

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.4:53.096

МАГНИТОИМПЕДАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ УПРУГО ДЕФОРМИРОВАННЫХ АМОРФНЫХ ЛЕНТ НА ОСНОВЕ Co

© 2024 г. Д. А. Букреев^{a,*}, М. С. Деревянко^a, Г. В. Курляндская^b, А. В. Семиров^a

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

^bУральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

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

Поступила в редакцию 19.06.2024 г.

После доработки 13.07.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

Распределение магнитной проницаемости по сечению быстрозакаленных аморфных лент $\text{Co}_{68.6}\text{Fe}_{3.9}\text{Mo}_{3.0}\text{Si}_{12.0}\text{B}_{12.5}$ было исследовано в интервале от 0 до 480 МПа упругих растягивающих напряжений. Распределение магнитной проницаемости по сечению лент восстанавливали с помощью магнитоимпедансной томографии — метода, основанного на анализе частотных зависимостей импеданса при приложении внешних магнитных полей различной интенсивности или при разных значениях растягивающих механических напряжений. При этом частоту переменного тока варьировали в диапазоне от 0.01 до 80 МГц.

Ключевые слова: магнитоимпедансная томография, магнитный импеданс, метод конечных элементов, компьютерное моделирование, аморфные ленты

DOI: 10.31857/S0015323024100058, **EDN:** JFGRHA

ВВЕДЕНИЕ

Стрессимпедансный эффект (СИЭ) в аморфных магнитомягких лентах относится к тем явлениям, которые в настоящее время привлекают к себе достаточно большое внимание исследователей. СИЭ состоит в изменении комплексного сопротивления ленты переменному электрическому току под действием внешних механических напряжений [1, 2].

В большинстве публикаций изучается стрессимпедансный эффект, вызванный упругими растягивающими деформациями, когда возникающие внешние механические напряжения ориентированы вдоль длинной стороны ленты соосно с переменным током [1, 3]. В аморфных лентах на основе кобальта, несмотря на малую магнитострикцию, данный эффект может составлять 20% и более [4], что обуславливает его практическую значимость. Например, предложено использование стрессимпедансного эффекта для измерения деформаций [1]. СИЭ, вызванный изгибными деформациями, также имеет практическую значимость, например, для измерения параметров потока жидкости по изменению диаметра трубы [5].

Механические напряжения, воздействующие на аморфную магнитомягкую ленту в процессе термообработки, позволяют влиять на параметры наведенной магнитной анизотропии [6, 7] и, как следствие, на стресс- и магнитоимпедансные свойства [1–3, 8].

Характер изменения импеданса под действием механических напряжений зависит от их типа, ориентации оси легкого намагничивания (ОЛН) и знака магнитострикции материала [1, 3, 4]. Отметим, что магнитная структура аморфных магнитомягких лент неоднородна, что обусловлено преимущественно магнитоупругой природой их магнитной анизотропии, довольно сложным характером распределения внутренних закалочных напряжений [9–11], а также влиянием шероховатостей поверхности [12–14]. Об этом косвенно свидетельствуют экспериментальные результаты по изучению СИЭ в широком диапазоне частот переменного тока [4].

Распределение магнитной проницаемости по сечению ленты можно исследовать с помощью метода магнитоимпедансной томографии (МИТ), предложенного изначально для цилиндрических объектов [15]. В дальнейшем МИТ показала свою применимость и для случая амор-

фных лент с неоднородной магнитной структурой [16]. В настоящее время МИТ продолжает активно развиваться [17], в том числе обсуждаются пути дальнейшего развития теоретических подходов и степень применимости метода к системам различной геометрии [18].

Данная работа посвящена исследованию распределения магнитной проницаемости по сечению упруго деформированных аморфных лент на основе кобальта с помощью МИТ.

ОБРАЗЦЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Аморфные ленты сплава $\text{Co}_{68.6}\text{Fe}_{3.9}\text{Mo}_{3.0}\text{Si}_{12.0}\text{B}_{12.5}$ были получены методом быстрой закалки из расплава на вращающийся барабан. Номинальная ширина ленты составляла $a = 0.78$ мм, толщина $2b = 26$ мкм. Из исходных лент были изготовлены образцы длиной $l = 30$ мм. Данный состав, как и составы с добавками хрома, были предложены для использования в магнитном детектировании суперпарамагнитных маркеров, так как чувствительные МИ-элементы на их основе сочетают в себе высокую коррозионную стойкость и достаточную чувствительность эффекта МИ [19].

Индукционные петли магнитного гистерезиса были получены в продольном магнитном поле частотой 1 кГц и амплитудой 1.2 кА/м.

