

**Received:** 30.10.2023

**Revised:** 13.12.2023

**Accepted:** 29.12.2023

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2023.6.121-131

## NON-CONTACT MEASUREMENT OF THE DYNAMIC MAGNETOSTRICTION PARAMETERS OF FERROMAGNETS

E. D. Serbin<sup>a), \*</sup>, V. N. Perov<sup>b)</sup>, and V. N. Kostin<sup>c)</sup>

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia*

<sup>a)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7767-2230>  [serbin@imp.uran.ru](mailto:serbin@imp.uran.ru);

<sup>b)</sup>  [perovadim22@gmail.com](mailto:perovadim22@gmail.com);

<sup>c)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4651-5002>  [kostin@imp.uran.ru](mailto:kostin@imp.uran.ru)

\*Corresponding author. E-mail: [serbin@imp.uran.ru](mailto:serbin@imp.uran.ru)

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia

Tel.: +7 (343) 378-3625

The magnitude of magnetostriction of a ferromagnetic material largely determines the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation and the intensity of magnetoacoustic emission, which are based on the application of alternating magnetic fields. This study shows that laser interferometry allows dynamic magnetostrictive behavior to be measured in an alternating magnetic field. Experiments reveal that dynamic magnetostrictive sensitivity determined from the amplitude of the second harmonic of elastic vibrations in ferromagnetic materials correlates with the value of the maximum magnetostrictive elongation of the studied ferromagnetic materials.

**Keywords:** ferromagnets, magnetostriction, dynamic magnetostrictive sensitivity, laser interferometry, non-contact measurements

### Acknowledgment

*The work was performed under a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of Russia (theme Diagnostics, No. 122021000030-1) and partially supported by the youth research project of the IMP UB RAS, No. M8-22.*

### Reference

1. Belov, K.P. *Magnitostriksionnye yavleniya i ikh tekhnicheskie prilozheniya* [Magnetostriction Phenomena and Their Technical Applications]. Nauka Publ., Moscow, 1987, 158 p. (In Russian).
2. Piotrowski, L., Chmielewski, M., and Augustyniak, B. On the correlation between magnetoacoustic emission and magnetostriction dependence on the applied magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, 410, 34–40. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.018.
3. Kostin, V.N., Guriev, M.A., Vasilenko, O.N., Filatenkov, D.Yu., and Smorodinskii, Ya.G. Amplitude-frequency characteristics of magnetoacoustic emission of heat-treated Fe alloys. *Physical Mesomechanics*, 2013, 16, 103–110. (In Russian).
4. Kostin, V.N., Filatenkov, D.Yu., Chekasina, Yu.A., Vasilenko, O.N., and Serbin, E.D. Features of excitation and detection of magnetoacoustic emission in ferromagnetic objects. *Physical Foundations of Technical Acoustics*, 2017, 63, 237–244. DOI: 10.1134/S1063771017010055.

5. Kostin, V.N., Serbin, E.D., and Vasilenko, O.N. The interrelationships of magnetic and magneto acoustic-emission characteristics of heat-treated steels of various chemical composition. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 145, 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/201814505005.
6. Wang, P., Li, Y., Yao, E., Chady, T., Shi, Y., and Han, F. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostriction EMAT and sound velocity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 555 (7), 169375. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169375.
7. Ren, W., Xu, K., and Zhou, P. Fast measurement of magnetostriction coefficients for silicon steel strips using magnetostriction-based EMAT. *Sensors*, 2018, 18 (12), 4495, 1–13. DOI: 10.3390/s18124495.
8. Sun, C.Z., Sinclair, A., and Filleter, T. Influence of magnetostriction induced by the periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducer (PPM EMAT) on steel. *Sensors*, 2021, 21, 7700. DOI: 10.3390/s21227700.
9. Chechernikov, V.I. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic Measurements]. Izdatelstvo Moskovskogo Universiteta, Moscow, 1969, 387 p. (In Russian).
10. Varghese, R., Viswan, R., Joshi, K., Seifikar, S., Zhou, Y., Schwartz, J., and Priya, S. Magnetostriction measurement in thin films using laser Doppler vibrometry. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, 363, 179–187. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.03.076.
11. Serbin, E.D. and Kostin, V.N. On the possibility of evaluating magnetostriction characteristics of bulk ferromagnets based on their magnetic properties. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, 55, 378–383. DOI: 10.1134/S1061830919050103.
12. Povolotskaya, A.M. and Mushnikov, A.N. Effect of plastic deformation on the magnetic parameters and magnetostriction of the 20GN steel. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 40, 359–364. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.04.048.
13. Salloum, E., Maloberti, O., Panier, S., Nesser, M., Klimczyk, P., and Fortin, J. Identification of magnetic induced strain of electrical steels using non-destructive acceleration measurement and inverse vibration modeling. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 492, 115806. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115806.
14. Dou, Y., Li, Y., Yue, S., Li, Y., and Zhu, J. Measurement of alternating and rotational magnetostrictions of non-oriented silicon steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, 571, 170566. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170566.
15. Ghalamestani, S.G., Vandeveld, L., Dirckx, J.J.J., Melkebeek, J.A.A. Magnetostriction and the advantages of using noncontact measurements. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1253 (1), 171–175. DOI: 10.1063/1.3455455.
16. Salazar, F., Bayón, A., and Chicharro, J.M. Measurement of magnetostriction coefficient  $\lambda_s$  by speckle photography. *Optics Communications*, 2009, 282 (4), 635–639. DOI: 10.1016/j.optcom.2008.10.052.
17. Vladimirov, A.P. Time-average dynamic speckle interferometry. *AIP Conf. Proc.*, 2014, 1600, 237–242. DOI: 10.1063/1.4879588.
18. Kostin, V.N., Serbin, E.D., Vladimirov, A.P., and Rogova, E.A. Non-contact measurement of magnetostriction of ferromagnetic materials by laser interferometry and speckle interferometry. *Procedia Structural Integrity*, 2023, 50, 151–154. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.10.035.
19. Bellesis, G.H., Harlee, P.S., Renema, A., Lambeth, D.N. Magnetostriction measurement by interferometry. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993, 29 (6), 2989–2991. DOI: 10.1109/20.281096.
20. Kim, M.H., Lee, K.S., and Lim, S.H. Magnetostriction measurements of metallic glass ribbon by fiber-optic Mach–Zehnder interferometry. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 191 (1–2), 107–112.
21. Samata, H., Nagata, Y., Uchida, T., and Abe, S. New optical technique for bulk magnetostriction measurement. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 212, 355–360. DOI: 10.1016/S0304-8853(99)00832-X.

