

УДК 620.179.14

Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов

В.Н. Бусько, А.А. Осипов

Институт прикладной физики Национальной академии Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 20.05.2019

Принята к печати 06.08.2019

Наличие анизотропии свойств ферромагнитных материалов предопределяет необходимость ее исследования и контроля, поскольку она оказывает существенное влияние на основные физико-механические характеристики деталей, изделий и конструкций. Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании возможности применения магнитошумового метода для неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов на примере коэффициента нормальной анизотропии R_n листового проката, механических напряжений при упругой деформации электротехнической стали и анизотропии физико-механических свойств ферромагнитных материалов.

Так как механическая анизотропия связана с магнитной анизотропией, при ее исследовании использовался магнитный метод на основе эффекта Баркгаузена (МЭБ), информативные параметры которого относятся к магнитоанізотропным. Сравнение результатов оценки анизотропии с помощью МЭБ на партии образцов штампуемой тонколистовой стали с измеренными производителем значениями R_n показало их близкое совпадение. Результаты исследований показали возможность оценки степени R_n с помощью МЭБ при применении его на производстве. Для изучения магнитной анизотропии в различных материалах и влияния на нее упругих напряжений растяжения и сжатия при изгибе с помощью МЭБ были изготовлены устройство для кругового вращения преобразователя Баркгаузена на поверхности исследуемого образца и устройство для формирования в образце упругих напряжений при изгибе.

Установлено, что упругая деформация в образцах электротехнической стали приводит к резкому изменению уровня магнитного шума и формы круговых диаграмм с учетом знака формируемых в образце напряжений. Установлено, что в результате холодной прокатки в процессе производства образцы электротехнической стали имеют ярко выраженную текстуру, обусловленную направлением проката листа. Создаваемые упругие напряжения в рассматриваемом диапазоне практически не меняют текстурированность – наведенную кристаллографическую анизотропию после прокатки материала.

Полученные с помощью магнитошумового метода результаты могут быть полезны при изучении, мониторинге и контроле анизотропии, кристаллографической текстуры, структурной неоднородности ферромагнитных материалов в виде листового проката, тонколистовой и рулонной стали, листовой штамповки и решении других задач с использованием магнитошумового метода в лабораторных и цеховых условиях.

Ключевые слова: анизотропия, деформация, изгиб, напряжения, магнитный шум.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Адрес для переписки:

В.Н. Бусько
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

V.N. Busko
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

В.Н. Бусько, А.А. Осипов
Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 281–292.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

For citation:

V.N. Busko, A.A. Osipov
[Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic Materials].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 281–292 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic Materials

V.N. Busko, A.A. Osipov

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 20.05.2019

Accepted for publication 06.08.2019

Abstract

Presence of anisotropy of the ferromagnetic materials' properties determines the need for its research and control, since it has a significant impact on the basic physicomachanical characteristics of details, products and constructions. The aim of the work was to experimentally investigate the possibility of using the magnetic noise method for non-destructive testing of mechanical properties of ferromagnetic materials particularly value of the coefficient of normal anisotropy R_n of sheet metal, mechanical stresses under elastic deformation of electrical steel and the anisotropy of the physical and mechanical properties of ferromagnetic materials.

Since the mechanical anisotropy is related to the magnetic anisotropy, the magnetic method of the Barkhausen effect (MBE) was used in its study, the informative parameters of which belong to the group of magnetic anisotropy. Comparison of the results of anisotropy evaluation on a set of samples of stamped sheet steel using the MBE with values R_n measured by the manufacturer showed their close match. This revealed the possibility of R_n level evaluation using the MBE. Device for circular rotation of the Barkhausen transducer on the sample surface and device for forming of elastic bending stresses in the sample were constructed. To study the magnetic anisotropy in various materials and the impact of elastic tensile and compressive stresses by bending on it using the MBE.

It has been found that the elastic deformation in samples of electrical steel leads to dramatic change of the magnetic noise level and the shape of the circular diagrams, taking into account the sign of the stresses generated in the sample. It was established that as a result of cold rolling in the production process, electrical steel samples have a pronounced texture due to the direction of rolled sheet. The created elastic stresses in the considered range practically do not change the texture (induced crystallographic anisotropy) after the material rolling.

The results can be useful for studying, monitoring and testing of anisotropy, crystallographic texture, structural heterogeneity of ferromagnetic materials in the form of sheet metal, sheet steel and coil steel, sheet metal forming and for solving other problems using the magnetic noise method in laboratory and workshop conditions.