Модуль электрического импеданса Z измеряли с помощью измерительного комплекса магнитоимпедансной спектроскопии на базе прецизионного анализатора Agilent 4294A [3]. В настоящей работе использованы возможности комплекса по исследованию одновременного влияния на Z внешнего магнитного поля H и растягивающих напряжений σ . Максимальные значения этих величин составляли:

$H_{\max} = \pm 12.3$ кА/м и $\sigma_{\max} = 480$ МПа. Действующее значение силы переменного тока было равно 1 мА. Частоту переменного тока f варьировали в диапазоне 0.01 – 80 МГц. Переменный ток, внешнее магнитное поле и растягивающие механические напряжения были ориентированы вдоль длины образца.

Магнитоимпедансный эффект, состоящий в изменении импеданса под действием внешнего магнитного поля [8], рассчитывали по формуле:

$$\Delta Z / Z(H) = \frac{Z(H) - Z(H_{\max})}{Z(H_{\max})} \times 100\%. \quad (1)$$

Относительное изменение импеданса под действием внешних механических напряжений (стрессимпедансный эффект) определяли с помощью выражения:

$$(\Delta Z / Z)_{\sigma}(\sigma) = \frac{Z(\sigma) - Z(\sigma = 0)}{Z(\sigma = 0)} \times 100\%. \quad (2)$$

МИТ состоит в сопоставлении экспериментальных и полученных с помощью компьютерного моделирования зависимостей $Z(f)/R_{\text{DC}}$, где R_{DC} – сопротивление ленты на постоянном токе. Моделирование выполняли в программной среде Comsol Multiphysics (лицензия № 9602434). Модель ленты имела прямоугольное сечение $2b \times a$ и длину l . Сечение разбивали на $2n - 1$ слоев, расположенных симметрично относительно ее середины. В данной работе $n = 5$ (рис. 1). Ширина и длина каждого слоя были равны a и l соответственно. Координаты внешних границ слоев приведены в табл. 1. Для каждого слоя задавали значение поперечной магнитной проницаемости μ_i , где $i = 1 \dots n$ (магнитная проницаемость симметричных слоев одинакова). При этом μ_i варьировали от 1 до 20 000. Удельные проводимости слоев принимали одинаковыми и равными экспериментально полученному значению 615 кСм/м.

Отметим, что при моделировании учитывали магнитный поток не только внутри, но и вне ленты [16]. Комбинацию значений μ_i , при ко-

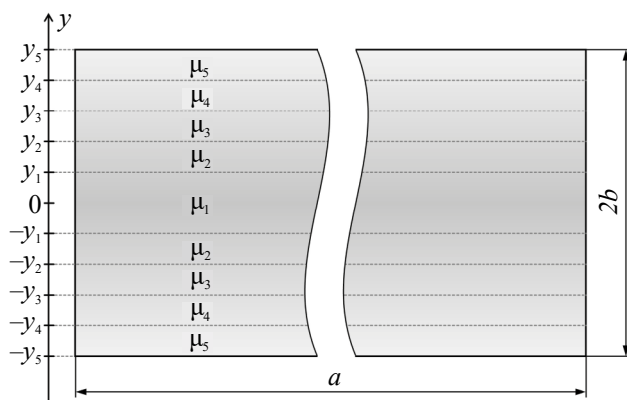


Рис. 1. Разбиение компьютерной модели ленты на слои с различными магнитными проницаемостями.

Таблица 1. Координаты внешних границ слоев модели ленты при выполнении МИТ

Координата границы слоя	Значение, мкм
y_1	6
y_2	8
y_3	10
y_4	12
y_5	13

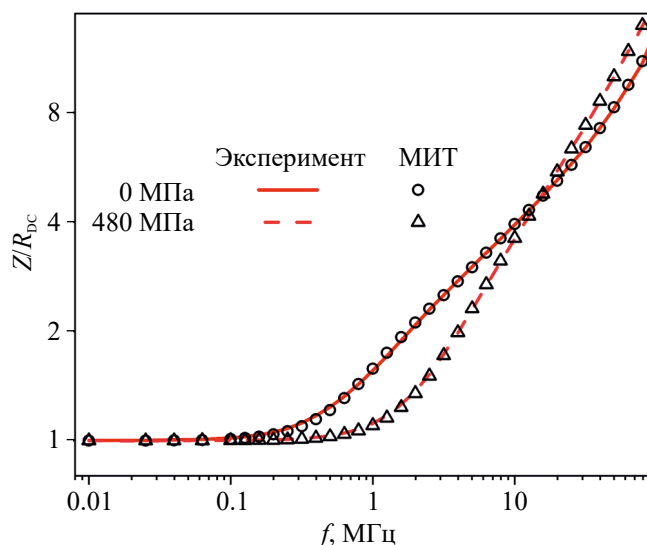


Рис. 2. Частотные зависимости приведенного импеданса $Z(f)/R_{DC}$, полученные экспериментально (линии) и восстановленные с помощью МИТ (маркеры), при разных значениях растягивающих механических напряжений.