22. Siebert, S., Kajiwara, C., Fujiwara, K., and Klimczyk, P. Establishment of the standard method of magnetostriction measurement of grain-oriented electrical steel strip and sheet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, 565, 170295. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.170295.
23. Muravyev, V.V., Volkova, L.V., Platunov, A.V., and Kulikov, V.A. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, 52, 370–376. DOI: 10.1134/S1061830916070044.
24. Muravyev, V.V., Muravyeva, O.V., and Petrov, K.V. Contactless electromagnetic acoustic techniques of diagnostics and assessment of mechanical properties of steel rolled bars. *Materials Physics and Mechanics*, 2018, 38 (1), 48–53. DOI: 10.18720/MPM.3812018\_7.
25. Serbin, E.D., Kostin, V.N., Vasilenko, O.N., Ksenofontov, D.G., Gerasimov, E.G., Terentyev, P.B. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state. *NDT&E International*, 2020, 116 (7), 102330. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330.
26. Kostin, V.N. Irreversible remagnetization of polycrystalline ferromagnets on the asymmetric hysteresis loops and its use in nondestructive testing. *Defektoskopiya*, 1989, 9, 68–76. (In Russian).
27. Serbin, E.D. Program for calculating the magnetostrictive sensitivity of ferromagnetic materials “MgntstrSens”, R.F. Certificate of State Registration 2023660788. (In Russian).
28. Vonsovsky, S.V. and Shur, Ya.S. *Ferromagnetizm* [Ferromagnetism]. Gostekhizdat Publ., Moscow–Leningrad, 1948, 816 p. (In Russian).
29. Bozorth R. *Ferromagnetism*, Wiley-IEEE Press, NJ, 1993, 992 p.

Подана в журнал: 30.10.2023  
УДК 620.179.14  
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.121-131

## БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Е. Д. Сербин<sup>а),\*</sup>, В. Н. Перов<sup>б)</sup>, В. Н. Костин<sup>в)</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия*

<sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7767-2230>  [serbin@imp.uran.ru](mailto:serbin@imp.uran.ru);

<sup>б)</sup>  [perovadim22@gmail.com](mailto:perovadim22@gmail.com);

<sup>в)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4651-5002>  [kostin@imp.uran.ru](mailto:kostin@imp.uran.ru)

\*Ответственный автор. Электронная почта: [serbin@imp.uran.ru](mailto:serbin@imp.uran.ru)  
Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108, Россия  
Тел.: +7 (343) 378-36-25

Величина магнитострикции ферромагнитного материала в существенной степени определяет эффективность электромагнитно-акустического преобразования и интенсивность магнитоакустической эмиссии, которые основаны на приложении переменных магнитных полей. В данной работе показано, что в переменном магнитном поле возможно измерение динамических магнитострикционных характеристик с помощью лазерной интерферометрии. Экспериментально установлено, что определяемая по амплитуде второй гармоники упругих колебаний ферромагнетиков динамическая магнитострикционная чувствительность коррелирует с величиной максимального магнитострикционного удлинения исследованных ферромагнитных материалов.

