МИ заключается в изменении комплексного электрического сопротивления ферромагнитного проводника протекающему по нему переменному току под действием внешнего магнитного поля [3, 4]. Сильные изменения импеданса имеют место тогда, когда магнитная проницаемость как функция поля имеет выраженные особенности. Такая ситуация реализуется, например, в аморфных и нанокристаллических лентах, в которых магнитную анизотропию можно изменять с помощью, например, отжига или термомеханической обработки [5, 6].

Высокие значения МИ, его чувствительности по отношению к внешнему магнитному полю и относительная простота измерений импеданса быстроокаленных лент открывает широкие перспективы использования аморфных магнитомягких лент в качестве измерительных преобразователей датчи-

ков слабых магнитных полей [7], предназначенных, в том числе, и для биомедицинских приложений [8].

В последнее время уделяется повышенное внимание изучению влияния температуры на импеданс и магнитный импеданс. Исследования в этом направлении важны для определения температурных диапазонов термической стабильности и термообратимости МИ-сенсоров [9, 10], а высокая чувствительность импеданса к изменениям температуры, достигаемая в некоторых случаях, позволяет говорить о создании температурных сенсоров, широко востребованных для контроля различных устройств. Так, было обнаружено, что температурное изменение МИ аморфной ленты  $\text{CoFeMoSiB}$  в присутствии механических напряжений может достигать 3%/К [11]. С фундаментальной точки зрения такие исследования позволяют изучить температурные изменения магнитоупругих свойств аморфных магнитомягких сплавов, что немаловажно, ведь магнитная анизотропия аморфных сплавов имеет преимущественно магнитоупругую природу [12]. Например, в работах, посвященных изучению температурных изменений импеданса упругодеформированных лент [11] и проволок [13] на основе кобальта было обнаружено изменение знака магнитострикции и определена температура ее компенсации. При ис-

следовании лент CoFeSiB ранее было показано, что характер магнитоимпедансных зависимостей в присутствии растягивающих напряжений может существенно изменяться при изменении температуры [14].

В настоящей работе представлены результаты исследования температурных зависимостей импеданса в диапазоне температур от 295 до 405 К для упругодеформированных аморфных лент CoFeSiB, прошедших термообработку при температуре 425 К.

### ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Аморфные ленты сплава  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$ , полученные методом быстрой закалки из расплава на вращающийся барабан, имели толщину 24 мкм и ширину 710 мкм. Их подвергали термообработке при температуре 425 К в течение 8 ч. Аморфное состояние образцов до и после обработки было подтверждено данными рентгенофазового анализа, выполненного на установке PANalytical X'Pert PRO X-ray Diffractometer в  $\text{Cu-K}\alpha$ -излучении, длина волны  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ . Отжиг в выбранном режиме не привел к сколько-нибудь существенному изменению структурного состояния (рис. 1).

Для исследования магнитных свойств и электрического импеданса использовали образцы длиной 30 мм. Магнитные свойства изучали индукционным методом в продольном магнитном поле, изменяющемся с частотой 1 кГц и амплитудой 1.5 кА/м.

Модуль импеданса образцов  $Z$  измеряли на разработанной ранее автоматизированной установке, описание которой представлено в работе [14]. Измерения  $Z$  проводили на частоте переменного тока  $f = 10 \text{ МГц}$ , вблизи которой наблюдается максимальный МИ [14]. Действующее значение силы тока составляло 1 мА.

Измерения импеданса проводили в диапазоне температур от 295 до 405 К, что значительно ниже температуры Кюри  $T_C \approx 630 \text{ К}$  данных материалов.

Внешнее магнитное поле  $H$  было ориентировано вдоль длины ленты, его максимальная напряженность в эксперименте составляла  $H_{\max} = 12 \text{ кА/м}$ . Растягивающие напряжения  $\sigma$  создавались силой, действующей вдоль длинной стороны образца. Их максимальное значение составляло  $\sigma_{\max} = 690 \text{ МПа}$ .