торой смоделированная зависимость $Z(f)/R_{DC}$ имеет наименьшее отклонение от экспериментальной, принимали за приближение реального распределения магнитной проницаемости по сечению ленты $\mu(y)$.

Для всего исследованного интервала механических напряжений отклонение зависимостей $Z(f)/R_{DC}$, полученных с помощью моделирования, от экспериментальных не превышало 3%

(рис. 2). Отклонение может быть связано с тем, что при моделировании не была учтена частотная дисперсия магнитной проницаемости, в том числе дисперсия магнитной проницаемости, связанной с движением доменных границ. Более того, для МИТ использовали симметричные модели, тогда как распределение магнитной проницаемости может быть несимметричным из-за несимметричного распределения закалочных напряжений и различного состояния свободной и контактной поверхностей ленты [9–14]. Изображения свободной и контактной поверхностей исследуемой ленты, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, приведены на рис. 3а, б.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Петля продольного магнитного гистерезиса свидетельствует о том, что исследуемые ленты обладают выраженными магнитомягкими свойствами (рис. 3в). Намагниченность насыщения составляет $M_s \approx 540$ кА/м, остаточная намагниченность $M_r \approx 290$ кА/м. Коэрцитивная сила приблизительно равна 50 А/м.

В отсутствие механических напряжений ($\sigma = 0$) зависимости МИ от напряженности внешнего магнитного поля $\Delta Z/Z(H)$, рассчитанные по формуле (1), на частотах переменного тока 0.1 МГц и выше имеют два пика (рис. 4). Другими словами, МИ достигает максимума в поле, отличном от нуля: $H_p \neq 0$ (рис. 5а). На частотах

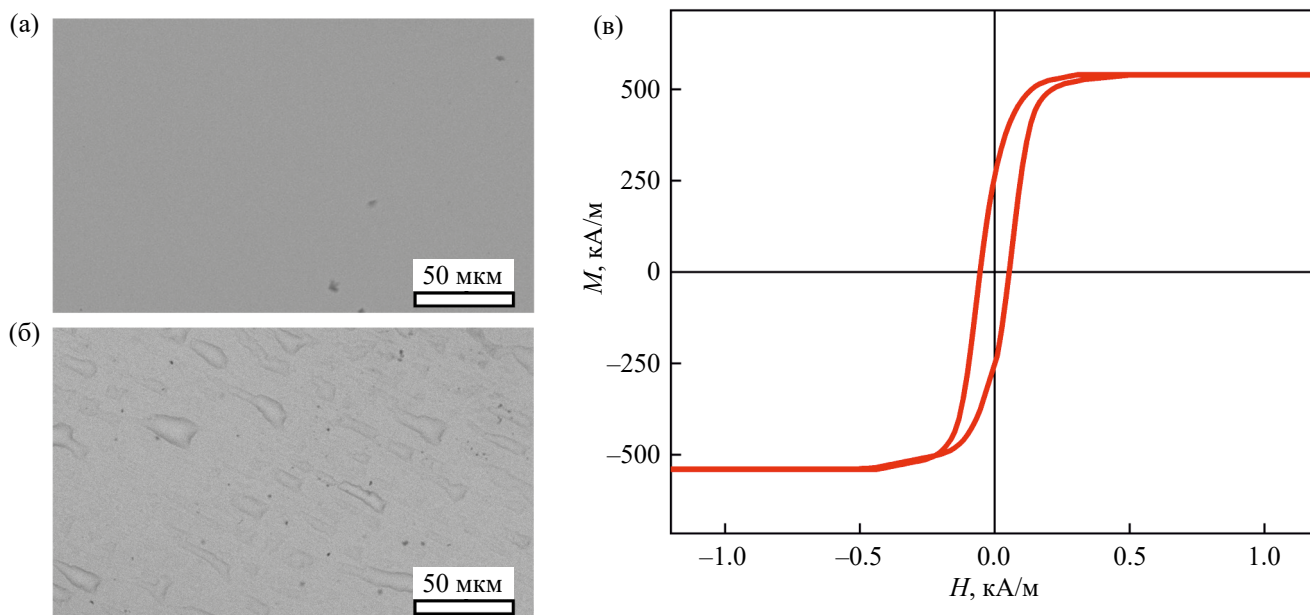


Рис. 3. Изображение свободной (а) и контактной (б) поверхностей быстрозакаленной ленты $\text{Co}_{68.6}\text{Fe}_{3.9}\text{Mo}_{3.0}\text{Si}_{12.0}\text{B}_{12.5}$, полученное сканирующей электронной микроскопией, и петля магнитного гистерезиса при приложении внешнего поля в плоскости ленты вдоль ее длины (в).

