

В. Н. ПЕРОВ,

Е. Д. СЕРБИН,

В. Н. КОСТИН, *д-р техн. наук, доц.*

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (Екатеринбург, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Показана возможность бесконтактного измерения низкочастотных упругих колебаний, возникающих при перемагничивании ферромагнетиков с помощью лазерной интерферометрии. Установлено, что определяемые по амплитуде второй гармоники упругих колебаний образца среднее и максимальное значения динамической магнитострикционной чувствительности сталей коррелируют с величиной максимального магнитострикционного удлинения исследованных сталей и могут быть характеристиками динамической магнитострикции материалов.

Ключевые слова: магнитоакустическая эмиссия, магнитострикционная чувствительность, амплитуда, основная частота, частота перемагничивания, термическая обработка

Измерение магнитострикции и магнитострикционных характеристик ферромагнетиков не теряет своей актуальности. Магнитострикция определяет шумовые характеристики магнитопроводов и уровень удельных потерь на перемагничивание, а также уровень сигнала магнитоакустической эмиссии [1] и эффективность электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) [2] в ферромагнитном материале. Бесконтактные методики измерения магнитострикции, в отличие от контактных, более устойчивы к влиянию температуры и магнитного поля, а также могут проводиться с большей скоростью [3]. Примером таких методик могут быть лазерная интерферометрия, спекл-интерферометрия [4] и интерферометрия с применением оптоволоконных решеток Брэгга [5].

Электромагнитно-акустическое преобразование и возбуждение магнитоакустической эмиссии требуют воздействия на испытуемые объекты переменного или импульсного магнитного поля, а также неоднородных магнитных полей. Целью данной работы является определение возможности бесконтактного измерения динамических магнитострикционных характеристик материалов и объектов.

Для отработки методики бесконтактных измерений магнитострикционных параметров были выбраны образцы ферромагнитных материалов с различными магнитными и магнитострикционными характеристиками.

Табл. 1. Магнитные свойства исследуемых образцов

Материал	H_c , А/м	M_S , А/см	μ_a	μ_{max}	b_0 , м/А	λ_{max}^+ , 10^{-6}	λ_s , 10^{-6}
Сталь 9ХФ	1 980	13 800	37	210	0,022	0,4	-1,8
Сталь 75Г	780	15 700	66	460	0,14	0,8	-6,6
Сталь 30ХГСА	750	15 860	92	490	0,39	2,1	-1,2
Сталь 09Г2	280	16 300	110	1300	3,3	2,7	-4,5
Армко-Fe	85	17 300	270	2800	14,0	4,1	-12
Пермендюр	129	18 650	450	1400	0,83	—	58
Никель	350	4930	102	540	0.57	—	-35

Кривые намагничивания и предельные петли гистерезиса образцов были измерены в замкнутой цепи с помощью измерительного комплекса Remagraph С-500. Измерение полевых зависимостей магнитострикции $\lambda(H)$ выполнено в однородном квазистатически изменяющемся магнитном поле соленоида посредством выносного индукционного датчика.

Бесконтактное измерение магнитострикционного изменения размеров образцов производилось с помощью лазерного сканирующего виброметра Polytec PSV-500-HV (рис.1б). Для измерения возникающих при перемагничивании упругих колебаний образцы закреплялись в специально изготовленном держателе из дюралюминия (рис.1а).



а



б

Рис. 1. Основные компоненты измерительной установки
(а – держатель образца, б – сканирующий лазерный виброметр PSV-500-HV)

Лазерный луч виброметра направляли на свободную торцевую поверхность образца и производили фокусировку и настройку луча лазера. Измерение колебаний производили в режиме быстрого преобразования Фурье с

регистрацией спектра колебаний в полосе частот от 4 до 10 Гц. Измерения проводились в неоднородном поле. Переменное магнитное поле H_r соленоида изменялось по синусоидальному закону с частотой $f_r = 4,5$ Гц.

Из рис. 2 и 3, видно, что выход на насыщение и уменьшение динамической магнитострикционной чувствительности $\delta l_{2fr}/dH_r$ происходит при меньших значениях перемагничивающего поля H_r , чем для статической магнитострикции λ . В наибольшей степени это характерно для материалов с высокой магнитной восприимчивостью (пермендюр, никель, Армко-железо). Поэтому логично связать такое поведение величины $\delta l_{2fr}/dH_r$ со скин-эффектом. Второй возможной причиной может быть использование неоднородного переменного поля.

