

05;11;12

## Влияние температуры на магнитоимпеданс упругодеформированной фольги состава $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$

© А.В. Семиров,<sup>1</sup> Д.А. Букреев,<sup>1</sup> В.О. Кудрявцев,<sup>1</sup> А.А. Моисеев,<sup>1</sup> А.А. Гаврилюк,<sup>1</sup>  
А.Л. Семенов,<sup>2</sup> Г.В. Захаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный педагогический университет,  
664011 Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет,  
664653 Иркутск, Россия  
e-mail: semirov@igpu.ru

(Поступило в Редакцию 22 декабря 2008 г. В окончательной редакции 18 мая 2009 г.)

Исследовано влияние температуры и упругих растягивающих напряжений на магнитоимпеданс аморфной ленты Vitrovac 6025Z ( $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ ). Обнаружено существование двух температурных диапазонов 20–70 и 70–220°С, в которых влияние упругих напряжений на магнитоимпеданс имеет различный характер. Показано, что наличие данных температурных диапазонов обусловлено сменой при температуре 70°С знака константы магнитострикции.

PACS: 75.50.Kj, 75.80.+q

Слабые магнитные поля в некоторых магнитомягких сплавах могут вызывать значительное изменение импеданса [1]. Кроме того, импеданс и величина гигантского магнитоимпедансного эффекта (ГМИ-эффекта) в аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалах проявляют высокую чувствительность к различным внешним воздействиям. В частности, установлено, что такие внешние факторы, как температура или упругие механические напряжения, оказывают значительное влияние на импеданс и магнитные свойства данных материалов [2–6]. В связи с этим встает вопрос о стабильности характеристик магниточувствительных датчиков на основе ГМИ-эффекта, а также возможности его использования при разработке высокочувствительных элементов для регистрации различных физических параметров [7,8]. Аморфные сплавы на основе кобальта, например Vitrovac, демонстрируют высокий уровень ГМИ-эффекта, его чувствительность к внешнему магнитному полю и высокую коррозионную стойкость [7], что обуславливает перспективность их применения в качестве материалов с ГМИ-эффектом.

Исследования влияния температуры на магнитоимпеданс упруго деформированных фольг проведены на образцах, вырезанных из аморфной ленты Vitrovac 6025Z (состав:  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ ). Образцы имели длину 10 мм, ширину 1 мм и толщину 25 мкм. Индукция насыщения составляла 0.55 Т, константа магнитострикции насыщения при комнатной температуре  $-3 \cdot 10^{-7}$ . Для исследования использовались образцы двух серий: вырезанные перпендикулярно длине исходной ленты и вырезанные вдоль длины исходной ленты. Так как ось легкого намагничивания (ОЛН) в ленте ориентирована преимущественно вдоль ее длины, ориентация ЛОН образца будет зависеть от того, как он вырезан из ленты. Таким образом, ОЛН у образцов, вырезанных перпендикулярно длине исходной ленты, будет преимущественно

ориентирована перпендикулярно длине образцов, а на образцах, вырезанных вдоль длины ленты, совпадать с длинной стороной образца. Это согласуется с результатами исследований гистерезисных свойств данных образцов.

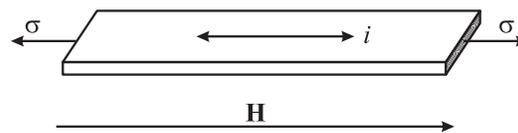
Магнитоимпеданс образцов исследовался в диапазоне частот переменного тока 0.5–10 МГц при амплитуде тока 30 мА. Внешнее магнитное поле  $\mathbf{H}$  было направлено вдоль длины образцов (рис. 1). Его максимальная напряженность составляла 3600 А/м. Величина внешних упругих растягивающих напряжений  $\sigma$ , приложенных вдоль длины образцов, варьировалась в интервале 0.255 МПа. Измерения импеданса  $Z$  проводились при температуре  $t$  от 20 до 220°С.