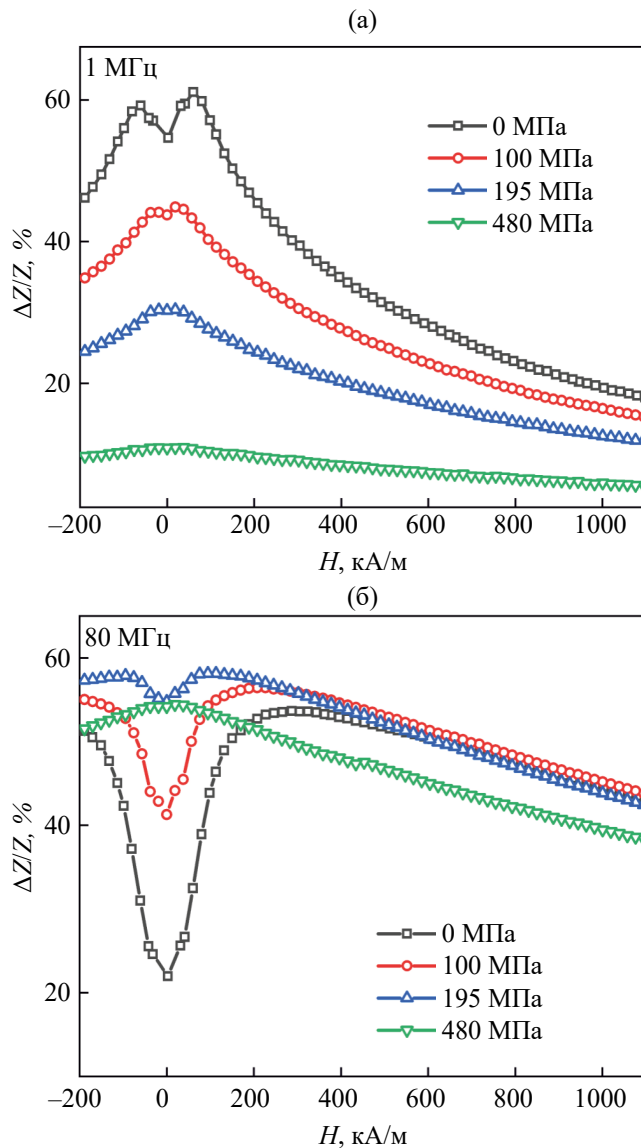


Рис. 4. Зависимости МИ от напряженности внешнего магнитного поля $\Delta Z/Z(H)$, полученные при различных растягивающих напряжениях на частоте переменного тока: (а) 1 МГц; (б) 80 МГц.

ниже 0.1 МГц зависимости $\Delta Z/Z(H)$ имеют один максимум, т. е. $H_p = 0$ (рис. 5а). С повышением частоты переменного тока напряженность магнитного поля H_p , необходимая для достижения максимального МИ, увеличивается (рис. 5а).

Как известно, положение пика на кривой $\Delta Z/Z(H)$ зависит как от эффективного значения константы магнитной анизотропии, так и от ориентации ОЛН [3]. Поэтому, принимая во внимание существование такого явления как скин-эффект, можно сделать вывод, что наблюдаемые изменения H_p указывают на неоднородное распределение магнитной проницаемости по сечению ленты.

