

05

Радиальное распределение магнитной проницаемости в аморфных проводах CoFeNbSiB

© А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, М.С. Деревянко, А.В. Семиров

Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия
e-mail: Moiseev.AI.An@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 июля 2023 г.
В окончательной редакции 24 октября 2023 г.
Принято к публикации 10 ноября 2023 г.

Представлены результаты оценки радиального распределения магнитной проницаемости в аморфных проводах $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ методом магнитоимпедансной томографии. Обнаружено, что радиальное распределение магнитной проницаемости существенно неоднородно. При этом минимальное значение, близкое к единице, магнитная проницаемость принимает вблизи оси провода, а максимальные значения в несколько тысяч — в средней части сечения провода. Показано, что в глубинных областях провода магнитная проницаемость во многом определяется величиной и соотношением компонент внутренних закалочных напряжений. В поверхностной области провода на величину магнитной проницаемости существенное влияние могут оказывать размагничивающие поля, возникающие на неоднородностях рельефа поверхности.

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

DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56903.189-23

Введение

Технология получения металлических сплавов в аморфном состоянии предполагает быструю закалку из расплава. Вследствие данной операции аморфные металлические сплавы находятся в напряженном состоянии, которое отличается значительной величиной внутренних механических напряжений и их неоднородным распределением в объеме сплава [1,2]. Если сплавы получены в виде проводов цилиндрической геометрии, то основного внимания заслуживает радиальное распределение закалочных напряжений. Данное распределение можно оценить из рассмотрения процесса застывания расплава [3,4], или из рассмотрения радиального распределения свойств материала, проявляющих зависимость к закалочным напряжениям. Оба подхода не дают однозначного ответа и имеют ряд существенных допущений. Однако они могут использоваться в качестве взаимного дополнения друг друга.

Аморфные сплавы на основе переходных металлов обладают сильно выраженными магнитными свойствами. Благодаря значительной величине магнитной проницаемости, а также ее чувствительности к различным внешним воздействиям, данные материалы уже используются в различных практических приложениях [5,6]. С другой стороны, именно магнитная проницаемость аморфных ферромагнетиков является одним из индикаторов, позволяющим анализировать процессы, протекающие в них.

Как отмечалось выше, для аморфных ферромагнитных сплавов, полученных в виде проводов цилиндрической геометрии, особый интерес представляет радиальное распределение закалочных напряжений. Мировым науч-

ным сообществом считается, что магнитная анизотропия в данном классе материалов имеет магнитоупругую природу [3,4]. Согласно этим представлениям, константа магнитной анизотропии определяется эффективным значением закалочных напряжений, а направление оси анизотропии зависит от соотношения компонент этих напряжений и знака константы магнитоупругости. Параметры магнитной анизотропии влияют на величину магнитной проницаемости и характер ее изменения под различными внешними воздействиями. Поведение циркулярной магнитной проницаемости μ в аморфном цилиндрическом проводнике под действием аксиального магнитного поля можно описать следующим образом [7]:

— максимальное значение μ достигается в отсутствие внешнего аксиального магнитного поля, следовательно, в магнитной анизотропии преобладает аксиальная компонента;

— максимальное значение μ достигается при некотором значении внешнего аксиального магнитного поля, следовательно, в магнитной анизотропии преобладает циркулярная компонента.

Таким образом, магнитополевая зависимость магнитной проницаемости позволяет провести оценку свойств магнитной анизотропии. Экспериментальное определение магнитополевой зависимости магнитной проницаемости может реализовываться несколькими способами. Например, анализ гистерезисных свойств исследуемых образцов дает представление о магнитополевой зависимости эффективной магнитной проницаемости всего объема образца. В свою очередь, анализ поведения высокочастотного электрического импеданса во внешнем магнитном поле благодаря скин-эффекту

дает возможность оценить магнитополевою зависимость циркулярной магнитной проницаемости отдельных слоев образца. Указанная возможность лежит в основе метода магнитоимпедансной томографии (МИТ). Суть МИТ заключается в подборе таких численных значений электромагнитных и геометрических параметров модели исследуемого образца, что дают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных зависимостей электрического импеданса от частоты переменного тока [8].

В настоящей работе обсуждается возможность оценки радиального распределения циркулярной магнитной проницаемости цилиндрических проводников, полученных быстрой закалкой ферромагнитного сплава, методом МИТ, а также физические факторы, приводящие к немонотонной зависимости циркулярной магнитной проницаемости от радиальной координаты.

