

# О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕМНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПО ИХ МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ

© 2019 г. Е.Д. Сербин<sup>1,2,\*\*</sup>, В.Н. Костин<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mail: \*kostin@imp.uran.ru; \*\*serbin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 13.03.2019; после доработки 28.03.2019;  
принята к публикации 03.04.2019

На основе экспериментальных исследований установлена взаимосвязь критических полей, определяемых формой кривой намагничивания и предельной петли гистерезиса объемных образцов железоуглеродистых сплавов, с величиной положительного максимума их магнитострикции. При вариации температуры отжига холоднодеформированной стали 20Г показано, что исследуемые критические поля имеют значительно большую чувствительность к изменению напряженно-деформированного состояния, чем известные коэрцитивная сила и остаточная индукция.

*Ключевые слова:* магнитострикция, форма петли гистерезиса, критическое поле, коэрцитивная сила, остаточная индукция, напряженно-деформированное состояние.

DOI: 10.1134/S013030821905004X

## ВВЕДЕНИЕ

Характерная для обычных ферромагнетиков линейная магнитострикция, то есть изменение размеров ферромагнетиков вдоль направления магнитного поля, как физическое явление известна давно и достаточно хорошо изучена [1—4]. Однако экспериментальное определение величины магнитострикции остается чрезвычайно важной проблемой, поскольку многие магнитные [1—3], магнитоупругие [4—8] и магнитоакустические [9—14] параметры диагностики ферромагнитных материалов зависят как от величины магнитострикции, так и от характера ее изменения при воздействии магнитного поля, напряжений [15], температуры и других факторов.

Известный и широко используемый параметр магнитной структуроскопии — коэрцитивная сила  $H_c$  — напрямую зависит от магнитострикции [1—3]. В «теории напряжений» Кондорского [1], когда на процессы перемагничивания влияют преимущественно внутренние напряжения, теоретическое выражение для коэрцитивной силы выглядит следующим образом:

$$H_c \approx \frac{\lambda_s \Delta\sigma}{2\mu_0 M_s l}, \quad (1)$$

где  $\lambda_s$  — магнитострикция насыщения;  $M_s$  — намагниченность насыщения;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\Delta\sigma$  — амплитуда внутренних напряжений;  $\delta$  — толщина междоменной границы;  $l$  — период изменения внутренних напряжений.

В работах [5—21] показаны взаимосвязи магнитных, магнитострикционных и магнитоакустических характеристик, а также их связь со структурно-фазовым состоянием различных ферромагнетиков. Исследование таких взаимосвязей позволяет предлагать новые способы диагностики ферромагнитных материалов и изделий.

Поскольку магнитострикция конструкционных сталей имеет величину порядка  $10^{-6}$ , а ее изменение известными методами весьма трудоемко [22], с научной и практической точек зрения представляет интерес разработка косвенных методов измерения (оценки) магнитострикции (см., напр., [23]).

В работах [24, 25] для тонких ферромагнитных пленок была предложена магнитометрическая методика измерения магнитострикции. В основе методики лежит измерение изменения поля анизотропии ( $\Delta H_a$ ) при приложении механических напряжений. Образцы в виде вырезанных из пленок кругов диаметром 150—200 мм перемагничиваются внешним синусоидальным магнитным полем с частотой 10 Гц и максимальным значением поля 8 кА/м. Тонкая пленка изгибается вдоль оси трудного намагничивания. Создаваемая при этом деформация имеет порядок  $10^{-4}$ . Поле эффективной магнитной анизотропии  $H_a$  определяется путем построения касательных к петлям гистерезиса

зиса образцов с различными степенями деформаций, как показано на рис. 1. Величина магнитострикции определяется с помощью выражения

$$\lambda \approx \frac{\Delta H_a \cdot M_s}{E \cdot \varepsilon}, \quad (2)$$

где  $\Delta H_a$  — изменение поля анизотропии под действием упругой деформации;  $M_s$  — намагниченность насыщения;  $E$  — модуль Юнга;  $\varepsilon$  — деформация пленки.