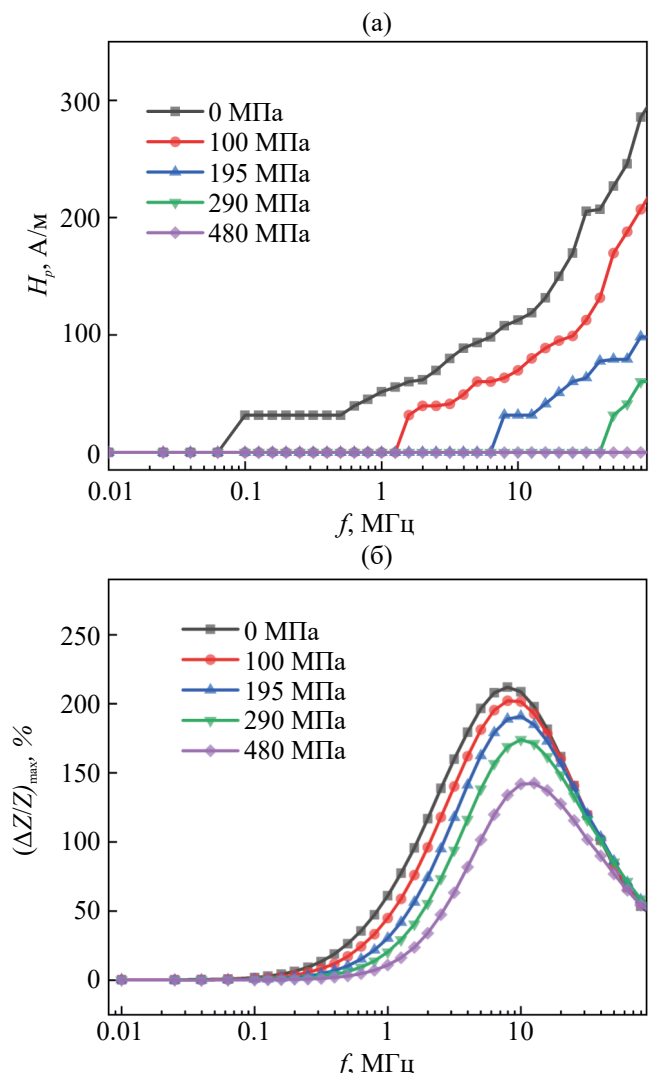


Рис. 5. Частотные зависимости: (а) поля пика H_p (поле, в котором МИ достигает максимального значения); (б) максимального МИ $(\Delta Z/Z)_{\max}$. Зависимости получены при механических растягивающих напряжениях σ от 0 до 480 МПа.

Увеличение растягивающих механических напряжений независимо от частоты переменного тока приводит к уменьшению H_p . В конце концов, зависимость $\Delta Z/Z(H)$ типа “два пика” переходит в зависимость типа “один пик” (рис. 4), т. е. H_p уменьшается до 0 (рис. 5а).

Такие изменения магнитоимпедансных зависимостей под действием механических напряжений говорят о том, что эффективная константа магнитострикции исследуемых лент положительна. Данная величина, определенная по изменению зависимостей $\Delta Z/Z(H)$ под действием механических напряжений так, как это предложено в работе [20], составляет $\lambda_s \approx +0.59 \cdot 10^{-7}$. Также следует отметить, что чем выше частота переменного тока, тем больше

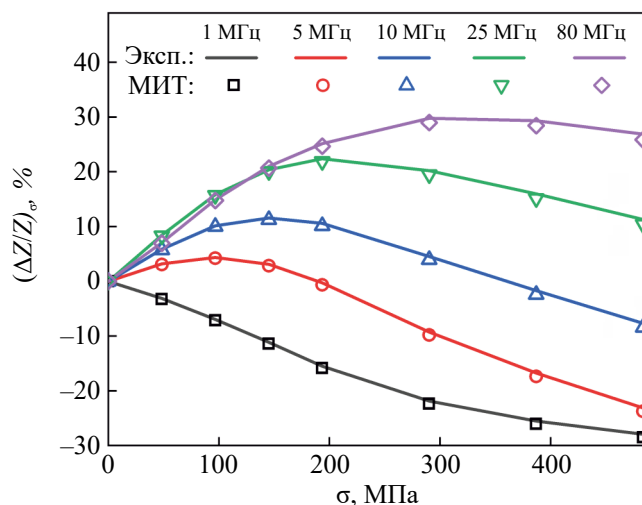


Рис. 6. Относительное изменение импеданса под действием механических напряжений. Зависимости на разных частотах переменного тока получены экспериментально (сплошные линии), а также рассчитаны по результатам МИТ (маркеры).

значения σ , при которых наблюдается переход от зависимости типа “два пика” к зависимости типа “один пик” (рис. 4). Это еще раз подтверждает предположение о существовании неоднородной магнитной структуры быстрозакаленных лент. В отсутствие механических напряжений максимальный МИ $(\Delta Z/Z)_{\max}$ (соответствует пику на магнитолевой зависимости МИ) достигает наибольшего значения на частоте переменного тока около 8 МГц (рис. 5б). При этом $(\Delta Z/Z)_{\max}$ превышает 200%, что может представлять практический интерес. С увеличением σ наблюдается уменьшение величины $(\Delta Z/Z)_{\max}$ во всем исследованном диапазоне частот переменного тока. При этом максимум на зависимости $(\Delta Z/Z)_{\max}(f)$ смещается в область больших частот (рис. 5б).