**Ключевые слова:** ферромагнетики, магнитострикция, динамическая магнитострикционная чувствительность, лазерная интерферометрия, бесконтактные измерения

### 1. Введение

Измерение магнитострикции и магнитострикционных характеристик ферромагнетиков не теряет своей актуальности. В частности, магнитострикция определяет шумовые характеристики магнитопроводов и уровень удельных потерь на перемагничивание [1]. Кроме того, магнитострикция существенным образом определяет уровень сигнала магнитоакустической эмиссии [2–5] и эффективность электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) [6–8] в ферромагнитном материале. Методы измерения магнитострикции можно разделить на прямые и косвенные, когда измеряется непосредственно деформация материала, либо когда проводятся косвенные измерения какого-либо другого физического свойства, зависящего от деформации [1–11]. Широко распространены контактные методики измерения магнитострикции с помощью тензорезисторов [12–14], однако бесконтактные методики более устойчивы к влиянию температуры и магнитного поля, а также могут проводиться с большей скоростью [15]. Примером таких методик могут быть лазерная интерферометрия [15], спекл-интерферометрия [16–18] и интерферометрия с применением оптоволоконных решеток Брэгга [19, 20].

Подавляющее большинство существующих работ направлено на развитие измерений магнитострикционных характеристик электротехнических и трансформаторных сталей [6, 9, 15, 21], а также тонких ферромагнитных пленок [19–22], обладающих высокой магнитострикцией. Однако в связи с развитием электромагнитно-акустической дефектоскопии [8, 23, 24] все

более актуальным становится определение магнитоэлектрических характеристик реальных ферромагнитных объектов (стальные трубы, рельсы и т. д.). Кроме того, бесконтактное измерение малых упругих колебаний необходимо для практического применения спектральных параметров магнитоакустической эмиссии при структурографии ферромагнитных объектов [2–5, 25]. Поскольку электромагнитно-акустическое преобразование и возбуждение магнитоакустической эмиссии требуют воздействия на испытываемые объекты переменного или импульсного магнитного поля, а также зачастую неоднородных магнитных полей, то наибольший интерес представляет определение возможности бесконтактного измерения динамических магнитоэлектрических характеристик материалов и объектов, что является целью настоящей работы.

## 2. Образцы и методика измерений

Для отработки методики бесконтактных измерений магнитоэлектрических параметров были выбраны образцы ферромагнитных материалов с различными магнитными и магнитоэлектрическими характеристиками. Конечные размеры всех образцов после шлифования с малой подачей круга составили  $3,8 \times 6,1 \times 86,2$  мм. Торцевые поверхности образцов дополнительно не обрабатывались.

Таблица

Магнитные свойства исследуемых образцов

Материал	$H_C$ , А/м	$M_S$ , А/см	$\mu_a$	$\mu_{max}$	$b_0$ , м/А	$\lambda_{max}^+$ , $10^{-6}$	$\lambda_S$ , $10^{-6}$
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 C-500 производства фирмы Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Германия (<http://www.magnet-physik.de/1.html>). Максимальная величина намагничивающего поля равнялась 50 кА/м. Погрешность измерения намагниченности не превышала 2 %, а погрешность измерения поля – 1 %. Параметры предельной петли гистерезиса и магнитные свойства образцов, характеризующие динамику процессов их намагничивания, приведены в таблице, где  $H_C$  – коэрцитивная сила;  $M_S$  – намагниченность насыщения;  $\mu_a$  – начальная магнитная проницаемость;  $\mu_{max}$  – максимальная магнитная проницаемость;  $b_0$  – коэффициент Рэлея вблизи размагниченного состояния [26].

Измерение полевых зависимостей магнитоэлектричества  $\lambda(H)$  выполнено в однородном квазистатически изменяющемся магнитном поле соленоида посредством выносного индукционного датчика. Погрешность измерения величины  $\lambda$  не превышала 10 %. В таблице приведены значения магнитоэлектрических параметров  $\lambda_{max}^+$  (максимум относительной величины удлинения образца) и  $\lambda_S$  (магнитоэлектричество насыщения) исследованных образцов.

Для измерения возникающих при перемагничивании упругих колебаний образцы закреплялись в специально изготовленном держателе из дюралюминия, позволяющем зажимать образцы с боковых поверхностей винтами с упором одной из торцевых поверхностей образца. Держатель образца помещался в соленоид с исключением механического контакта между держателем и стенками соленоида. Бесконтактное измерение магнитоэлектрического изменения размеров образцов производилось с помощью лазерного сканирующего виброметра

PSV-500-HV (Polytec GmbH, Германия), реализующего схему интерферометра Маха – Цандера. 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. Количество линий Фурье-спектра – 6400, частота дискретизации – 250 Гц, разрешение по частоте – 15,6 мГц. Общий вид основных компонентов измерительной установки приведен на рис. 1.