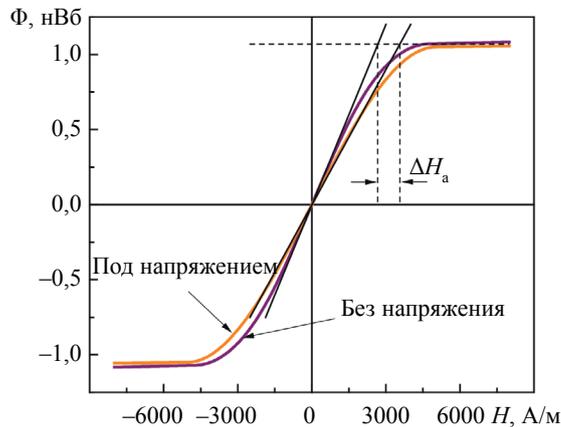


Рис. 1. Приращение поля анизотропии  $H_a$  под действием упругих деформаций.

Для пленочных образцов описанная методика дает достаточно хорошие результаты. Однако для объемных ферромагнетиков приложение упругих напряжений, влекущих существенные изменения гистерезисных характеристик, весьма затруднено. Между тем использование формы петли гистерезиса для оценки магнитострикционных характеристик ферромагнетиков представляется достаточно перспективным. При этом особое внимание следует обратить на характеристики, связанные с преобладающими смещениями 90-градусных доменных границ [1—3]. Таким образом, задачей настоящей работы является определение взаимосвязи формы кривых намагничивания и петель гистерезиса с магнитострикцией объемных образцов из сплавов железо—углерод различного химического состава, а также определение возможности магнитометрического определения их магнитострикционных характеристик.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Для сопоставления магнитных и магнитострикционных характеристик были выбраны образцы отожженных при 850 °С сплавов железо—углерод различного состава. После шлифования размеры образцов составили 3,8×6,1×86,2 мм. На холоднотемпературных ( $\varepsilon = 40\%$  по изменению сечения) и отожженных при различных температурах образцах из стали 20Г (размеры 4×10,2×69 мм) исследовалось влияние изменения напряженно-деформированного состояния на «стрикционно-чувствительные» магнитные параметры. Химический состав исследованных образцов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованных образцов, %

№	Сплав	C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo
1	Fe-Армко	0,02	—	0,05	0,035	—	—
2	09Г2	0,11	0,06	0,34	1,7	—	0,008
3	30ХГСА	0,34	1,03	1,15	1,0	—	—
4	75Г	0,73	0,08	0,21	0,81	—	—
5	9ХФ	0,81	1,21	0,25	0,47	0,49	—
6	20Г	0,21	0,3	0,27	1,0	0,3	—

Магнитные свойства вещества [1—3, 22] всех исследованных образцов были измерены в замкнутой цепи (пермеаметр) с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500 производства фирмы Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Германия (<http://www.magnet-physik.de/1.html>). Погрешность измерения намагниченности не превышала 2 %, погрешность измерения поля — 1 %. Полевые зависимости магнитострикции были измерены при помощи выносного индуктивного преобразователя линейных перемещений с погрешностью не более 10 %.

По аналогии с указанной на рис. 1 методикой, критическое поле  $H_k^c$  определяли путем построения касательных к экспериментально определенной (измеренной) кривой намагничивания от нулевого и от максимального полей, как абсциссу их пересечения.