На рис. 6 представлены зависимости относительного изменения импеданса от величины механических напряжений $(\Delta Z/Z)_0(\sigma)$, рассчитанные по формуле (2). Видно, что на частотах переменного тока ниже 5 МГц увеличение механических напряжений сразу приводит к уменьшению $(\Delta Z/Z)_0$. На частотах 5 МГц и выше с увеличением σ сначала наблюдается рост, а затем уменьшение $(\Delta Z/Z)_0$. При этом величина механических напряжений, при которой рост сменяется уменьшением, тем больше, чем выше частота переменного тока. Несмотря на малую величину магнитострикции в материалах данного состава, относительное изменение импеданса под действием механических напряжений достигает заметной величины 30%.

Зависимости магнитной проницаемости различных областей ленты от механических на-

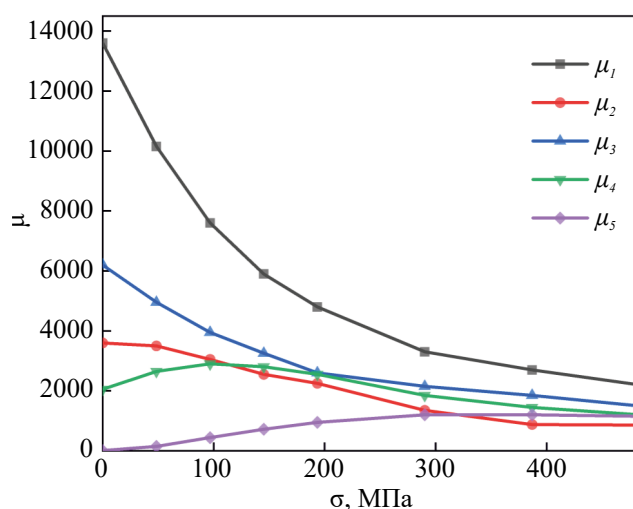


Рис. 7. Зависимости магнитных проницаемостей различных областей ленты от растягивающих механических напряжений, полученные с помощью МИТ.

пряжений, восстановленные с помощью МИТ, представлены на рис. 7 и отражают соответствующие изменения распределения магнитной проницаемости по сечению ленты. По характеру изменения магнитной проницаемости выделенные области ленты можно разделить на две группы. В первую группу входят внутренние области 1, 2 и 3 с магнитной проницаемостью μ_1 , μ_2 и μ_3 соответственно. С ростом σ проницаемость этих областей уменьшается во всем исследованном интервале механических напряжений (рис. 7). Вторую группу составляют оставшиеся внешние области. Их проницаемость ведет себя иначе: μ_4 и μ_5 с ростом σ сначала увеличиваются, а затем уменьшаются.

Поскольку магнитострикция ленты положительна, внешние растягивающие напряжения стремятся ориентировать намагниченность вдоль длинной стороны (оси) ленты. Как было показано ранее [3], в случае продольной ОЛН увеличение σ приведет к уменьшению магнитной проницаемости, а в случае поперечной — проницаемость сначала увеличится и, достигнув некоторого максимального значения, будет уменьшаться. Принимая во внимание магнитолевые зависимости проницаемости, представленные на рис. 7, можно сделать вывод, что внутренние области ленты имеют преимущественно продольную ось легкого намагничивания (ОЛН), а внешние — преимущественно поперечную ОЛН. Отметим, что во внешних и внутренних областях действуют внутренние закалочные напряжения разного знака [9–11]. Это и определяет различную ориентацию ОЛН

в них, поскольку анизотропия аморфных лент имеет магнитоупругую природу.

Обращают на себя внимание сильно изменяющиеся от области к области значения магнитной проницаемости. Так, магнитная проницаемость центрального слоя μ_1 в отсутствие механических напряжений составляет почти 14 000. Проницаемости второго μ_2 и третьего μ_3 слоев заметно ниже — около 4000 и 6000 соответственно. Проницаемость четвертого слоя достигает максимума при заметно меньшем значении σ по сравнению с пятым слоем: около 100 и около 400 МПа соответственно. При этом максимальное значение μ_4 превышает максимальное значение μ_5 почти в 2.5 раза. Вновь обращаясь к представлениям о магнитоупругой природе магнитной анизотропии в аморфных лентах, полученное распределение магнитной проницаемости можно связать как с распределением закалочных напряжений по сечению ленты, которое может иметь сложный характер [9–11], так и с определенным вкладом поверхностной анизотропии.