Относительное температурное изменение  $Z$  рассчитывали по формуле для термоимпеданса ( $TI$ ):

$$TI(T) = \frac{Z(T) - Z(T = 295 \text{ К})}{Z(T = 295 \text{ К})} \times 100\%. \quad (1)$$

Основной задачей настоящей работы является исследование температурных зависимостей им-

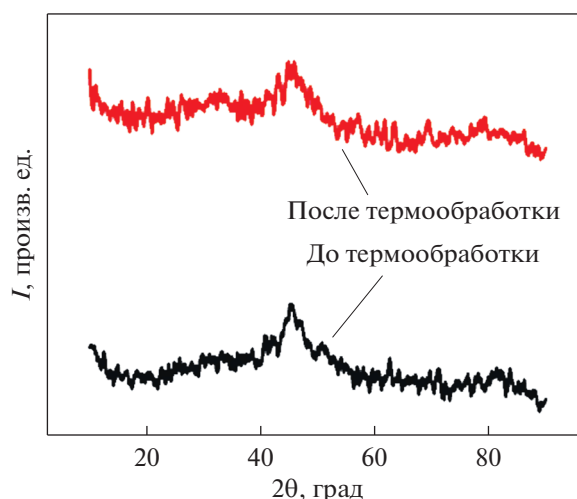


Рис. 1. Дифрактограммы ленты сплава  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$  до и после термообработки при температуре 425 К в течение 8 ч.

педанса в диапазоне температур, интересных с точки зрения практических приложений датчиков различных физических величин, но также мы использовали особенности МИ для сравнительного анализа с  $TI$ . Магнитоимпедансный эффект рассчитывали по формуле

$$MI(H) = \frac{Z(H) - Z(H_{\max})}{Z(H_{\max})} \times 100\%, \quad (2)$$

где  $Z(H)$  и  $Z(H_{\max})$  – модули импеданса в магнитных полях  $H$  и  $H_{\max}$  соответственно.

Перед началом каждого измерения образец (в отсутствие внешних механических напряжений и внешнего магнитного поля) нагревали до 405 К, а затем охлаждали до комнатной температуры. Это способствовало достижению повторяемости результатов с высокой точностью 1%.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

При комнатной температуре намагниченность насыщения  $M_s$  ленты  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$  приближенно равна 560 кА/м (рис. 2). При повышении температуры  $M_s$  уменьшается. При этом ее экспериментальные значения (рис. 2, маркеры) аппроксимировали функцией  $M_s(T) = M_{s0} (1 - T/T_C)^{0.32}$ , где  $M_{s0} = 685 \text{ кА/м}$  (рис. 2, линия). Из петли магнитного гистерезиса (рис. 2, вставка) видно, что лента имеет преимущественно продольную эффективную магнитную анизотропию.

На рис. 3 сплошными линиями показано относительное изменение импеданса с температурой. В отсутствие механических напряжений импеданс практически линейно убывает при повышении температуры. Приложение механических напря-