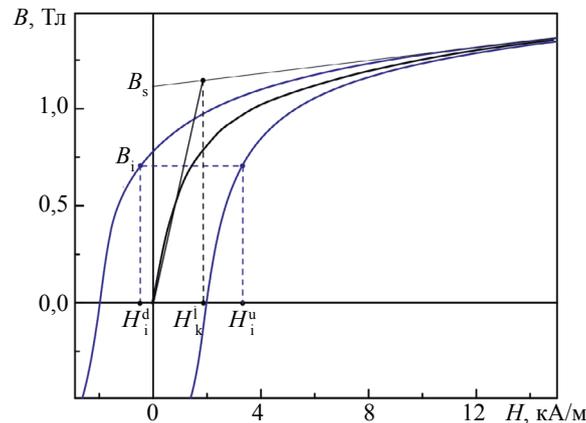


Рис. 2. К пояснению методики определения критического поля  $H_k^1$  по расчетной «кривой намагничивания».

Учитывая сложности качественного размагничивания объемных ферромагнитных тел и с целью выявления практически реализуемой методики магнитометрической оценки магнитострикционных параметров, дополнительно определяли критическое поле  $H_k^1$ , величина которого определяется формой предельной петли гистерезиса. Для этого была использована методика, аналогичная методике построения «безгистерезисной кривой намагничивания» [26]. Для определения поля  $H_k^1$  (рис. 2) для каждого фиксированного значения магнитной индукции  $B_i$  определяли соответствующие ей поля для нисходящей  $H_i^d$  и восходящей  $H_i^u$  ветвей петли гистерезиса. Находя между этими полями среднее и ставя ему в соответствие значение индукции  $B_i$ , получали точку на расчетной «кривой намагничивания». Построив, как указано на рис. 2, касательные к этой расчетной кривой определяли значение  $H_k^1$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3а представлены начальные участки полевых зависимостей магнитострикции отожженных сплавов Fe—C. Видно, что при одинаковом отжиге различие в химическом составе обусловило

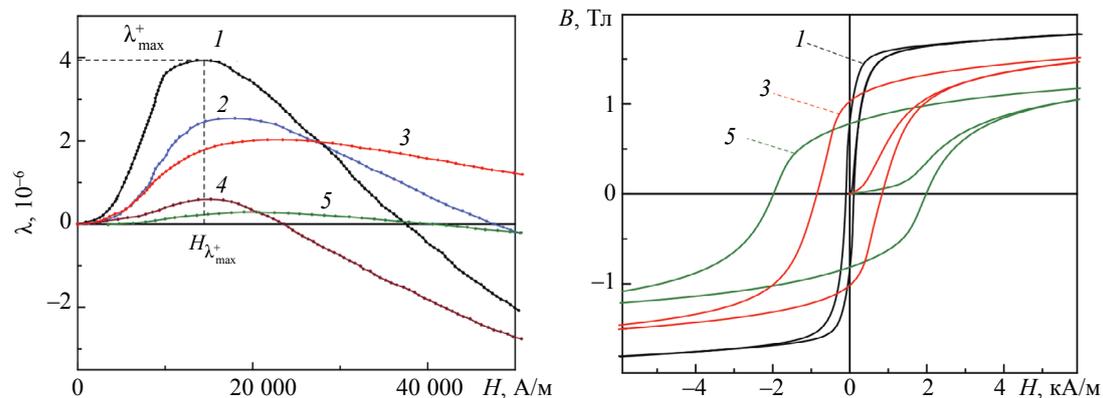


Рис. 3. Начальные участки полевых зависимостей магнитострикции (а), а также кривые намагничивания и предельные петли гистерезиса (б) отожженных сплавов Fe—C (номера кривых соответствуют номерам сплавов в табл. 1).

Магнитострикционные и магнитные характеристики образцов из сплавов железо—углерод

№ сплава	$\lambda_s, 10^{-6}$	$\lambda_{\max}^+, 10^{-6}$	$H_{\lambda_{\max}^+}, \text{А/м}$	$H_k^c, \text{кА/м}$	$H_k^1, \text{кА/м}$
1	-11,5	3,94	13630	0,664	0,221
2	-4,4	2,55	17980	1,171	0,484
3	-1,0	2,03	22560	3,189	1,307
4	-6,6	0,60	15220	3,531	1,021
5	-1,8	0,29	19010	7,167	1,725

значительное различие магнитострикционных характеристик. Магнитные свойства образцов также значительно отличаются (рис. 3б). Численные значения магнитострикционных характеристик и предполагаемых «стрикционно-чувствительных» магнитных параметров приведены в табл. 2.