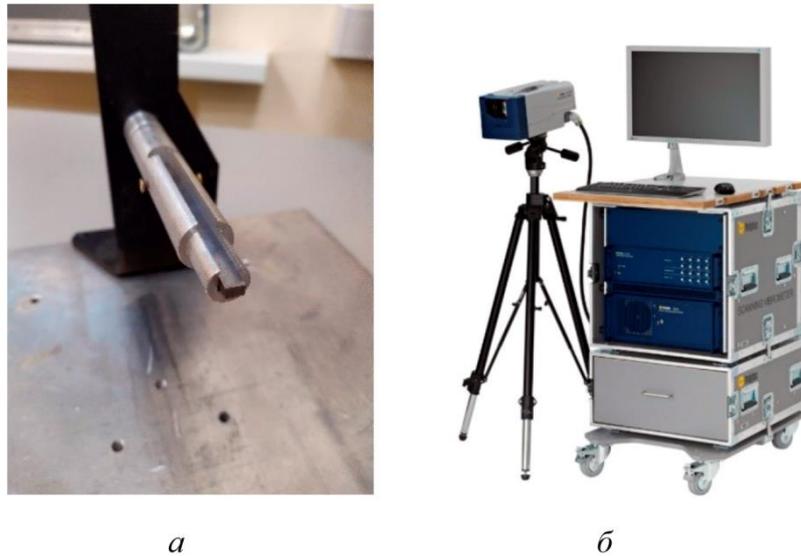


Рис. 1. Основные компоненты измерительной установки: держатель образца (*a*); сканирующий лазерный виброметр PSV-500-HV (*б*)

Область однородного поля в соленоиде была не более 0,5 см, т. е. измерения проводились в неоднородном поле. Переменное магнитное поле  $H_T$  соленоида изменялось по синусоидальному закону с частотой  $f_T = 4,5$  Гц. Выбор частоты поля был обусловлен необходимостью получения наибольшей амплитуды магнитострикционных колебаний [4]. Кроме того, данная частота лежит вне зашумленных областей спектра (см. рис. 2). Представленные на рис. 2 спектры колебаний двух различных образцов показывают, что магнитострикционное изменение размеров ферромагнетиков на частоте 9 Гц во много раз превосходит по величине амплитуду колебаний, вызванных пондеромоторным эффектом, которые регистрируются на частоте переменного поля 4,5 Гц. В области 5 Гц присутствуют низкочастотные шумы, которые, судя по их изменению в течение суток, являются колебаниями несущих конструкций здания, принимаемыми штативом виброметра и станиной установки. Тем не менее, амплитуда шумовых колебаний при проведении измерений не превышала 3 % от амплитуды информативного сигнала, а на частотах 4,5 и 9 Гц амплитуда шума была близка к нулю.

Поскольку ранее в работах [3, 4, 18] было показано, что в переменном поле изменение линейных размеров образца на удвоенной частоте перемангничивающего поля связано с магнитострикционным изменением размеров, то в настоящей работе относительная амплитуда колебаний длины ( $\delta l_{2f_T}$ ) на второй гармонике поля (т. е. на частоте 9 Гц) была принята в качестве основной динамической магнитострикционной характеристики образцов.

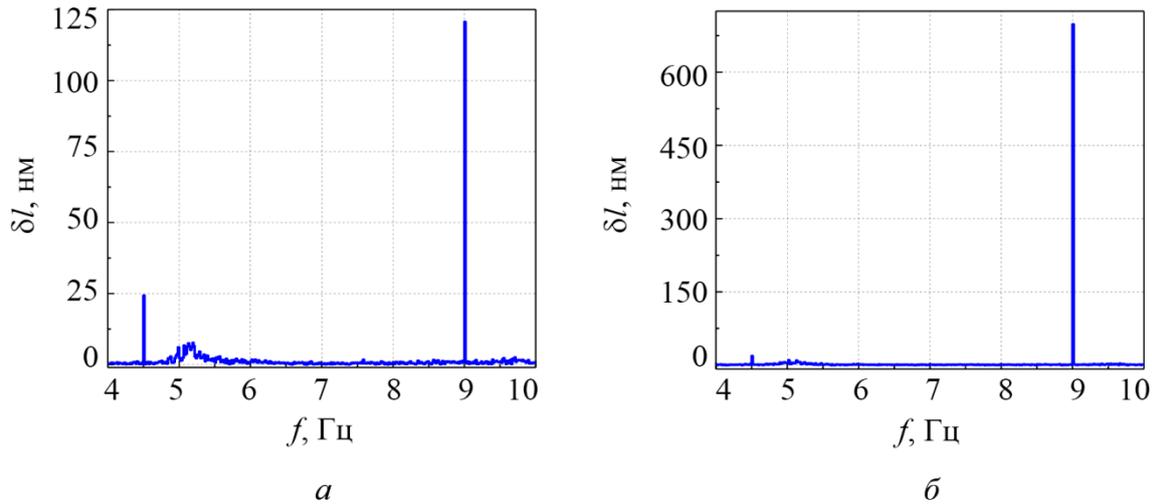


Рис. 2. Спектры колебаний линейных размеров ферромагнетиков в переменном магнитном поле: сталь 30ХГСА (а); никель (б)