По результатам МИТ, толщина области с преимущественно продольной ориентацией намагниченности составляет $2y_3 = 20$ мкм (табл. 1). Зная M_s и M_r (рис. 3в), также можно оценить эффективный размер продольно намагниченной области сиз выражения $2g = 2bM_r / M_s$ (около 14 мкм) [21]. Расхождение можно объяснить тем, что намагниченность во внутренних областях ленты ориентирована не строго по оси, а под некоторым углом. Наиболее вероятным представляется то, что намагниченность, имея практически строго поперечную ориентацию в самом поверхностном слое, по мере продвижения вглубь ленты постепенно поворачивается к продольному направлению [15]. В центральном слое намагниченность, вероятно, ориентирована практически вдоль оси ленты, о чем свидетельствует его высокая магнитная проницаемость (рис. 7).

Считая, что ОЛН в центральном слое ориентирована вдоль длины ленты, а во внешнем — перпендикулярно ей, можно достаточно просто оценить величину внутренних закалочных напряжений σ_{in} в этих слоях.

Приняв, что константа магнитной анизотропии $K = 3\lambda_s\sigma_{in}/2$ [11], можно записать следующее выражение для энергии внешнего слоя:

$$W = \frac{3}{2}\lambda_s\sigma_{in}\sin^2\theta + \frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2\theta, \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, θ — угол отклонения намагниченности от ОЛН. Как видно из выражения (3), W — минимальна, а, следовательно, магнитная проницаемость максимальна, когда $\sigma = -\sigma_{in}$. Магнитная проницаемость внешнего,

5-го, слоя достигает максимума при 400 МПа (рис. 7). Следовательно, σ_{in} в этом слое составляет около —400 МПа (сжимающие напряжения). Отметим, что магнитная проницаемость 4-го слоя достигает максимального значения при 100 МПа (рис. 7), что, вероятно, связано с тем, что внутренние закалочные напряжения во внешних слоях уменьшаются по модулю по мере продвижения вглубь ленты.

Для оценки σ_{in} в центральном слое удобно воспользоваться выражением $\sigma_{in} = \mu_0 M_s^2 / 3(\mu - 1)\lambda_s$. Здесь μ — проницаемость при $\sigma = 0$. Данное выражение можно получить хорошо известным способом, описанным, например, в работе [3]. Вычисления показывают, что в центральном слое $\sigma_{in} \approx 150$ МПа (растягивающие напряжения).

Значения стресс-импедансного эффекта, рассчитанные по результатам МИТ, практически совпадают с экспериментальными (рис. 6, маркеры).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью метода магнитоимпедансной томографии в настоящей работе установлено, что магнитная проницаемость по сечению аморфной ленты $\text{Co}_{68.6}\text{Fe}_{3.9}\text{Mo}_{3.0}\text{Si}_{12.0}\text{B}_{12.5}$ с малой положительной магнитострикцией распределена неоднородно. Магнитная проницаемость внешних областей общей толщиной около 3 мкм в отсутствие механических напряжений не превышает 2100, в то время как проницаемость внутренних областей заметно выше и варьируется от примерно 4000 до 14 000. Характер изменения распределения магнитной проницаемости по сечению ленты под действием внешних растягивающих напряжений указывает на то, что эффективная магнитная анизотропия внешних областей преимущественно поперечная, а внутренних — продольная. Показано, что распределение магнитной проницаемости по сечению ленты определяется соответствующим распределением внутренних закалочных напряжений. Магнитные свойства внешних областей ленты находятся также и под влиянием шероховатостей ее поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-22-00709, <https://rscf.ru/project/22-22-00709/>, ФГБОУ ВО “Иркутский государственный университет”, Иркутская обл.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pan P., Hayward T.J. Comparative study of the giant stress impedance behavior of commercial amorphous