1. Моделирование, образцы и экспериментальные методики

Для реализации метода МИТ исследуемые образцы представлялись моделью из n коаксиальных цилиндрических областей (слоев). Для каждого слоя провода задавали значение магнитной проницаемости μ_i , удельной электропроводности γ_i и внешнего радиуса r_i . Величина r_n равна радиусу провода. Удельную электропроводность γ принимали одинаковой для всех областей провода. Рассматривали модель с $n = 5$, которая является оптимальной по соотношению информативности и вычислительной трудоемкости. Модели исследуемых образцов с $n = 2$ и 3 рассматривались авторами ранее [8]. Методом конечных элементов рассчитывали зависимости приведенного импеданса от частоты переменного тока $Z(f)/R_{DC}$. Частоту f изменяли в диапазоне от 0.01 до 100 МГц. Непосредственный расчет осуществлялся с помощью программного пакета Comsol Multiphysics (лицензия № 9602434). При построении конечно-элементной сетки следили, чтобы размер ее элементов был меньше толщины скин-слоя. Варьируя значения μ_i и r_i , получали массив смоделированных зависимостей $Z(f)/R_{DC}$. Далее в данном массиве находили зависимость, имеющую наименьшее абсолютное отклонение от аналогичной зависимости, полученной экспериментальным путем.

Экспериментальные исследования зависимостей высокочастотного электрического импеданса от частоты переменного тока проведены на отрезках аморфного быстрозакаленного провода $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$, полученных методом быстрой закалки из расплава в ЦНИИ-Чермет им. И.П. Бардина, радиусом $r_n = 90 \mu\text{m}$ и длиной 90 mm. Активная длина образца, по которой протекал электрический ток, составляла 24 mm. Все исследуемые образцы находились в исходном состоянии. Константа магнитострикции положительная, около 10^{-7} . Результаты исследования магнитных и магнитоимпедансных

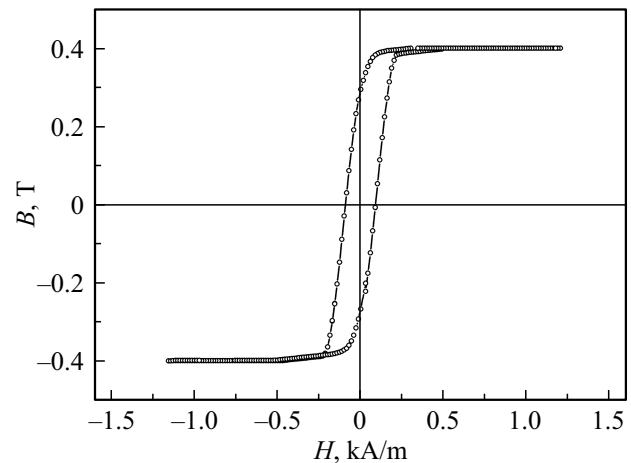


Рис. 1. Продольная петля магнитного гистерезиса аморфного провода $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$.

свойств данных проводов достаточно подробно представлены авторами настоящей работы [9,10].

Измерения модуля электрического импеданса Z были выполнены на измерительном комплексе магнитоимпедансной спектроскопии [11] в диапазоне частот переменного тока, f , (0.01–100) МГц, протекающего вдоль длины образца. Действующее значение силы тока составляло 1 mA. Вдоль длины образца было ориентировано и внешнее магнитное поле H , максимальная напряженность которого составляла $H_{\max} = \pm 12.3 \text{ kA/m}$. Для количественной оценки зависимости $Z(H)$ рассчитывалось магнитоимпедансное отношение МИ:

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

2. Результаты и обсуждение

Петли магнитного гистерезиса, полученные индукционным методом при аксиальном перемагничивании частотой 1 kHz, свидетельствуют о преимущественно аксиальной ориентации намагниченности в объеме провода (рис. 1).

Магнитополевые зависимости импеданса, полученные на разных частотах переменного тока, указывают на неоднородность распределения циркулярной магнитной проницаемости в поперечном сечении провода. Далее речь будет идти о циркулярной магнитной проницаемости. С повышением частоты переменного тока изменяется МИ и характер ее магнитополевой зависимости (рис. 2).