Представленные в табл. 2 (номера сплавов соответствуют номерам табл. 1) результаты показывают, что магнитострикция насыщения  $\lambda_s$ , а также поле  $H_{\lambda_{\max}^+}$ , соответствующее максимальному положительному значению магнитострикции, не коррелируют с содержанием углерода. Вместе с тем величина положительного максимума магнитострикции  $\lambda_{\max}^+$  при увеличении содержания углерода уменьшается более, чем в 10 раз, а магнитные параметры  $H_k^c$  и  $H_k^1$  монотонно возрастают.

На рис. 4 приведены зависимости величины  $\lambda_{\max}^+$  от критических полей  $H_k^c$  и  $H_k^1$ . Видно наличие достаточно тесной линейной корреляции. Для зависимости  $\lambda_{\max}^+(H_k^c)$  коэффициент корреляции составляет  $R = 0,82$ , а для зависимости  $\lambda_{\max}^+(H_k^1)$   $R = 0,79$ .

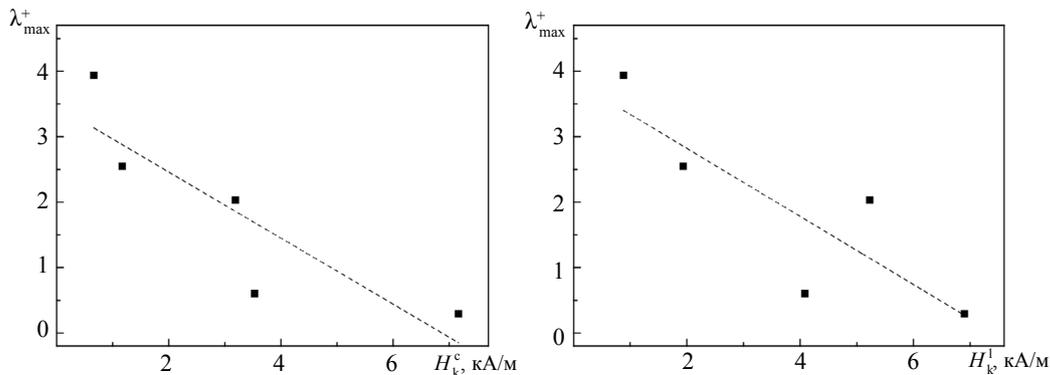


Рис. 4. Зависимости максимального положительного значения магнитострикции сплавов Fe—C от критических полей  $H_k^c$  и  $H_k^1$ .

Из выражения (2) можно сделать вывод о необходимости учета намагниченности насыщения  $M_s$  при оценке магнитострикционных характеристик. Однако анализ корреляционных соотношений величины  $\lambda_{\max}^+$  и произведений  $M_s H_k^c$  и  $M_s H_k^1$  показал лишь незначительное ( $R = 0,85$  для зависимости  $\lambda_{\max}^+(M_s H_k^c)$  и  $R = 0,78$  для зависимости  $\lambda_{\max}^+(M_s H_k^1)$ ) изменение коэффициента линейной корреляции.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что критические поля  $H_k^c$  и  $H_k^1$  коррелируют с такой магнитострикционной характеристикой, как величина положительного максимума магнитострикции  $\lambda_{\max}^+$  и могут быть оценочной мерой этой величины.