Значения средней  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{avg}$  (см. рис. 3 а) и максимальной  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{max}$  (рис. 3 б) динамических магнитострикционных чувствительностей были рассчитаны с помощью программы MngtstrSens [27] по полевым зависимостям магнитострикции, измеренным с помощью лазерного сканирующего вибрметра PSV-500-HV. Программа MngtstrSens позволяет рассчитывать максимальное и среднее значения магнитострикционной чувствительности по полевым зависимостям магнитострикции посредством построения касательных с максимальным наклоном и через начало координат соответственно. При расчете динамической магнитострикционной чувствительности в качестве значений магнитострикции выступает амплитуда гармоники с частотой, равной удвоенной частоте перемагничивания ( $\delta l_{2fr}$ ).

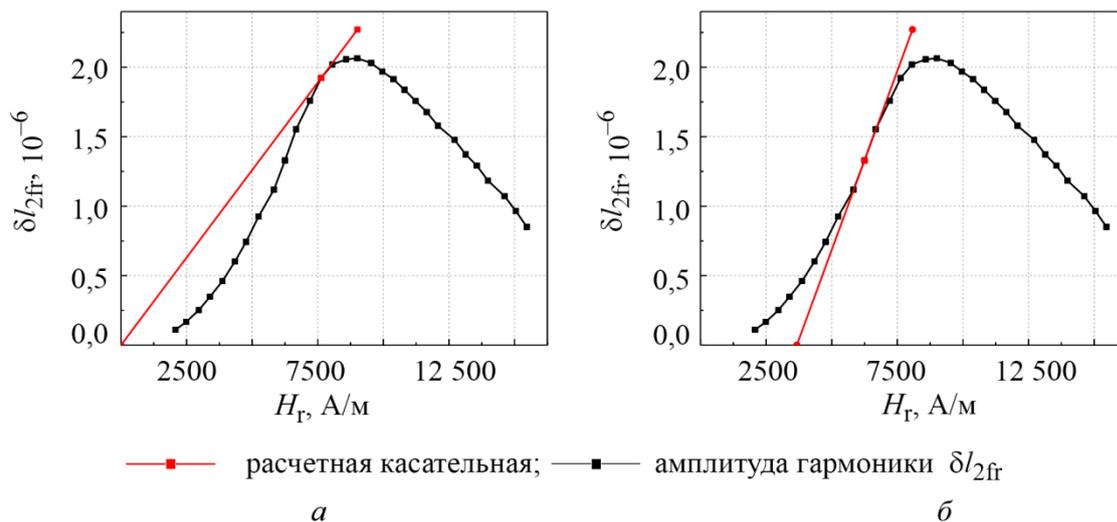


Рис. 3. К определению средней (а) и максимальной (б) динамической магнитострикционной чувствительности (на примере Армко-Fe)

### 3. Экспериментальные результаты и их интерпретация

На рис. 4 а представлены полевые зависимости магнитострикции пермендюра и никеля, измеренные методом выносного индукционного датчика, а на рис. 4 б – зависимости амплитуды изменения размеров образцов  $\delta l_{2fr}$  от амплитуды переменного поля  $H_r$ . Как следует

из рис. 4 *a*, полевые зависимости статической магнитострикции этих материалов согласуются с известными данными [28, 29].