Величина максимального положительного ГМИ-эффекта рассчитывалась по формуле:

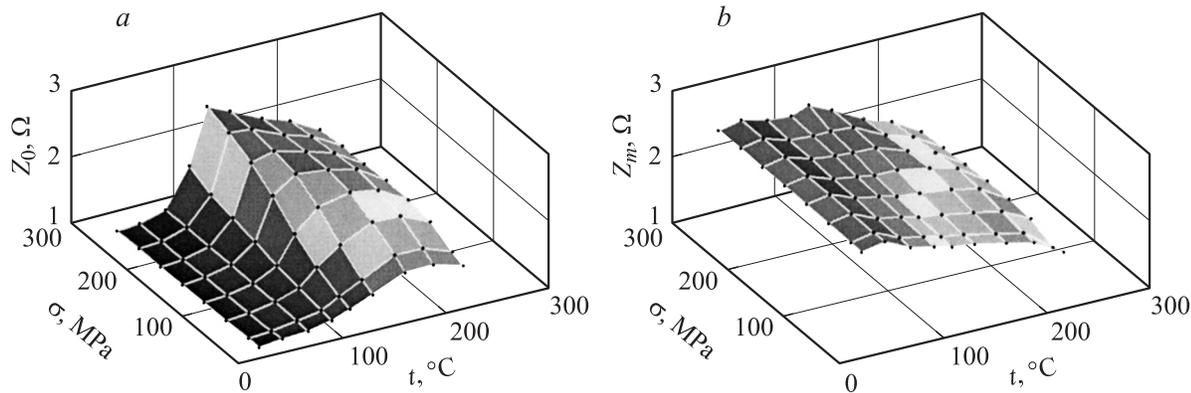
$$\frac{\Delta Z_m}{Z_0} = \frac{Z_m - Z_0}{Z_0} \cdot 100\%,$$

где  $Z_0$  — импеданс в нулевом внешнем магнитном поле,  $Z_m$  — максимальное значение импеданса во внешнем магнитном поле.

Для измерения импеданса образцов использовалась методика, которая применяется большим числом исследователей ГМИ-эффекта в области значений частоты до десятков мегагерц [9–11]. В ходе эксперимента образец



**Рис. 1.** Схема воздействия на образец внешнего магнитного поля  $H$ , упругих растягивающих напряжений  $\sigma$  и протекания переменного тока  $i$ .



**Рис. 2.** Зависимость начального  $Z_0$  (a) и максимального  $Z_m$  (b) импеданса фольги Vitrovac 6025Z от величины упругих растягивающих напряжений  $\sigma$  при различных значениях температуры  $t$  на частоте переменного тока 10 МГц. Упругие растягивающие напряжения приложены вдоль длины образца. ОЛН ориентирована перпендикулярно длине образца.

подключался последовательно с добавочным сопротивлением к генератору синусоидальной ЭДС. Величина добавочного сопротивления была на два порядка выше величины импеданса образца. Таким образом, сила тока, протекающего через образец, определялась значением добавочного сопротивления. С помощью высокочастотного вольтметра измерялось напряжение на образце и, в предположении, что значение тока неизменно, по закону Ома рассчитывался модуль импеданса образца. Для создания упругих растягивающих напряжений один из контактов измерительной ячейки был сделан подвижным. Для нагрева образца измерительная ячейка помещалась в воздуховод и обдувалась потоком воздуха заданной температуры. Внешнее магнитное поле создавалось парой колец Гельмгольца.