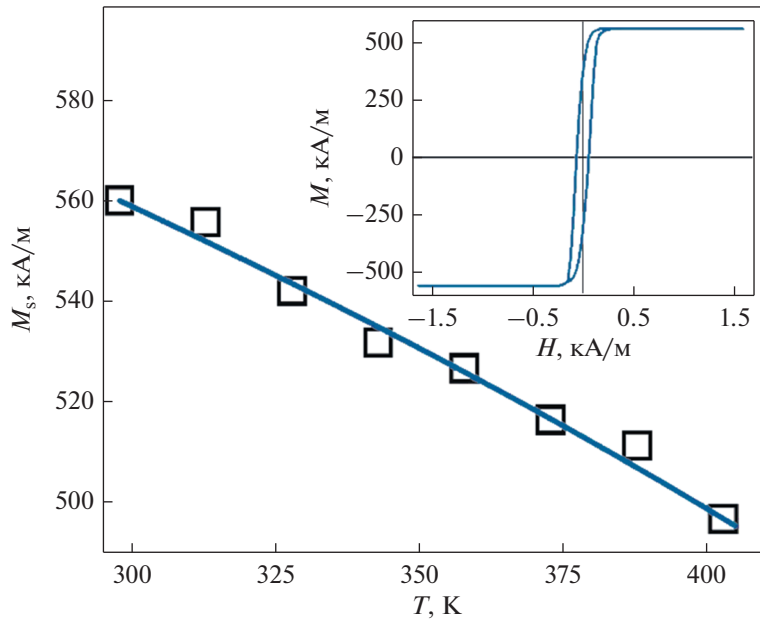


Рис. 2. Намагниченность насыщения аморфной ленты  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$  в диапазоне температур от 295 до 405 К. На вставке приведена петля гистерезиса, полученная при комнатной температуре.

жений приводит к тому, что зависимость  $TI(T)$  сначала становится возрастающей, а затем на ней появляется максимум. С увеличением механических напряжений максимум смещается влево. Отметим, что в диапазоне температур от 295 до 350 К и  $\sigma = 690$  МПа чувствительность импеданса к температуре достигает приблизительно  $0.8\%/K$ . При этом максимальное значение  $TI$  превышает 25%.

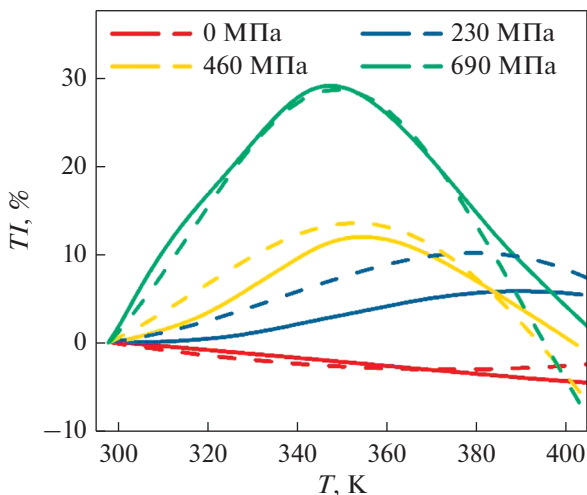


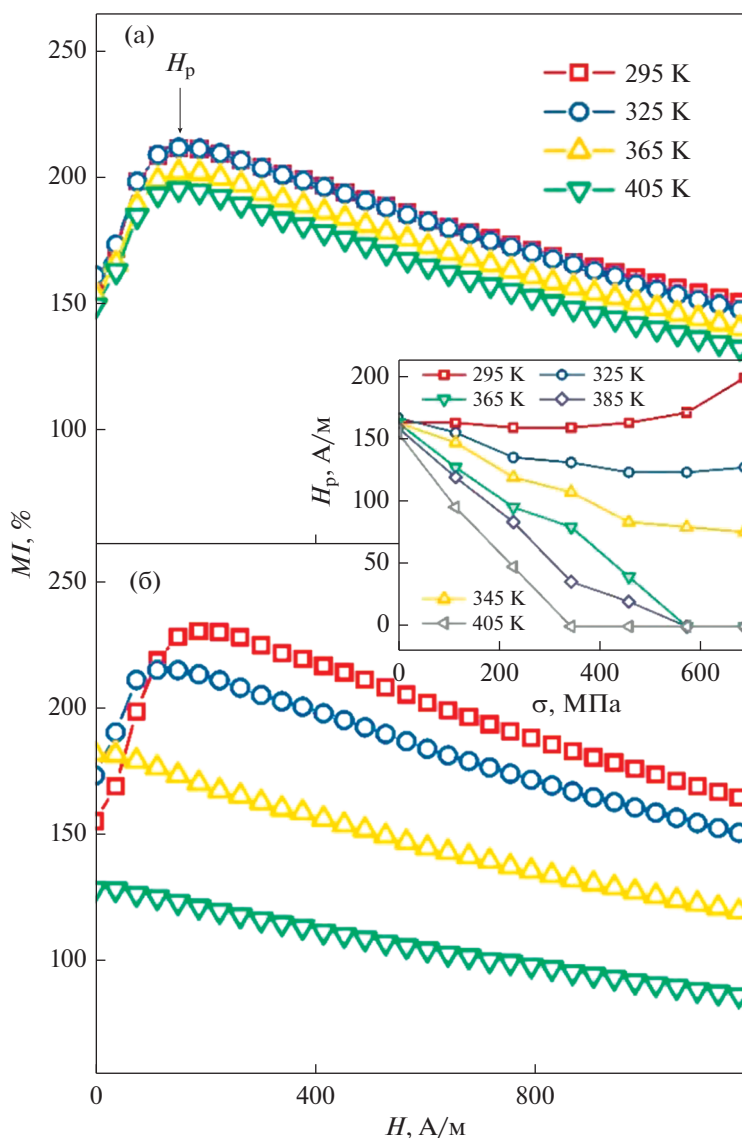
Рис. 3. Относительное температурное изменение импеданса аморфной ленты  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$ . Зависимости получены при различных значениях растягивающих механических напряжений. Сплошные линии — экспериментальные зависимости, пунктирные — зависимости, рассчитанные с использованием выражений (4)–(7). Угол  $\alpha$  принимали равным 0.77 рад.