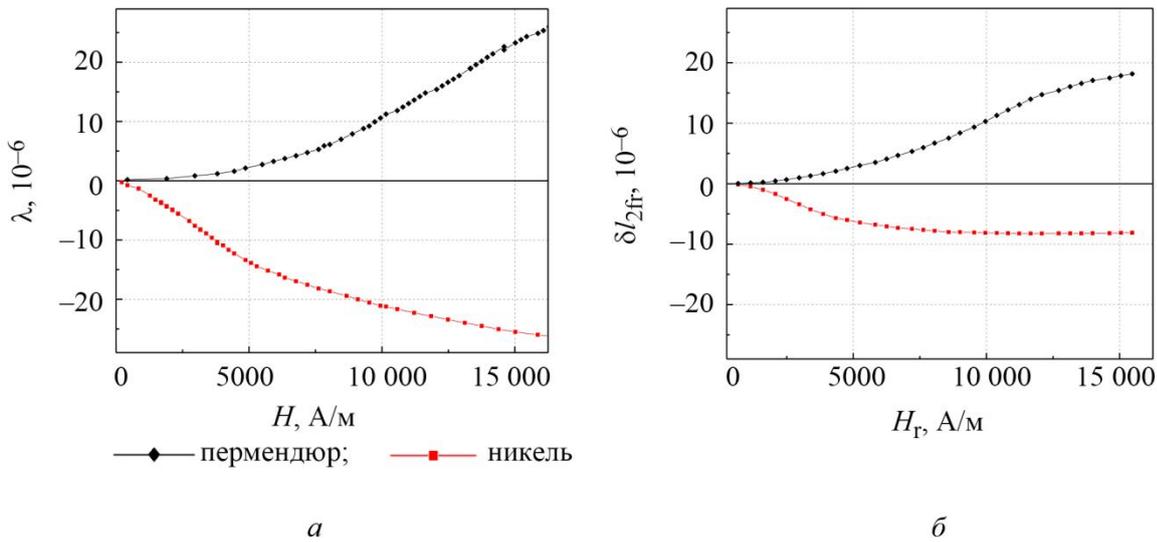


Рис. 4. Полевые зависимости статической магнитострикции  $\lambda$  пермендюра и никеля, измеренные посредством выносного индукционного датчика (*a*), и полевые зависимости амплитуды изменения размеров образцов  $\delta l_{2fr}$ , измеренные с помощью лазерного виброметра (*б*)

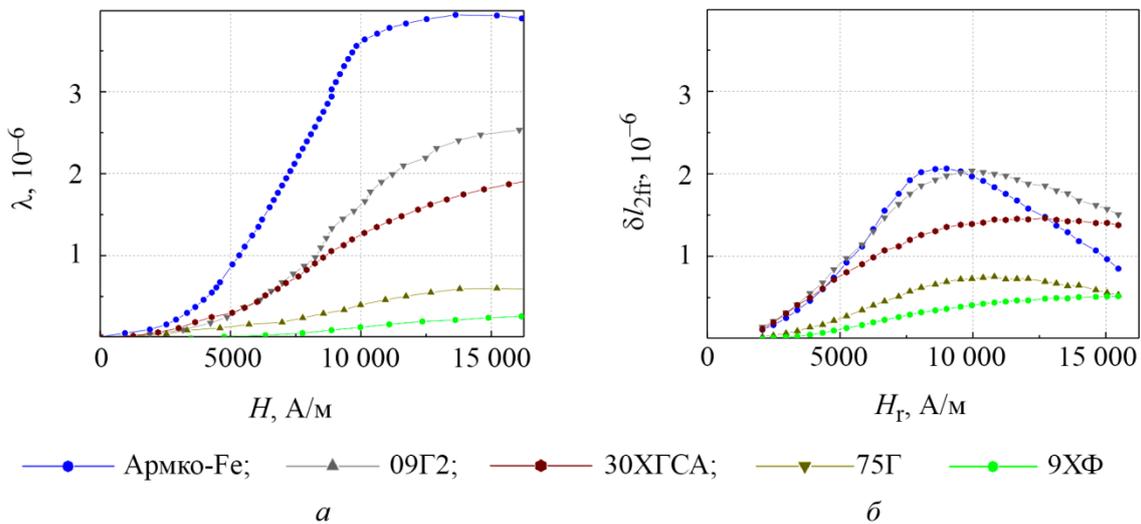


Рис. 5. Полевые зависимости статической магнитострикции  $\lambda$  сталей различного химического состава, измеренные посредством выносного индукционного датчика (*a*), и полевые зависимости амплитуды изменения размеров образцов  $\delta l_{2fr}$ , измеренные с помощью лазерного виброметра (*б*)

Для пермендюра величина  $\delta l_{2fr}$  растет при увеличении амплитуды перемагничивающего поля до  $H_r \approx 10000$  А/м, причем  $\delta l_{2fr}$  и  $\lambda$  близки по величине для одинаковых значений квазистатического и переменного полей. То есть величины  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{avg}$  и  $d\lambda/dH$  ведут себя одинаково. Однако при полях  $H_r > 10000$  А/м рост величины  $\delta l_{2fr}$  начинает отставать от роста  $\lambda$ .

Уменьшение длины образца из никеля в переменном поле сразу отстает по величине от уменьшения  $\lambda$  в квазистатическом поле, а в поле  $H_r \approx 8000$  А/м зависимость  $\delta l_{2fr}(H_r)$  выходит на насыщение. Максимальное значение  $\delta l_{2fr}$  не превышает 30 % от величины  $\lambda_s$  никеля.