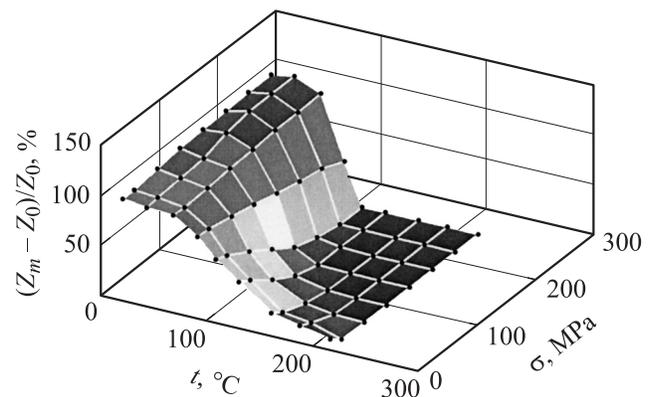
Было обнаружено, что на образцах с ОЛН, ориентированной перпендикулярно длине, при температуре от комнатных значений до порядка  $70^\circ\text{C}$  упругие растягивающие напряжения во всем частотном диапазоне не оказывают заметного влияния на начальный импеданс  $Z_0$  (рис. 2, a). В диапазоне температур от  $70$  до  $110^\circ\text{C}$  с увеличением упругих растягивающих напряжений  $Z_0$  возрастает. При температуре  $110^\circ\text{C}$  изменение начального импеданса достигает  $0.35\%$  МПа. При температуре выше  $110^\circ\text{C}$  зависимость  $Z_0(\sigma)$  имеет экстремальный характер. Так, вначале с увеличением упругих растягивающих напряжений наблюдается рост начального импеданса. При некоторой величине  $\sigma$  достигается наибольшее значение  $Z_0$ , после чего рост упругих напряжений приводит к падению начального импеданса. Величина  $\sigma$ , соответствующая наибольшему значению  $Z_0$ , уменьшается со снижением частоты переменного тока и с ростом температуры. При значениях частоты меньше 1 МГц и температуры выше  $200^\circ\text{C}$  наибольшее значение начального импеданса наблюдается при нулевых упругих напряжениях.

Температурные зависимости начального импеданса  $Z_0(t)$  при различных упругих растягивающих напряжениях имеют хорошо выраженный максимум (рис. 2, a).

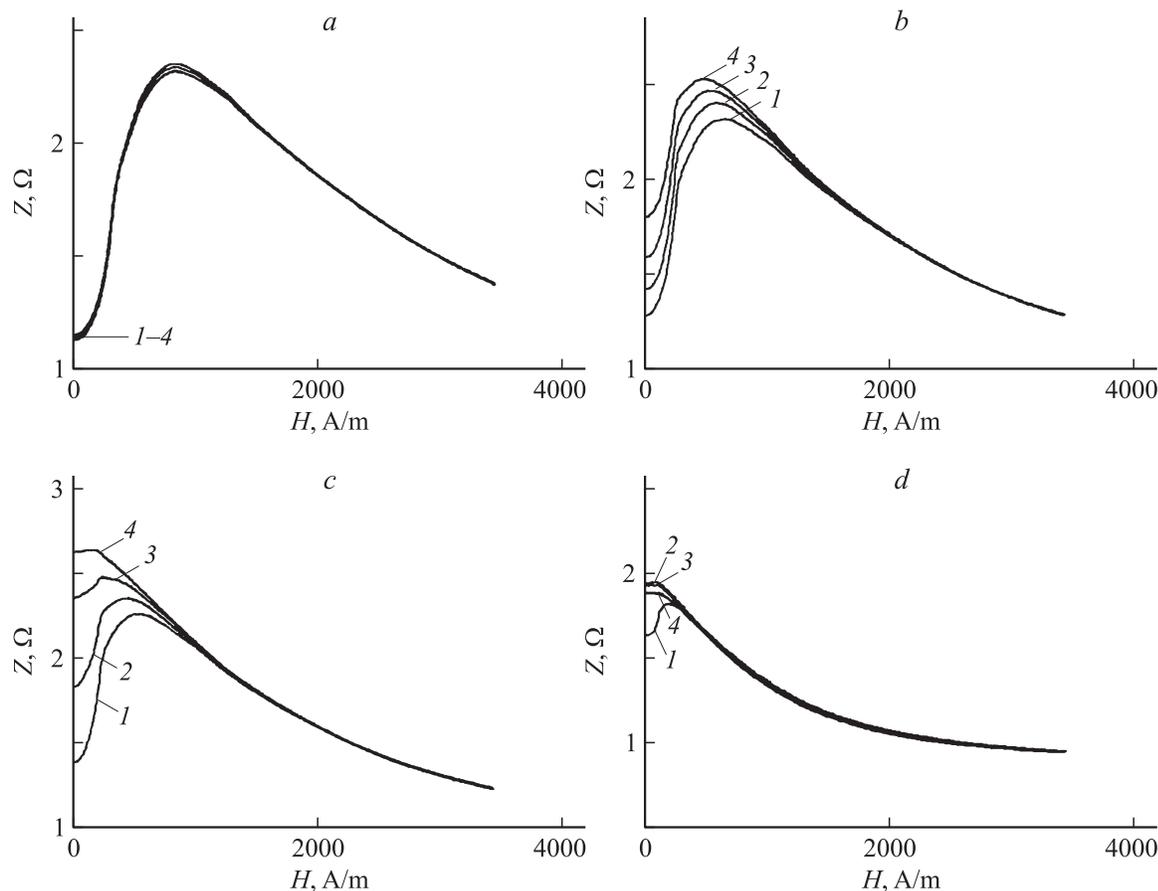
При росте  $\sigma$  наблюдается смещение максимума на зависимости  $Z_0(t)$  в область меньших температур.