Рассмотрим зависимости  $MI(H)$  (рис. 4). Если  $\sigma = 0$  МПа, то зависимости  $MI(H)$  во всем исследованном диапазоне температур имеют восходящий участок, что свидетельствует о том, что магнитная анизотропия кроме продольной составляющей имеет и поперечную (рис. 4а). Напряженность магнитного поля  $H_p$ , необходимая для достижения максимального значения магнито-импедансного эффекта  $MI_{\max}$ , с повышением температуры изменяется незначительно (рис. 4, вставка). Величина  $MI_{\max}$  при этом уменьшается от 210 до 190%.

Если механические напряжения отличны от нуля, то повышение температуры приводит к уменьшению восходящего участка на зависимостях  $MI(H)$  и уменьшению  $MI_{\max}$  от 230 до 130% (рис. 4б). При этом  $H_p$  также становится меньше (рис. 4, вставка). При некоторой температуре, которую обозначим как  $T_0$ , восходящий участок полностью исчезает, а величина  $H_p$  становится равной нулю. Так, при  $\sigma = 690$  МПа  $T_0 \approx 350$  К. Отметим, что вблизи  $T_0$  находится максимум на зависимости  $TI(T)$  (рис. 3).

Для косвенного измерения константы магнитострикции использовали особенности МИ аморфных лент — определяли приращение поля  $H_p$ , вызванное изменением  $\sigma$  (рис. 4, вставка) [15]. Предполагали, что величина поля  $H_p$  близка к величине поля магнитной анизотропии. Также было учтено то обстоятельство, что константа магнитострикции зависит от величины механических напряжений следующим образом [16, 17]:

$$\lambda_s = \lambda_{s0} - \beta\sigma. \quad (3)$$



**Рис. 4.** Магнитоимпедансные зависимости  $MI(H)$  аморфной ленты  $Co_{68.5}Fe_4Si_{15}B_{12.5}$ , полученные при растягивающих механических напряжениях (а) 0 и (б) 690 МПа. На вставке: зависимости поля максимума  $H_p$  от растягивающих механических напряжений в диапазоне температур от 295 до 405 К.