На частотах переменного тока частотой 2 MHz и ниже максимальное значение МИ наблюдается в отсутствие внешнего магнитного поля. Тогда как на частотах переменного тока выше 2 MHz МИ достигает максимального значения в магнитных полях напряженностью (40–190) A/m. Таким образом, в поперечном сечении

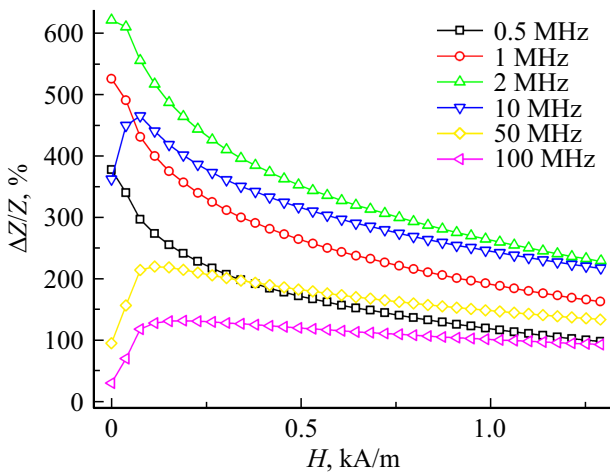


Рис. 2. Зависимости магнитоимпедансного отношения МИ от внешнего аксиального магнитного поля, измеренные на разных частотах переменного тока, из состояния технического насыщения.

провода можно выделить минимум две области с отличающимися параметрами магнитной проницаемости. Однако МИТ с использованием двуслойной модели не позволяет добиться хорошего согласования смоделированных и экспериментальных зависимостей $Z(f)/R_{DC}$ [8]. Существенно приблизить смоделированную зависимость $Z(f)/R_{DC}$ к экспериментальной позволяет введение в модель провода тонкого поверхностного слоя для учета влияния неоднородностей поверхности реального образца на магнитную проницаемость. Однако это не позволяет получить хорошее приближение в области низких частот [8]. Принимая во внимание скин-эффект, можно предположить, что для приближения смоделированной зависимости $Z(f)/R_{DC}$ к экспериментальной в области низких частот необходимо ввести в модель дополнительные внутренние слои.

Для определения количества слоев и примерной оценки их геометрического положения обратились к расчетным зависимостям компонент закалочных напряжений [4]. Данные расчетные зависимости получены для проводов, изготовленных по аналогичной технологии из сплава близкого состава к исследуемым проводам. Приближенные соотношения, описывающие радиальное распределение диагональных компонент закалочных напряжений, в цилиндрической системе координат могут быть представлены следующим образом (рис. 3): $\sigma_{\rho\rho}/\sigma_0 = 0.85 \cdot (1 - x^2)$; $\sigma_{\phi\phi}/\sigma_0 = 0.85 \cdot (1 - 3x^2)$; $\sigma_{zz}/\sigma_0 = 0.57 \cdot (1 - 2x^2)$, где $\sigma_{\rho\rho}$, $\sigma_{\phi\phi}$, σ_{zz} , σ_0 — диагональные (главные) компоненты и амплитуда закалочных напряжений, $x = r/r_n$ — приведенный радиус.

Качественно данные зависимости можно разделить на следующие области:

$0 - 0.45r_n$ — слабое изменение диагональных (главных) компонент закалочных напряжений, при этом зна-

чения этих компонент положительные и их соотношение сохраняется $\sigma_{\rho\rho} \geq \sigma_{\phi\phi} \geq \sigma_{zz}$;

$0.45 - 0.7r_n$ — резкое уменьшение модуля аксиальной и циркулярной компонент закалочных напряжений, при этом значения этих компонент уменьшаются до нуля, и циркулярная компонента меняет свой знак;

$0.7 - 0.9r_n$ — увеличение модуля аксиальной и циркулярной компонент закалочных напряжений, при этом значения этих компонент отрицательные, резкое уменьшение положительной радиальной компоненты;

$0.9 - 1r_n$ — существенное преобладание отрицательной циркулярной компонент закалочных напряжений, нулевое значение радиальной компоненты.