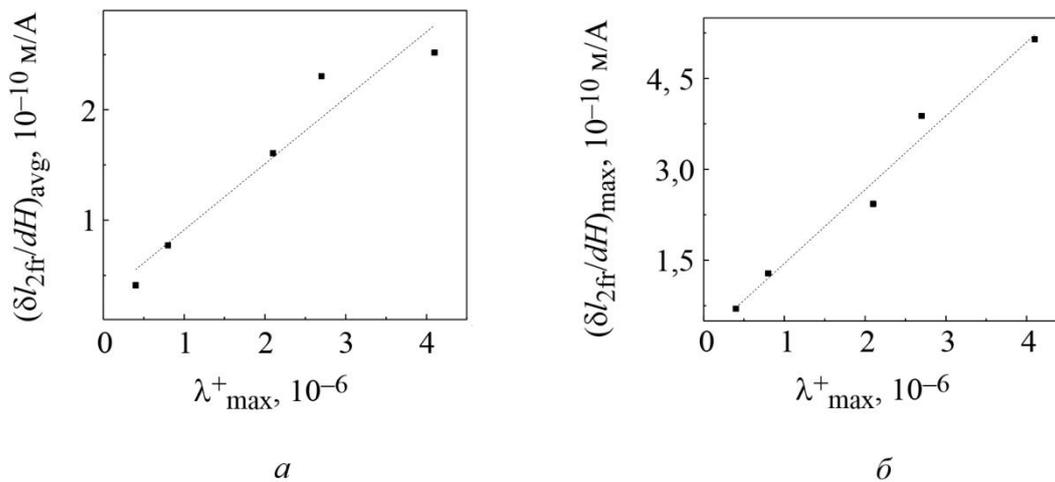


Рис. 6. Зависимости средней (а) и максимальной (б) динамической магнитострикционной чувствительности сталей от величины их положительного максимума магнитострикции

На рис. 5 приведены зависимости  $\lambda(H)$  и  $\delta l_{2fr}(H_r)$  для ряда сталей различного химического состава. Можно увидеть, что при росте полей  $H$  и  $H_r$  до значений порядка 7000 А/м величина  $\delta l_{2fr}$  превосходит величину  $\lambda$  для всех сталей, а для Армко-Fe эти величины сопоставимы. При дальнейшем увеличении амплитуды  $H_r$  рост величины  $\delta l_{2fr}$  резко замедляется для всех сталей. При  $H_r > 12000$  А/м величина  $\delta l_{2fr}$  снижается для всех материалов, кроме стали 9ХФ.

Определенные в соответствии с рис. 3 зависимости средней  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{avg}$  (а) и максимальной  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{max}$  (б) динамической магнитострикционной чувствительности сталей от величины их положительного максимума магнитострикции (таблица) представлены на рис. 6. Квадрат коэффициента линейной корреляции величин  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{avg}$  и  $\lambda_{max}^+$  равен  $R^2 = 0,91$ , а для величин  $(\delta l_{2fr}/dH_r)_{max}$  и  $\lambda_{max}^+$  следует  $R^2 = 0,97$ . Таким образом, среднее и максимальное значения динамической магнитострикционной чувствительности сталей хорошо коррелируют с величиной максимального удлинения исследованных сталей.

Как видно из рис. 5 и 6, 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  $\lambda$ . В наибольшей степени это характерно для материалов с высокой магнитной восприимчивостью (пермендюр, никель, Армко-Fe). Поэтому логично связать такое поведение величины  $\delta l_{2fr}/dH_r$  со скин-эффектом, когда промагничивается не все сечение образца. Второй возможной причиной может быть использование неоднородного переменного поля, когда поле на концах образца существенно меньше, чем поле в центре, и это различие должно увеличиваться по мере роста намагниченности [7].

#### 4. Заключение

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.

## Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», номер госрегистрации 122021000030-1) при частичной поддержке молодежного научного проекта ИФМ УрО РАН № М8-22.*