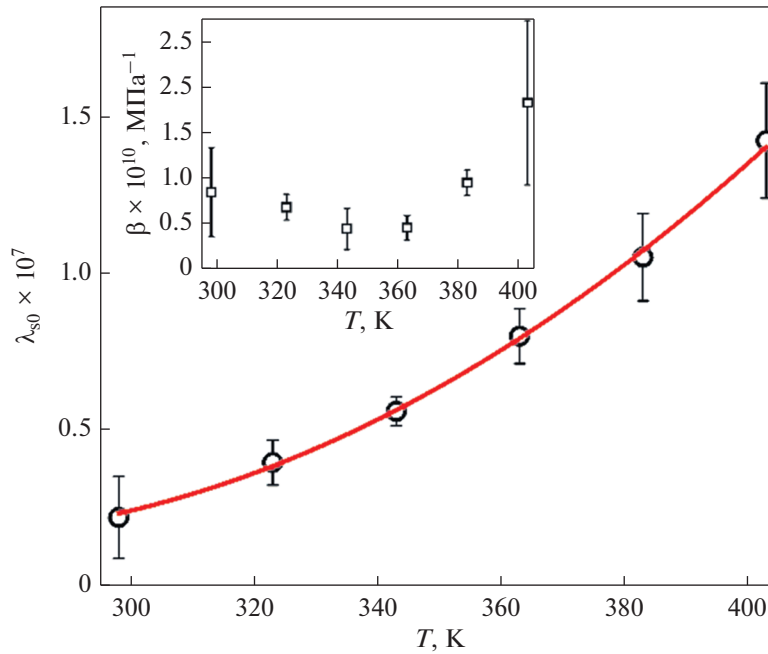
Здесь  $\lambda_{s0}$  – константа магнитострикции в отсутствие механических напряжений,  $\beta$  – коэффициент, определяющий влияние механических напряжений на величину магнитострикции. Величина  $\lambda_{s0}$  в исследованном диапазоне монотонно возрастает по закону, близкому к квадратичному (рис. 5). В то же время  $\beta$  изменяется немонотонно и, с учетом погрешности измерения, принимает значения в интервале от  $0.4 \times 10^{-10}$  до  $2.7 \times 10^{-10}$  МПа<sup>-1</sup> (рис. 5, вставка). Довольно большая абсолютная погрешность  $\beta$  обусловлена особенностями процедуры определения этой величины [15]. Близкие значения  $\lambda_{s0}$  и  $\beta$  были получены ранее и другими исследователями [15–17].

### ОБСУЖДЕНИЕ

Представим качественное объяснение температурных зависимостей импеданса (рис. 3) при различных значениях механических напряжений. Модуль импеданса ферромагнитного планарного проводника толщиной  $d$ , опираясь на работу [18], можно представить в следующей форме:

$$Z = \frac{kR_{DC}}{2(\text{ch } k - \cos k)} \times \sqrt{(\sin k + \text{sh } k)^2 + (\sin k - \text{sh } k)^2}, \quad (4)$$

где  $R_{DC}$  – сопротивление на постоянном токе;  $k = d/\delta$ ;  $\delta = (\rho/\pi f \mu_0 \mu_t)^{1/2}$  – толщина скин-слоя;  $f$  – частота переменного тока;  $\rho$  – удельное электро-



**Рис. 5.** Температурная зависимость магнитострикции аморфной ленты  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$ . Зависимость аппроксимирована кривой  $\lambda_{s0} = AT^2 + BT + C$ , где  $A = 6.39 \times 10^{-12} \text{ K}^{-2}$ ,  $B = -3.36 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$  и  $C = 4.57 \times 10^{-7}$ . На вставке приведены значения коэффициента  $\beta$  в температурном диапазоне от 295 до 405 К.

сопротивление;  $\mu_0$  — магнитная постоянная вакуума;  $\mu_t$  — эффективная поперечная (относительно направления протекания переменного тока) магнитная проницаемость. Таким образом, температурные изменения  $Z$  определяются температурными изменениями магнитных и электрических свойств. Отметим, что температурные изменения  $\rho$  и  $R_{\text{DC}}$  магнитомягких сплавов, как правило, незначительны по сравнению с температурными изменениями  $\mu_t$  [9, 19].

Выражение для объемной плотности свободной энергии магнитной среды при ориентации вектора намагниченности и оси анизотропии в плоскости ленты имеет вид [20]:

$$W = K \sin^2 \theta + \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2(\alpha + \theta) + \mu_0 M_s h \sin(\alpha + \theta), \quad (5)$$

где  $K$  — константа эффективной магнитной анизотропии;  $h$  — магнитное поле переменного тока;  $\alpha$  — угол между осью анизотропии ленты и поперечным направлением;  $\theta$  — угол между осью анизотропии и намагниченностью.