Максимальный импеданс  $Z_m$  при температуре от комнатных значений до  $45^\circ\text{C}$  с увеличением упругих растягивающих напряжений на частоте переменного тока, большей 4 МГц, незначительно возрастает (рис. 2, b), а на частоте ниже 4 МГц — уменьшается. При температуре от  $45$  до  $110^\circ\text{C}$  во всем исследованном частотном диапазоне  $0.5$ – $10$  МГц с увеличением упругих растягивающих напряжений  $Z_m$  возрастает. При температуре больше  $110^\circ\text{C}$  экстремальное поведение, описанное выше для зависимостей  $Z_0(\sigma)$ , имеет место и для зависимостей  $Z_m(\sigma)$ .

В диапазоне значений температур от  $20$  до  $70^\circ\text{C}$  во всем частотном диапазоне изменения величины максимального положительного ГМИ-эффекта под воздействием растягивающих напряжений не наблюдалось (рис. 3). При температуре больше  $70^\circ\text{C}$  положительный ГМИ-эффект с ростом упругих растягивающих



**Рис. 3.** Зависимость величины максимального положительного ГМИ-эффекта в фольге Vitrovac 6025Z от упругих растягивающих напряжений  $\sigma$  при различных значениях температуры  $t$  на частоте переменного тока 10 МГц. Упругие растягивающие напряжения приложены вдоль длины образца. ОЛН ориентирована перпендикулярно длине образца.



**Рис. 4.** Зависимость импеданса  $Z$  фольги Vitrovac 6025Z ( $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ ) от величины внешнего магнитного поля  $H$  на частоте переменного тока 10 МГц. Зависимости  $Z(H)$  получены при величине упругих растягивающих напряжений: 1 — 0; 2 — 98; 3 — 176; 4 — 255 МПа. Внешнее магнитное поле, упругие растягивающие напряжения и переменный ток приложены вдоль длины образца. ОЛН образца ориентирована перпендикулярно его длине. Температура образцов составляла:  $a$  — 20;  $b$  — 90;  $c$  — 110;  $d$  — 220°С.