## Литература

1. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М. : Наука, 1987. – 160 с.
2. Piotrowski L., Chmielewski M., Augustyniak B. On the correlation between magnetoacoustic emission and magnetostriction dependence on the applied magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 410. – P. 34–40. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.018.
3. Амплитудно-частотные характеристики магнитоакустической эмиссии термообработанных сплавов железа / В. Н. Костин, М. А. Гурьев, О. Н. Василенко, Д. Ю. Филатенков, Я. Г. Смородинский // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – С. 103–110.
4. Features of excitation and detection of magnetoacoustic emission in ferromagnetic objects / V. N. Kostin, D. Yu. Filatenkov, Yu. A. Chekasina, O. N. Vasilenko, E. D. Serbin // Physical Foundations of Technical Acoustics. – 2017. – Vol. 63. – P. 237–244. – DOI: 10.1134/S1063771017010055.
5. Kostin V. N., Serbin E. D., Vasilenko O. N. The interrelationships of magnetic and magnetoacoustic-emission characteristics of heat-treated steels of various chemical composition // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 145. – P. 1–7. – DOI: 10.1051/mateconf/201814505005.
6. 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. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169375.
7. Ren W., Xu K., Zhou P. Fast measurement of magnetostriction coefficients for silicon steel strips using magnetostriction-based EMAT // Sensors. – 2018. – No. 18 (12). – P. 4495. – DOI: 10.3390/s18124495.
8. Sun C. Z., Sinclair A., Filleter T. Influence of magnetostriction induced by the periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducer (PPM EMAT) on steel // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 7700. – DOI: 10.3390/s21227700.
9. Чечерников В. И. Магнитные измерения. – М. : Изд-во МГУ, 1969. – 387 с.
10. Magnetostriction measurement in thin films using laser Doppler vibrometry / R. Varghese, R. Viswan, K. Joshi, S. Seifikar, Y. Zhou, J. Schwartz, S. Priya // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014. – Vol. 363. – P. 179–187. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.03.076.
11. Serbin E. D., Kostin V. N. On the possibility of evaluating magnetostriction characteristics of bulk ferromagnets based on their magnetic properties // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55. – P. 378–383. – DOI: 10.1134/S1061830919050103.
12. Povolotskaya A. M., Mushnikov A. N. Effect of plastic deformation on the magnetic parameters and magnetostriction of the 20GN steel // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 40. – P. 359–364. – DOI: 10.1016/j.prostr.2022.04.048.
13. Identification of magnetic induced strain of electrical steels using non-destructive acceleration measurement and inverse vibration modeling / E. Salloum, O. Maloberti, S. Panier, M. Nesser, P. Klimczyk, J. Fortin // Journal of Sound and Vibration. – 2021. – Vol. 492. – P. 115806. – DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115806.
14. Measurement of alternating and rotational magnetostrictions of non-oriented silicon steel sheets / Y. Dou, Y. Li, S. Yue, Y. Li, J. Zhu // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – Vol. 571. – P. 170566. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170566.

15. 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. – DOI: 10.1063/1.3455455.
16. Salazar F., Bayón A., Chicharro J. M. Measurement of magnetostriction coefficient  $\lambda_s$  by speckle photography // Optics Communications. – 2009. – Vol. 282 (4). – P. 635–639. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170566.
17. Vladimirov A. P. Time-average dynamic speckle interferometry // AIP Conf. Proc. – 2014. – Vol. 1600. – P. 237–242. – DOI: 10.1063/1.4879588.
18. 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. – DOI: 10.1016/j.prostr.2023.10.035.
19. Magnetostriction measurement by interferometry / G. H. Bellesis, P. S. Harlee, A. Renema, D. N. Lambeth // IEEE Transactions on Magnetics. – 1993. – Vol. 29, No. 6. – P. 2989–2991. – DOI: 10.1109/20.281096.
20. Kim M. H., Lee K. S., Lim S. H. Magnetostriction measurements of metallic glass ribbon by fiber-optic Mach–Zehnder interferometry // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – 191. – P. 107–112.
21. New optical technique for bulk magnetostriction measurement / H. Samata, Y. Nagata, T. Uchida, S. Abe // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2000. – 212 (3). – P. 355–360. – DOI: 10.1016/S0304-8853(99)00832-X.
22. Establishment of the standard method of magnetostriction measurement of grain-oriented electrical steel strip and sheet / S. Siebert, C. Kajiwara, K. Fujiwara, P. Klimczyk // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – Vol. 565. – P. 170295. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.170295.
23. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails / V. V. Muravyev, L. V. Volkova, A. V. Platunov, V. A. Kulikov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52. – P. 370–376. – DOI: 10.1134/S1061830916070044.
24. Muravyev V. V., Muravyeva O. V., Petrov K. V. Contactless electromagnetic acoustic techniques of diagnostics and assessment of mechanical properties of steel rolled bars // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Vol. 38 (1). – P. 48–53. – DOI: 10.18720/MPM.3812018\_7.
25. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state / E. D. Serbin, V. N. Kostin, O. N. Vasilenko, D. G. Ksenofontov, E. G. Gerasimov, P. B. Terentyev // NDT&E International. – 2020. – Vol. 116 (7). – P. 102330. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102330.
26. Костин В. Н. Необратимое перемагничивание поликристаллических ферромагнетиков по несимметричным петлям гистерезиса и его использование в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. – 1989. – № 9. – С. 68–76.
27. Программа расчета магнитоэстроичной 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.
28. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. – Москва–Ленинград : Гостехиздат, 1948. – 816 с.
29. Бозорт Р. М. Ферромагнетизм. – М. : Изд-во иностр. лит., 1956. – 784 с.