Учитывая, что магнитострикционные характеристики должны быть весьма чувствительны к деформациям и напряжениям [1—4, 8—11], на образцах из холоднодеформированной и отожженной при различных температурах стали 20Г были измерены заведомо чувствительные к упругим и пластическим деформациям коэрцитивная сила  $H_c$  и остаточная магнитная индукция  $B_r$ , а также критические поля  $H_k^c$  и  $H_k^1$ . Результаты представлены на рис. 5. При увеличении температуры отжига от 20 до 700 °С коэрцитивная сила уменьшается примерно в 3 раза, а остаточная индукция растет в 2 раза. В то же время, величина  $H_k^c$  монотонно уменьшается в 4,5 раза, а величина  $H_k^1$  — в 6,4 раза. Отсюда следует, что параметры  $H_k^c$  и  $H_k^1$  имеют большую чувствительность к изме-

Рис. 5. Зависимости магнитных свойств от температуры отжига холоднодеформированных образцов стали 20Г.

нению напряженно-деформированного состояния стали 20Г, чем традиционные [1—3] параметры  $H_c$  и  $B_r$ . Этот результат может объясняться тем, что величины  $H_k^c$  и  $H_k^1$  определяются формой кривой намагничивания и предельной петли в области, близкой к техническому насыщению, то есть в области преобладающих смещений 90-градусных доменных границ.

Следует отметить, что полученные в работе результаты не могут считаться исчерпывающими и нуждаются в дальнейшей экспериментальной проверке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

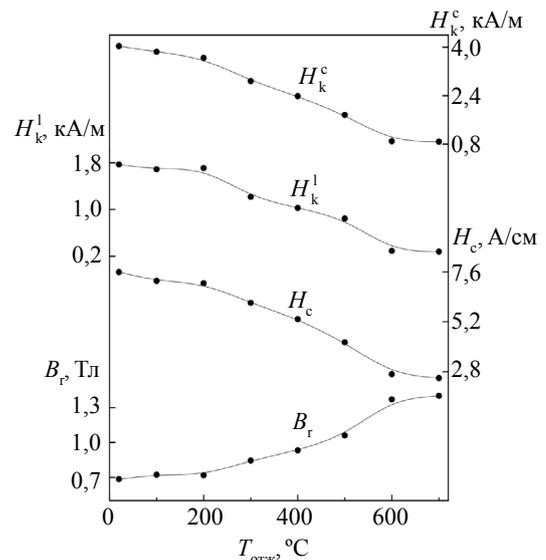
1. Показано, что определяемые формой кривых намагничивания и предельной петли гистерезиса в области преобладающих смещений 90-градусных доменных границ критические поля  $H_k^c$  и  $H_k^1$  коррелируют с величиной положительного максимума магнитоэстрикции  $\lambda_{\max}^+$  объемных образцов из отожженных сплавов Fe—C. По значениям критических полей  $H_k^c$  и  $H_k^1$  можно оценивать величину  $\lambda_{\max}^+$ .

2. Показано, что изменение критических полей  $H_k^c$  и  $H_k^1$  при увеличении температуры отжига холоднодеформированной стали 20Г в 1,5 — 3 раза превосходит изменение таких известных параметров оценки напряженно-деформированного состояния, как коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-38-00253).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. М. — Л.: ОГИЗ — Гостехиздат, 1948. 816 с.
2. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: ИЛ, 1956. 784 с.
3. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения / Пер. с японского под ред. Р.В. Писарева. М.: Мир, 1987. 420 с.
4. Белов К.П. Магнитоэстрикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 160 с.
5. Власов К.Б., Правдин Л.С. Обратимые и исходные необратимые магнитоупругие и магнитоэстрикционные эффекты // ФММ. 1979. Т. 48. № 4. С. 791—802.
6. Правдин Л.С. Магнитоупругие характеристики стали при квазистатических воздействиях // Дефектоскопия. 1982. № 5. С. 57—61.
7. Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M., Lahanowski J., Lech-Grega M. Study on the applicability of the measurements of magnetoelastic properties for nondestructive evaluation of thermally induced microstructure changes in the P91-grade steel // NDT&E International. 2012. V. 47. P. 157—162.
8. Piotrowski L., Chmielewski M., Kowalewski, Z. On the application of magnetoelastic properties measurements for plastic level determination in martensitic steels // J. Electric. Eng. 2018. V. 69. P. 502—506.
9. Костин В.Н., Клостер А.А., Герасимов Е.Г. Магнитные и магнитоакустические свойства сплавов на основе железа, никеля и кобальта с различными значениями магнитоэстрикции // ФММ. 2000. Т. 90. № 3. С. 51—57.
10. Костин В.Н. Влияние магнитного состояния на демпфирующие свойства сплавов на основе железа и никеля // ФММ. 2009. Т. 107. № 1. С. 29—37.
11. Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M., Landgraf F.J.G., Sablik M.J. Impact of plastic deformation on magnetoacoustic properties of Fe-2% Si alloy // NDT&E International. 2009. V. 42. P. 92—96.
12. Костин В.Н., Гурьев М.А., Василенко О.Н., Филатенков Д.Ю., Смородинский Я.Г. Амплитудно-частотные характеристики магнитоакустической эмиссии термообработанных сплавов железа // Физ. мезомеханика. 2013. № 16. С. 103—110.
13. Костин В.Н., Филатенков Д.Ю., Чекакина Ю.А., Василенко О.Н., Сербин Е.Д. Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах // Акустич. журнал. 2017. №. 63. С. 209—216.