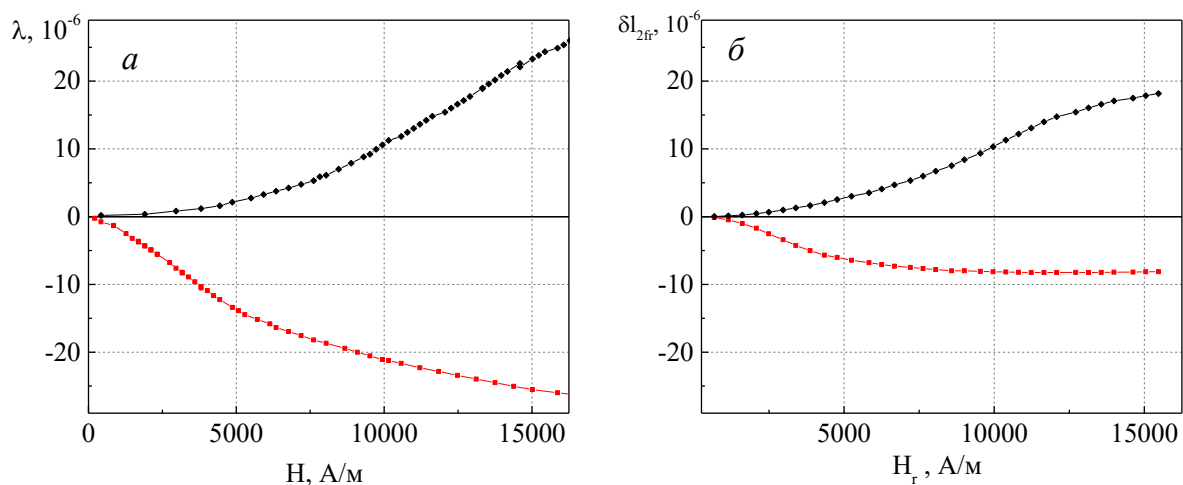


Рис. 2. Полевые зависимости статической магнитострикции λ (а) и зависимости амплитуды изменения размеров образцов δl_{2fr} (б): —◆— - пермендюр; —■— - никель

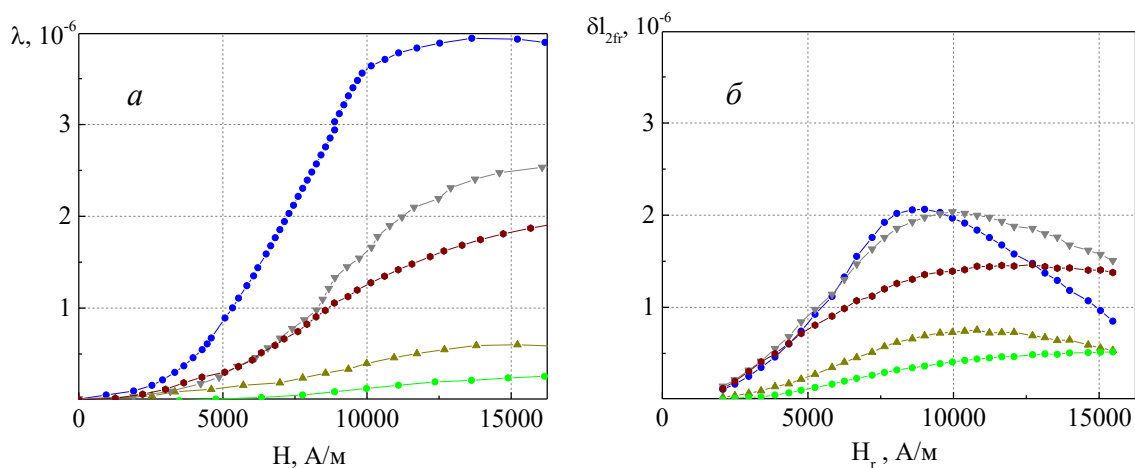


Рис. 3. Полевые зависимости статической магнитострикции λ (а) и зависимости амплитуды изменения размеров образцов δl_{2fr} (б) для группы сталей: —●— - Fe-A; —▲— - 09Г2; —●— - 30ХГСА; —▼— - 75Г; —●— - 9ХФ

Зависимости средней $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{aver}$ и максимальной $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{max}$ динамических магнитострикционных чувствительностей, рассчитанные с помощью программы «MgntstrSens» [6] по полевым зависимостям магнитострикции, измеренным с помощью лазерного сканирующего вибromетра PSV-500-HV, от величины их положительного максимума магнитострикции (табл. 1) представлены на рис. 4. Квадрат коэффициента линейной корреляции величин $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{aver}$ и λ_{max}^+ равен $R^2 = 0,91$, а для величин $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{max}$ и λ_{max}^+ равен $R^2 = 0,97$. Таким образом, среднее и максимальное значения динамической магнитострикционной чувствительности сталей хорошо коррелируют с величиной максимального удлинения исследованных сталей.