Варьирование внешних радиусов областей модели в обозначенных границах позволило подобрать их оптимальные значения, а именно $r_1 = 30 \mu\text{m}$ ($0.3r_n$); $r_2 = 60 \mu\text{m}$ ($0.67r_n$); $r_3 = 76 \mu\text{m}$ ($0.84r_n$); $r_4 = 88 \mu\text{m}$ ($0.98r_n$); $r_5 = 90 \mu\text{m}$. Наилучшее приближение смоделированной зависимости $Z(f)/R_{DC}$ к экспериментальной (рис. 4, а), а именно абсолютное отклонение между ними не превышает 6% во всем частотном диапазоне, в том числе в области низких частот, получено при следующей комбинации электромагнитных параметров: $\gamma = 0.87 \text{ МСм/м}$; $\mu_1 = 1$; $\mu_2 = 11800$; $\mu_3 = 3400$; $\mu_4 = 6400$; $\mu_5 = 320$ (рис. 4, б).

Следует отметить, что варьирование значений магнитной проницаемости в интервале от 1 до 1000 осуществлялось с шагом 10, а подбор значений магнитной проницаемости свыше 1000 производили с шагом 50. Таким образом, для получения обсуждаемого радиального распределения магнитной проницаемости построено и проанализировано около 10^6 моделей с отличающимися комбинациями электромагнитных и геометрических параметров.

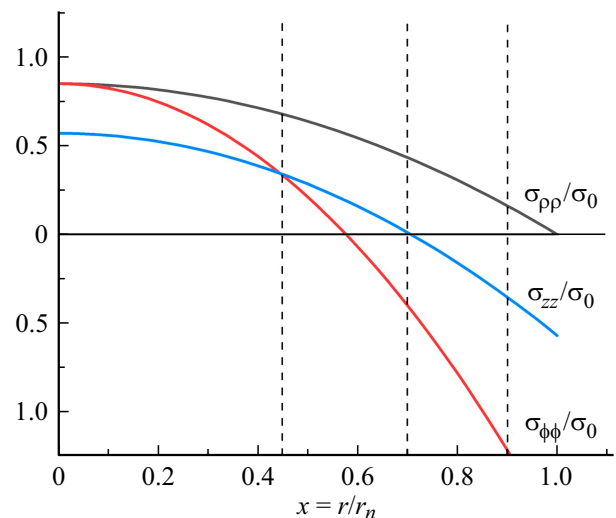


Рис. 3. Радиальное распределение диагональных компонент закалочных напряжений в аморфном цилиндрическом проводе, полученном методом быстрой закалки из расплава [4].

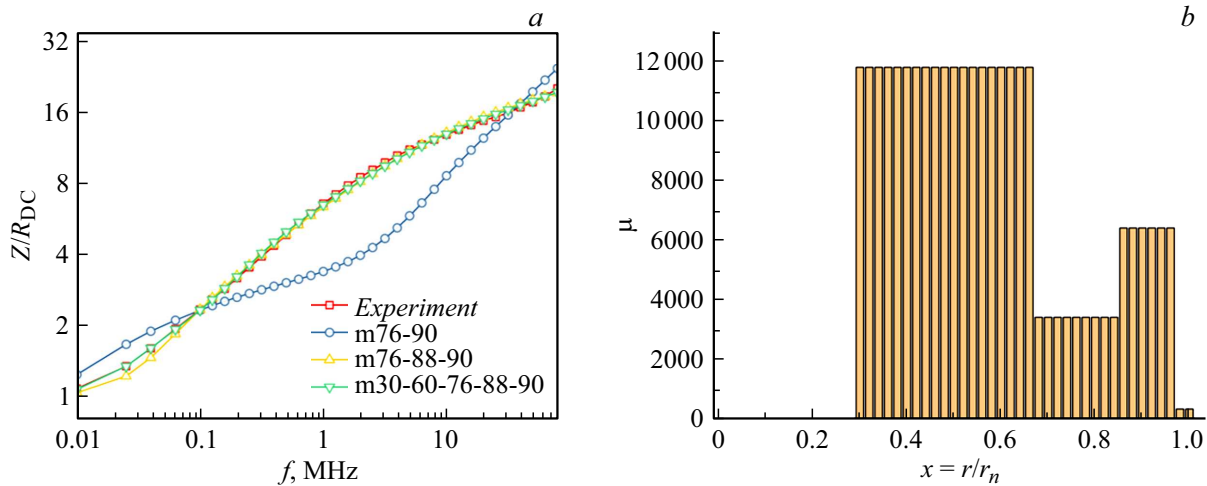


Рис. 4. *a* — частотные зависимости приведенного значения импеданса, измеренные экспериментально и полученные методом МИТ с использованием разных моделей (в обозначении модели указаны внешние радиусы слоев в микрометрах), *b* — радиальное распределение магнитной проницаемости в аморфных проводах $Co_{66}Fe_4Nb_{2.5}Si_{12.5}B_{15}$ в отсутствие внешнего магнитного поля.