14. *Makowska, K., Piotrowski, L., Kowalewski, Z.L.* Prediction of the Mechanical Properties of P91 Steel by Means of Magneto-acoustic Emission and Acoustic Birefringence // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017. V. 36. I. 2. Art. No. 43. P. 1—10.
15. *Yamasaki T., Yamamoto S., Hirao M.* Effect of applied stresses on magnetostriction of low carbon steel // *NDT & E International*. 1996. V. 29. I. 5. P. 263—268.
16. *Kostin V.N., Filatenkov D.Y., Vasilenko O.N., Stashkov A.N.* Definition of magnetostrictive sensitivity and structural-phase state of heat-treated Fe alloys by using MAE measurements / Proc. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, Czech Republic, October 6—10, 2014. P. 5.
17. *Костин В.Н., Василенко О.Н., Филатенков Д.Ю., Чекашина Ю.А., Сербин Е.Д.* Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу // *Дефектоскопия*. 2015. № 10. С. 33—41.
18. *Piotrowski L., Chmielewski M., Augustyniak B.* On the correlation between magnetoacoustic emission and magnetostriction dependence on the applied magnetic field // *J. Magn. Magn. Mater.* 2016. V. 410. P. 34—40.
19. *Jus A., Nowak P., Ginko O.* Assessment of the magnetostrictive properties of the selected construction steel // *Acta Phys. Polonica A*. 2017. V. 131. I. 4. P. 1084—1086.
20. *Kostin V.N., Serbin E.D., 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. V. 145. P. 1—7.
21. *Paes V.Z.C., Varalda J., Mosca D.H.* Strain-induced magnetization changes and magneto-volume effects in ferromagnets with cubic symmetry // *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. V. 475. P. 539—543.
22. *Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С.* Лекции по магнетизму. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. 512 с.
23. *Weiping Ren, Ke Xu, Peng Zhou.* Fast Measurement of Magnetostriction Coefficients for Silicon Steel Strips Using Magnetostriction-Based EMAT // *Sensors*. 2018. V. 18. I. 12. Art. No. 4495. P. 1—13.
24. *Choe G., Megdal B.* High precision magnetostriction measurement employing the B-H loop bending method // *IEEE Trans. Magn.* 1999. V. 35. P. 3959—3961.
25. *Hill C.B., Hendren W.R., Bowman R.M., McGeehin P.K., Gubbins M.A., Venugopal V.A.* Whole wafer magnetostriction metrology for magnetic films and multilayers // *Measurement Sci. Techn.* 2013. V. 24. P. 1—6.
26. *Сташков А.Н., Сомова В.М., Сажина Е.Ю., Сташкова Л.А., Ничипурук А.П.* Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-стареющих сталях // *Дефектоскопия*. 2011. № 12. С. 36—42.