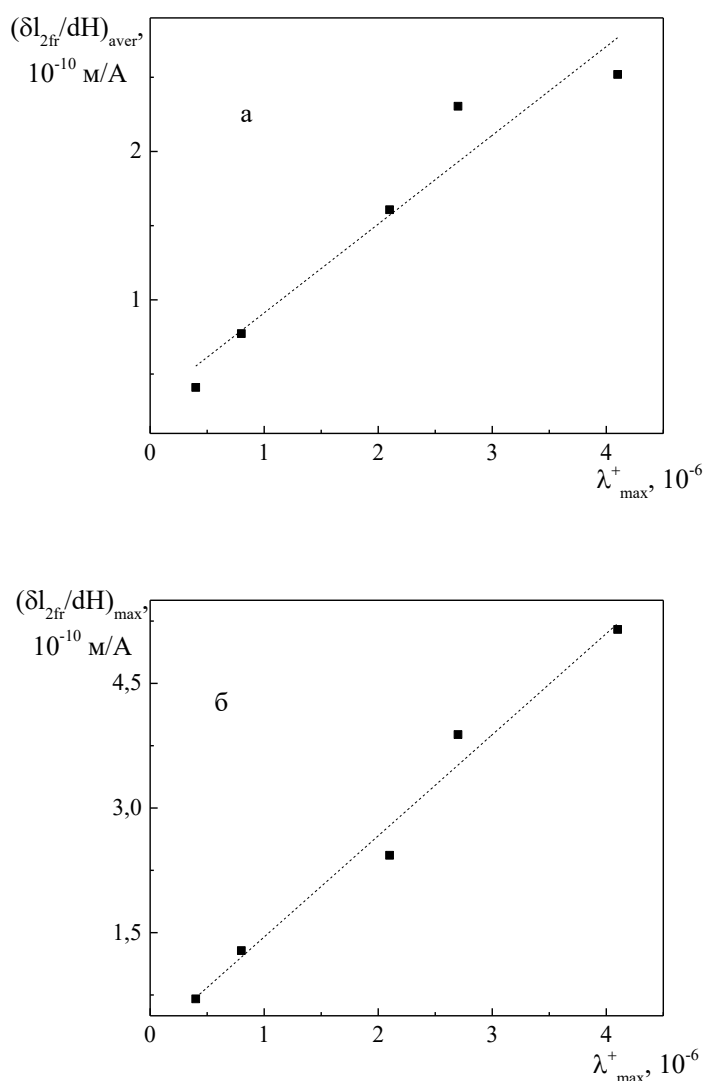


Рис. 4. Зависимости средней (а) и максимальной (б) динамической магнитострикционной чувствительности сталей от величины их положительного максимума магнитострикции

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», номер госрегистрации 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Костин, В. Н.** Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах / В. Н. Костин, Д. Ю. Филатенков, Ю. А. Чекакина, О. Н. Василенко, Е. Д. Сербин // Акустический журнал. – 2017. – V. 63. – P.209-216.
- 2 **Wang, P.** Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostriction EMAT and sound velocity / P. Wang, Y. Li, E. Yao, T. Chady, Y. Shi, F. Han // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Vol. 555, No. 7. – P.169375.
- 3 **Ghalamestani, S. G.** Magnetostriction and the advantages of using noncontact measurements / S. G. Ghalamestani, L. Vandeveld, J. J. J. Dirckx, J. A. A. Melkebeek // AIP Conference Proceedings. – 2010. – Vol. 1253, iss. 1. – P.171-175.
- 4 **Kostin, V. N.** Non-contact measurement of magnetostriction of ferromagnetic materials by laser interferometry and speckle interferometry / V. N. Kostin, E. D. Serbin, A. P. Vladimirov, E. A. Rogova // Procedia Structural Integrity. – 2023. – Vol. 50. – P.151-154.
- 5 **Bellesis, G. H.** Magnetostriction measurement by interferometry / G. H. Bellesis [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 1993. – Vol. 29, No. 6. – P.2989-2991.
- 6 Программа расчета магнитострикционной чувствительности ферромагнитных материалов –MgntstrSens”: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023660788 Рос. Федерация / Сербин Е. Д., ИФМ УрО РАН. – № 2023660258: заявл. 24.05.2023 : опубл. 24.05.2023.

Контакты:

perovadim22@gmail.com (Перов Вадим Николаевич)

serbin@imp.uran.ru (Сербин Евгений Дмитриевич)

kostin@imp.uran.ru (Костин Владимир Николаевич)