С помощью стандартной процедуры, описанной, например, в [11], из (5) можно определить поперечную магнитную проницаемость:

$$\mu_t = 1 + \frac{\mu_0 M_s^2 \sin^3(\alpha + \theta)}{3\lambda_s \sigma \sin(\alpha + \theta) - 2K \sin(\theta - \alpha)}. \quad (6)$$

Равновесную ориентацию намагниченности определяли из условий  $\partial W / \partial \theta = 0$ ,  $\partial^2 W / \partial \theta^2 > 0$  и в предположении, что поле  $h$  мало:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{3\lambda_s \sigma \sin 2\alpha}{2K - 3\lambda_s \sigma \cos 2\alpha}. \quad (7)$$

Зависимости  $TI(T)$ , рассчитанные с помощью выражений (4)–(7), приведены на рис. 3 (штриховые линии). Для расчета использовали значения намагниченности насыщения, приведенные на рис. 2, и значения константы магнитострикции, приведенные на рис. 5. При этом учитывали ее зависимость от механических напряжений (см. выражение (3)). Наилучшее приближение расчетных зависимостей к экспериментальным было достигнуто при  $\beta = 0.45 \times 10^{-10} \text{ МПа}^{-1}$ . Это значение близко к экспериментальным с учетом погрешностей (см. рис. 5, вставка). Константа эффективной магнитной анизотропии рассчитана по формуле  $K = \mu_0 M_s H_p / 2$  в предположении, что величина поля  $H_p$  (рис. 4, вставка) близка к полю магнитной анизотропии.

Видно, что характер расчетных зависимостей  $TI(T)$  согласуется с экспериментальными — так же наблюдается смещение максимума в область больших температур с увеличением механических напряжений. Это связано с тем, что чем больше  $\sigma$ , тем при меньшей температуре достигается значение угла  $\theta$  (см. выражение (7)), соответствующее максимальному значению проницаемости  $\mu_t$ , а значит, и  $Z$  (см. выражения (4) и (6)).