Полученные численные значения магнитной проницаемости слоев провода могут быть обусловлены следующими физическими факторами:

- минимальное значение магнитной проницаемости вблизи оси провода ($\mu_1 = 1$; $r_1 = 30 \mu m$) вероятно связано с высоким значением константы эффективной магнитной анизотропии магнитоупругой природы, обусловленным значительными закалочными напряжениями в приосевой области, и преимущественно аксиальной ориентации ее оси, что согласуется с петлей магнитного гистерезиса и магнитопольевыми зависимостями импеданса, полученными в области низких частот переменного тока;

- максимальное значение магнитной проницаемости внутри провода ($\mu_2 = 11800$; $r_2 = 60 \mu m$) вероятно связано с резким уменьшением модуля аксиальной и циркулярной компоненты закалочных напряжений и как следствие значительным уменьшением константы эффективной магнитной анизотропии;

- высокие значения магнитной проницаемости вблизи поверхности провода ($\mu_3 = 3400$; $\mu_4 = 6400$; $r_3 = 76 \mu m$; $r_4 = 88 \mu m$) вероятно связаны с невысоким значением константы эффективной магнитной анизотропии;

- невысокое значение магнитной проницаемости на поверхности провода ($\mu_5 = 320$; $r_5 = 90 \mu m$) вероятно обусловлено дополнительным влиянием размагничивающих полей, возникающих из-за особенностей морфологии поверхности исследуемых образцов.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований показано, что радиальное распределение циркулярной магнитной проницаемости в аморфных цилиндрических

проводах на основе кобальта, полученных быстрой закалкой из расплава, может быть оценено методом МИТ. Немонотонной зависимости магнитной проницаемости от радиальной координаты способствует сложное распределение внутренних закалочных напряжений, обусловленное методом получения. При этом предполагается, что магнитоупругий механизм является неединственным в формировании магнитной анизотропии в исследуемых образцах. Для поверхностных слоев существенное влияние на ориентацию оси магнитной анизотропии могут оказывать размагничивающие поля, возникающие на неоднородностях рельефа поверхности. Данное предположение требует дополнительной экспериментальной проверки, при анализе результатов которой также может быть использован метод МИТ. Также представляет интерес исследование влияния аксиального магнитного поля на радиальное распределение циркулярной магнитной проницаемости в исследуемых проводах.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Liu, R. Malmhall, S.J. Savage, L. Arnberg. J. Appl. Phys., **67**, 4238 (1990).
 [2] V. Madurga, A. Hernando. J. Phys.: Condens. Matter, **2**, 2127 (1990).

- [3] M. Vazquez, A. Hernando. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **29**, 939 (1996).
- [4] A.S. Antonov, V.T. Borisov, O.V. Borisov, V.A. Pozdnyakov, A.F. Prokoshin, N.A. Usov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1788 (1999).
- [5] K. Fodil, M. Denoual, C. Dolabdjian, A. Treizebre, V. Senez. *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 173701 (2016).
DOI:10.1063/1.4948286
- [6] J. Chen, J. Li, Y. Li, Y. Chen, L. Xu. *Sensors*, **18**, 732 (2018).
DOI:10.3390/s18030732.
- [7] N.A. Usov, A.S. Antonov, A.N. Lagar'kov. *JMMM*, **185**, 159 (1998).
- [8] D.A. Bukreev, M.S. Derevyanko, A.A. Moiseev, A.V. Svalov, A.V. Semirov. *Sensors*, **22**, 9512 (2022).
<https://doi.org/10.3390/s22239512>
- [9] А.В. Семиров, А.А. Моисеев, В.О. Кудрявцев, Д.А. Букреев, Н.П. Ковалева, Н.В. Васюхно. *ЖТФ*, **85** (5), 137 (2015).
- [10] А.В. Семиров, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк, А.А. Моисеев. *Письма в ЖТФ*, **32** (15), 137 (2006).
- [11] D.A. Bukreev, M.S. Derevyanko, A.A. Moiseev, A.V. Semirov, P.A. Savin, G.V. Kurlyandskaya. *Materials*, **13**, 3216 (2020).
DOI:10.3390/ma13143216