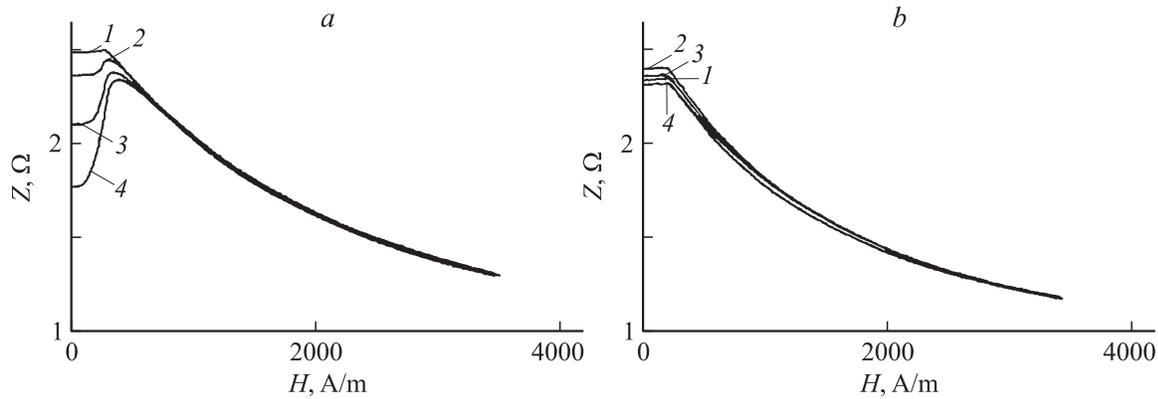
напряжений уменьшается, при температуре от 110°С и выше при некотором значении упругих растягивающих напряжений он становится равен нулю. При этом, чем выше температура, тем при меньшем значении упругих растягивающих напряжений это наблюдается.

Согласно классической электродинамике, импеданс проводников зависит от поперечной магнитной проницаемости, которая, в частности, определяется ориентацией намагниченности, величиной и направлением внешнего магнитного поля и магнитного поля переменного тока, протекающего по образцу [12,13]. Намагниченность ферромагнетика зависит от температуры. С ростом температуры увеличивается дисперсия намагниченности, а при достижении температуры Кюри происходит переход материала из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Упругие растягивающие напряжения оказывают ориентирующее воздействие на намагниченность. Характер этого воздействия определяется знаком константы магнитоупругости.

Отметим, что при  $\lambda < 0$  приложение упругих растягивающих напряжений вдоль длины образца оказывает ориентирующее воздействие на намагниченность в

направлении, перпендикулярном длине образца. Тогда если переменный ток протекает вдоль длины образца, упругие растягивающие напряжения должны приводить к уменьшению импеданса  $Z_0$  в нулевом магнитном поле и смещению  $Z_m$  в область больших магнитных полей вследствие роста поля анизотропии [2]. При  $\lambda > 0$  упругие растягивающие напряжения оказывают ориентирующее действие на намагниченность в направлении, параллельном длине образца. Следовательно, упругие растягивающие напряжения должны приводить к росту  $Z_0$ . Значение  $Z_m$  при этом должно смещаться в область меньших магнитных полей, так как поворот вокруг намагниченности вдоль длины образца приводит к уменьшению поля поперечной анизотропии.

Ранее уже отмечалось, что при температуре до 70°С упругие растягивающие напряжения оказывают незначительное влияние на величину  $Z_0$  образцов с ОЛН, ориентированной перпендикулярно длине (рис. 2,  $a$ ). Это хорошо прослеживается и на зависимостях импеданса от внешнего магнитного поля, полученных при различных значениях  $\sigma$  (рис. 4,  $a$ ). Слабая зависимость начального импеданса от упругих растягивающих напряжений



**Рис. 5.** Зависимость импеданса  $Z$  фольги Vitrovac 6025Z ( $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ ) от величины внешнего магнитного поля  $H$  на частоте переменного тока 10 МГц. Зависимости  $Z(H)$  получены при величине упругих растягивающих напряжений: 1 — 0; 2 — 98, 3 — 176; 4 — 255 МПа. Внешнее магнитное поле, упругие растягивающие напряжения и переменный ток приложены вдоль длины образца. ОЛН образца ориентирована вдоль его длины. Температура образцов составляла:  $a$  — 20;  $b$  — 110 °С.