- ribbons for strain sensing applications // *J. Appl. Phys.* 2022. V. 131. P. 214503.
2. Li D., Lu Z., Zhou S. Giant stress-impedance effect in amorphous and thermally annealed $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ribbons // *Sens Actuators A Phys.* 2003. V. 109. P. 68–71.
 3. Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Semirov A.V., Savin P.A., Kurlyandskaya G.V. Magnetoimpedance and Stress-Impedance Effects in Amorphous CoFeSiB Ribbons at Elevated Temperatures // *Materials*. 2020. V. 13. P. 3216.
 4. 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.
 5. Beato-López J.J., Urdániz-Villanueva J.G., Pérez-Landazábal J.I., Gómez-Polo C. Giant Stress Impedance Magnetoelastic Sensors Employing Soft Magnetic Amorphous Ribbons // *Materials*. 2020. V. 13. P. 2175.
 6. Лукишина В.А., Дмитриева Н.В., Волкова Е.Г., Шишкин Д.А. Магнитные свойства сплава $\text{Fe}_{63.5}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, нанокристаллизованного в присутствии растягивающих напряжений // *ФММ*. 2019. Т. 120. С. 346–351.
 7. Li D., Lu Z., Zhou S. Induced Magnetic Anisotropy and Stress-Impedance Effect in Nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ Ribbons // *IEEE Sensors Journal*. 2006. V. 6. P. 924–927.
 8. 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.
 9. Bengus V.Z., Duhaj P., Korolkova E.B., Ocelík V. Internal Stress Contribution to the Yield Stress Anisotropy of Amorphous Alloy Ribbons // *Solid State Phenomena*. 1993. V. 35–36. P. 575–580.
 10. Tejedor M., García J.A., Carrizo J., Elbaile L., Santos J.D. Effect of residual stresses and surface roughness on coercive force in amorphous alloys // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. P. 8435.
 11. Takahashi M., Miyazaki T. Magnetic Anisotropy in an Amorphous Fe80P13C7 Alloy // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1979. V. 18. P. 743–752.
 12. Tsukahara S., Satoh T., Tsushima T. Magnetic anisotropy distribution near the surface of amorphous ribbons // *IEEE Trans Magn.* 1978. V. 14. P. 1022–1024.
 13. Kraus L., Tomáš I., Keatociivílová E., Speingmann B., Müller K. Magnetic anisotropy caused by oriented surface roughness of amorphous ribbons // *Phys. Status Solidi (a)*. 1987. V. 100. P. 289–299.
 14. Vavassori P., Callegaro L., Puppini E., Malizia F., Ronconi F. Surface magnetic characterization of FeB amorphous ribbons // *JMMM*. 1996. V. 157–158. P. 171–172.
 15. Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Moiseev A.A., Svalov A.V., Semirov A.V. The Study of the Distribution of Electrical and Magnetic Properties over the Conductor Cross-Section Using Magnetoimpedance Tomography: Modeling and Experiment // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 9512.
 16. Bukreev D.A., Derevyanko M.S., Semirov A.V. Magnetoimpedance Effect in Cobalt-Based Amorphous Ribbons with an Inhomogeneous Magnetic Structure // *Sensors*. 2023. V. 23. P. 8283.
 17. Букреев Д.А., Деревянко М.С., Моисеев А.А., Семиров А.В. Магнитоимпедансная томография аморфных проводов CoFeTaSiB // *ФММ*. 2023. Т. 124. С. 710–716.
 18. Buznikov N.A., Kurlyandskaya G.V. Theoretical Study of Microwires with an Inhomogeneous Magnetic Structure Using Magnetoimpedance Tomography // *Sensors*. 2024. V. 24. P. 3669.
 19. Amirabadizadeh A., Lotfollahi Z., Zelati A. Giant magnetoimpedance effect of $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorphous wire in the presence of magnetite ferrofluid // *JMMM*. 2016. V. 415. P. 102–105.
 20. Knobel M., Gómez-Polo C., Vázquez M. Evaluation of the linear magnetostriction in amorphous wires using the giant magneto-impedance effect // *JMMM*. 1996. V. 160. P. 243–244.
 21. Alekhina I., Kolesnikova V., Rodionov V., Andreev N., Panina L., Rodionova V., Perov N. An indirect method of micromagnetic structure estimation in microwires // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 11–16.

MAGNETO-IMPEDANCE TOMOGRAPHY OF ELASTICALLY DEFORMED AMORPHOUS Co-BASED RIBBONS

D. A. Bukreev^{1,*}, M. S. Derevyanko¹, G. V. Kurlyandskaya², and A. V. Semirov¹

¹Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

²Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, 620002 Russia

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

The distribution of magnetic permeability over the cross section of rapidly quenched amorphous $\text{Co}_{68.6}\text{Fe}_{3.9}\text{Mo}_{3.0}\text{Si}_{12.0}\text{B}_{12.5}$ ribbons was studied in the range of elastic tensile stresses from 0 to 480 MPa. This distribution was restored using magnetic impedance tomography, which is a method based on the analysis of the frequency dependences of the impedance, when external magnetic fields of varying amplitude or tensile mechanical stresses are applied to ribbons. In this case, the alternating-current frequency varied in the range from 0.01 to 80 MHz.

Keywords: magneto-impedance tomography, magnetic impedance, finite element method, computer simulation, amorphous ribbons