Расхождение расчетных и экспериментальных зависимостей  $TI(T)$  связано с тем, что в предложенной модели не принимали во внимание влияние магнитной доменной структуры на равновесную ориентацию намагниченности [21], не учитывали частотную зависимость магнитной проницаемости [3], не рассматривали вклад дисперсии магнитной анизотропии [5, 22], а также температурную зависимость коэффициента  $\beta$ . Тем не менее представленная модель позволяет качественно объяснить экспериментальные результаты, а влияние неучтенных факторов может стать предметом обсуждения в дальнейших работах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было обнаружено сильное влияние механических напряжений на зависимость импеданса аморфных лент  $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{12.5}$ , измеренного в нулевом внешнем магнитном поле, от температуры. Так, в отсутствие механических напряжений, импеданс при повышении температуры убывает. В присутствии растягивающих напряжений на температурной зависимости появляется возрастающий участок и максимум. При этом относительное температурное изменение импеданса превышает 25%, а его чувствительность к температуре достигает 0.8%/К. Для объяснения обнаруженных закономерностей была предложена модель, учитывающая температурные изменения намагниченности насыщения, константы эффективной магнитной анизотропии, константы магнитоstriction и зависимость последней от величины механических напряжений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ershev N.V., Fedorov V.I., Chernenkov Yu.P., Lukshina V.A., Shishkin D.A.* Effect of crystallization annealing under loading on the magnetic properties and the structure of a soft magnetic FeSiNbCuB alloy doped with chromium // *Phys. Solid State*. 2017. V. 59. P. 1748–1761.
2. *Skulkina N.A., Ivanov O.A., Mazaeva A.K., Kuznetsov P.A., Stepanova E.A., Blinova O.V., Mikhailitsyna E.A.* Magnetization processes in ribbons of soft magnetic amorphous alloys // *Phys. Met. Metal*. 2018. V. 119. P. 127–133.
3. *Beach R.S., Berkowitz A.E.* Sensitive field- and frequency-dependent impedance spectra of amorphous FeCoSiB wire and ribbon (invited) // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76. P. 6209–6213.
4. *Usov N., Antonov A., Dykhne A., Lagar'kov A.* Possible origin for the bamboo domain structure in Co-rich amorphous wire // *J. Magn. Magn. Mater.* 1997. V. 174. P. 127–132.
5. *Saad A., García J.A., Kuryandskaya G., Daniel Santos J., Elbaile L.* Influence of Residual Stresses and Their Relaxation on Giant Magnetoimpedance of CoFeSiB Metallic Glasses // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005. V. 44. P. 4939–4944.
6. *Kraus L.* Nonlinear Magnetoimpedance in Field- and Stress-Annealed Amorphous Ribbons // *IEEE Trans. Magn.* 2010. V. 46. P. 428–431.
7. *Makhotkin V.E., Shurukhin B.P., Lopatin V.A., Marchukov P.Y., Levin Y.K.* Magnetic field sensors based on amorphous ribbons // *Sensors Actuators A Phys.* 1991. V. 27. P. 759–762.
8. *Safronov A.P., Mikhnevich E.A., Lotfollahi Z., Blyakhan F.A., Sklyar T.F., Larrañaga Varga A., Medvedev A.I., Fernández Armas S., Kuryandskaya G.V.* Polyacrylamide Ferrogels with Magnetite or Strontium Hexaferrite: Next Step in the Development of Soft Biomimetic Matter for Biosensor Applications // *Sensors*. 2018. V. 18. 257.
9. *Malátek M., Ripka P., Kraus L.* Temperature offset drift of GMI sensors // *Sensors Actuators A Phys.* 2008. V. 147. P. 415–418.
10. *Nabias J., Asfour A., Yonnet J.-P.* Temperature effect on GMI sensor: Comparison between diagonal and off-diagonal response // *Sensors Actuators A Phys.* 2019. V. 289. P. 50–56.
11. *Semirov A.V., Bukreev D.A., Moiseev A.A., Derevyanko M.S., Kudryavtsev V.O.* Relationship Between the Temperature Changes of the Magnetostriction Constant and the Impedance of Amorphous Elastically Deformed Soft Magnetic Cobalt-Based Ribbons // *Russ. Phys. J.* 2013. V. 55 P. 977–982.
12. *Fujimori H., Obi Y., Masumoto T., Saito H.* Soft Ferromagnetic properties of some amorphous alloys // *Mater. Sci. Eng.* 1976. V. 23. P. 281–284.
13. *Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Semirov A.V.* Effect of tensile stress on cobalt-based amorphous wires impedance near the magnetostriction compensation temperature // *J. Magn. Magn. Mater.* 2020. V. 500. 166436.
14. *Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Semirov A.V., Savin P.A., Kuryandskaya G.V.* Magnetoimpedance and Stress-Impedance Effects in Amorphous CoFeSiB Ribbons at Elevated Temperatures // *Materials*. 2020. V. 13. 3216.
15. *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.
16. *Barandiarán J.M., Hernando A., Madurga V., Nielsen O.V., Vázquez M., Vázquez-López M.* Temperature, stress, and structural-relaxation dependence of the magnetostriction in  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  glasses // *Phys. Rev. B*. 1987. V. 35. P. 5066–5071.
17. *Siemko A., Lachowicz H.K.* Temperature and stress dependence of magnetostriction in Co-based metallic glasses // *IEEE Trans. Magn.* 1988. V. 24. P. 1984–1986.
18. *Kraus L.* Theory of giant magneto-impedance in the planar conductor with uniaxial magnetic anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. V. 195. P. 764–778.
19. *Barandiarán J.M., Fernández Barquín L., Sal J.C.G., Gorriá P., Hernando A.* Resistivity changes of some amorphous alloys undergoing nanocrystallization // *Solid State Commun.* 1993. V. 88. P. 75–80.
20. *Stoner E.C., Wohlfarth E.P.* A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys // *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.* 1948. V. 240. P. 599–642.
21. *Hubert A., Schäfer R.* *Magnetic Domains*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. 696 p.
22. *Atkinson D., Squire P.T.* Phenomenological model for magnetoimpedance in soft ferromagnets // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. P. 6569–6571.