свидетельствует о том, что их действие не изменяет ориентации намагниченности. Это не противоречит модели поведения намагниченности в материалах с отрицательной константой магнитострикции, согласно которой упругие растягивающие напряжения ориентируют намагниченность в направлении, перпендикулярном направлению действия  $\sigma$ . Однако на зависимостях импеданса от внешнего магнитного поля не наблюдается смещения максимума в область больших полей, что, по-видимому, связано с наличием значительных растягивающих полей вследствие поперечной доменной структуры и малой ширины образца.

В температурном диапазоне от 70 до 110 °С для образцов с ОЛН, ориентированной перпендикулярно длине, с ростом упругих растягивающих напряжений отмечается смещение максимума на полевых зависимостях импеданса в область меньших магнитных полей (рис. 4,  $b$ ). При температуре порядка 110 °С и выше с ростом  $\sigma$  на зависимостях  $Z(H)$  появляется участок, на котором импеданс слабо зависит от внешнего магнитного поля (рис. 4,  $c$ , кривая 4). Такой вид зависимости импеданса от внешнего магнитного поля наблюдается, если намагниченность образца ориентирована вдоль его длины [14]. Таким образом, исходя из наблюдаемых изменений полевых зависимостей импеданса под воздействием упругих напряжений, можно заключить, что при температуре выше 70 °С упругие растягивающие напряжения оказывают на намагниченность ориентирующее действие вдоль длины образца. Подобное поведение намагниченности можно объяснить происходящей с нагревом при температуре 70 °С сменой знака константы магнитострикции исследованных видов фольги с отрицательной на положительной.

Для подтверждения данного положения были проведены дополнительные исследования на образцах, вырезанных вдоль длины исходной ленты. Исследования показали, что влияние упругих растягивающих напряжений на импеданс образцов с ОЛН, ориентированной

вдоль длины образца, также различно в температурных диапазонах 20–70 и 70–220 °С. В первом температурном диапазоне рост  $\sigma$  приводит к уменьшению  $Z_0$  и смещению  $Z_m$  в область больших магнитных полей (рис. 5,  $a$ ), т.е. упругие растягивающие напряжения ориентируют намагниченность в направлении, перпендикулярном длине образца, что свидетельствует о наличии отрицательной  $\lambda$  в температурном диапазоне 20–70 °С.

В температурном диапазоне 70–220 °С на зависимостях  $Z(H)$  для всего интервала  $\sigma$  рост импеданса с ростом внешнего магнитного поля не наблюдался (рис. 5,  $b$ ). Подобный вид зависимостей  $Z(H)$  соответствует продольной ориентации намагниченности, т.е. упругие растягивающие напряжения ориентируют намагниченность вдоль длины образца, что связано с наличием положительной константы магнитострикции в данном температурном диапазоне.

Таким образом, различный характер влияния упругих растягивающих напряжений на импеданс в температурных интервалах 20–70 и 70–220 °С обусловлен сменой при температуре 70 °С знака константы магнитострикции.

Необходимо отметить, что существенное влияние на уменьшение импеданса с ростом температуры от 190 °С оказывает начало процесса перехода фольги в парамагнитное состояние. Начало перехода фольги Vitrovac в парамагнитное состояние при температуре вблизи 190 °С подтверждено исследованиями магнитной проницаемости и намагниченности [3,4].

Экстремальный характер зависимостей  $Z_0(\sigma)$  для образцов с ОЛН, ориентированной перпендикулярно длине, при температуре выше 110 °С (рис. 2,  $a$ ) объясняется тем, что с ростом упругих растягивающих напряжений при достижении некоторого значения  $\sigma$  намагниченность ориентируется вдоль длины образца. Этому значению  $\sigma$  соответствует максимальная величина начального импеданса. Дальнейшее увеличение упругих напряжений приводит к росту анизотропии и, следовательно, к уменьшению  $Z_0$ .

Смещение максимума на зависимостях  $Z_0(\sigma)$  в область меньших значений упругих напряжений с ростом температуры связано с уменьшением поперечной анизотропии и ростом дисперсии намагниченности. Этими же факторами обусловлено и смещение максимума на зависимостях импеданса от внешнего магнитного поля при фиксированном значении  $\sigma$  в область меньших полей с ростом температуры.

Ростом дисперсии намагниченности с увеличением температуры можно также объяснить и рост начального импеданса образцов с перпендикулярной длине фольги ориентацией ОЛН в интервале от 20 до 190°C (рис. 2, а). С увеличением дисперсии намагниченности ее составляющая, направленная вдоль длины образца, возрастает. Это приводит к увеличению поперечной магнитной проницаемости и, как следствие, к росту импеданса.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлен наличие двух температурных диапазонов 20–70°C и 70–220°C, в которых влияние упругих растягивающих напряжений на магнитоимпеданс различно.

Для образцов с ОЛН, ориентированной перпендикулярно длине, в первом температурном диапазоне 20–70°C наблюдается слабая зависимость начального импеданса и ГМИ-эффекта от упругих напряжений. Во втором диапазоне 70–220°C воздействие упругих растягивающих напряжений сильно влияет на импеданс фольги, его частотные и полевые зависимости. Причем в интервале от 70 до 110°C наблюдается рост начального импеданса с ростом  $\sigma$ , а в интервале от 110 до 220°C зависимость  $Z_0(\sigma)$  носит экстремальный характер, при этом положительный ГМИ-эффект в интервале значений температуры 70–220°C с ростом  $\sigma$  убывает.

Для образцов с ОЛН, ориентированной вдоль длины, в температурном диапазоне 20–70°C наблюдаются уменьшение начального импеданса с ростом упругих напряжений и возрастание величины положительного ГМИ-эффекта. Во втором температурном диапазоне 70–220°C упругие напряжения оказывают слабое влияние на магнитоимпеданс. Положительный ГМИ-эффект в этом температурном диапазоне равен нулю.

Показано, что смена характера зависимости магнитоимпеданса фольги Vitrovac 6025Z от упругих растягивающих напряжений при температуре 70°C обусловлена сменой знака константы магнитострикции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 09-08-00406, 08-08-00210.

## Список литературы

- [1] Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H., and Gollop H. // Proc. Roy. Soc. 1936. Vol. CLVII. A. P. 451.
- [2] Tejedor M., Hernando B., Sanchez M.L., Prida V.M., and Vazquez M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. Vol. 31. P. 2431–2437.
- [3] Bordin G., Buttino G., Cecchetti A., and Poppi M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. P. 1795–1800.

- [4] Zhang Y.J., Liz X.H., Wang S., and He K.Y. // Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). 2007. Vol. 20. N 4. P. 284–286.
- [5] Knobel M., Sanchez M.L., Velazquez J., and Vazquez M. // J. Phys.: Condens. Matter. 1995. Vol. 7. P. L115–L120.
- [6] Radkovskaya A., Rakhmanov A.A., Perov N., Sheverdyaeva P., Antonov A.S. // JMMM. 2002. Vol. 249. P. 113–116.
- [7] Kurlyandskaya G.V., Sanchez M.L., Hernando B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. N 18. P. 3053–3055.
- [8] Kurlyandskaya G.V. // Encyclopedia of Sensors. 2006. Vol. 4. P. 205–237.
- [9] Сокол-Кутыловский О.Л. // ФММ. 1997. Т. 84. Вып. 3. С. 54–61.
- [10] Byon K.S., Yu S.C., Kim C.G. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. P. 7218–7220.
- [11] Семиров А.В., Азрафонов Ю.В., Душутин К.В., Анашко А.А., Гаврилюк А.А. // ПТЭ. 2005. № 2. С. 155–156.
- [12] Beach R.S., Berkowitz A.E. // J. Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64. P. 3652–3654.
- [13] Panina L.V., Mohri K. // J. Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. N 9. P. 1189–1191.
- [14] Анашко А.А., Семиров А.В., Гаврилюк А.А. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 4. С. 49–52.