Keywords: anisotropy, strain, bending, stress, magnetic noise.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Адрес для переписки:

В.Н. Бусько
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

V.N. Busko
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

В.Н. Бусько, А.А. Осипов
Применение магнитошумового метода для контроля механической
анизотропии ферромагнитных материалов.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 281–292.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

For citation:

V.N. Busko, A.A. Osipov
[Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical
Anisotropy of Ferromagnetic Materials].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 281–292 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Введение

На техническое состояние различных элементов деталей и изделий ферромагнитных конструкций существенное влияние оказывают различные виды анизотропии: механической, кристаллической, магнитной, напряжений, усталостной, коррозионной, зависящей от формы и материала образца, направления, вида и режима термической объемной и поверхностной обработки и др. Реакция изотропного и анизотропного материалов на внешнюю нагрузку имеет значительные количественные и качественные различия. Так, прочность и долговечность конструкции во многом (до 50 %) определяются наличием и степенью анизотропии и заметно зависят от направления приложения рабочей нагрузки [1, 2], а магнитные потери, к примеру, в электротехнической стали, также зависят от анизотропии [3, 4], что повышает актуальность изучения возможности ее контроля.

Наиболее распространенной является механическая анизотропия, которая присуща большинству материалов, изделий и конструкций, формируемая часто в процессе производства и эксплуатации. Существует постоянная потребность в оценке и неразрушающем контроле (НК) анизотропии свойств в производстве, например, при прокатке электротехнической стали [5], обыкновенной листовой [6], низкоуглеродистой стали Ст20 [7]. Особенно актуальной является задача НК анизотропии при изготовлении изделий из тонкого металлопроката, когда необходим НК механических свойств листовой стали, который, в основном, решается с помощью импульсного магнитного метода по остаточной намагниченности [8–10] и других магнитных характеристик [2–15].

При исследовании и контроле анизотропии наилучшие результаты показывают рентгеновские, магнитные, ультразвуковые и оптические методы [8], каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны, а также ограничения при использовании на производстве, как, например, рентгеновский. Вследствие того, что механическая анизотропия приводит к возникновению магнитной анизотропии, магнитные методы относятся к наиболее эффективным и достоверным при НК. К эффективным магнитным методам НК анизотропии материалов можно отнести и метод, основанный на эффекте Баркгаузена (МЭБ) [2, 12–16], информативные параме-

тры которого благодаря взаимосвязи со структурой материала несут информацию о перестройке его доменной структуры, тесно связанной с анизотропией его физико-механических характеристик. По различным данным, МЭБ и его параметры можно использовать при исследовании и НК степени анизотропии различных ферромагнитных материалов, а в ряде случаев МЭБ имеет преимущества перед другими физическими методами. В работе [2] на основе анализа экспериментальных данных показано, что параметры МЭБ однозначно относятся к магнитоанизотропным информативным параметрам, т. е. являются структурно-чувствительными, регистрирующими изменения магнитных свойств в различных направлениях.

В связи с этим целью работы являлось экспериментальное исследование возможности применения магнитошумового метода для неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов на примере коэффициента нормальной анизотропии листового проката, механических напряжений при упругой деформации электротехнической стали и анизотропии физико-механических свойств ферромагнитных материалов.

Методика проведения эксперимента, конструкции устройств, образцы

В качестве метода исследования и НК магнитной анизотропии использовался МЭБ, а информативного параметра – интенсивность $U_{\text{эф}}$ магнитного шума (МШ), которая, в силу физической природы метода, относится к структурно-чувствительным магнитным величинам и проявляет свойства анизотропии [1]. Интенсивность $U_{\text{эф}}$ – среднеквадратичное значение э.д.с. магнитошумового сигнала, регистрируемого катушкой преобразователя Баркгаузена (ПБ) с осью, расположенной по нормали к контролируемой поверхности в определенных (оптимальных) полосах частотного спектра или временном интервале. Поэтому ее можно отнести к магнитоанизотропным характеристикам и использовать в качестве информативного и оценочного параметра.

Методика исследования анизотропии заключалась в измерении $U_{\text{эф}}$ вращающимся накладным ПБ в различных направлениях, получая и анализируя при этом круговые диаграммы ее распределения от угла поворота ПБ вокруг

оси на поверхности образца. Такая методика относится к наиболее оптимальным способам отображения и оценки степени магнитной анизотропии; $U_{\text{эф}}$ измерялась с помощью магнитошумового анализатора ИМШ [17] с ПБ, установленным в обойме устройства и с возможностью вращения на поверхности образца в обе стороны на 360° . Фотография внешнего вида устройства и его основных элементов показана на рисунке 1.



a



b

Рисунок 1 – Внешний вид устройства с преобразователем Баркгаузена для исследования и контроля анизотропии свойств ферромагнитных материалов: 1 – кольцо с лимбом; 2 – вращающаяся платформа; 3 – преобразователь Баркгаузена в обойме; a – угол между преобразователем Баркгаузена и направлением прокатки образца $\alpha = 0^\circ$; b – $\alpha = 45^\circ$

Figure 1 – Appearance of a device with a Barkhausen converter for studying and controlling of the anisotropy of the ferromagnetic materials properties: 1 – ring with limb; 2 – rotating platform; 3 – Barkhausen converter in the holder; a – angle between the Barkhausen converter and the sample rolling direction $\alpha = 0^\circ$; b – $\alpha = 45^\circ$

Устройство для кругового вращения состоит из кольца с лимбом 1, вращающейся платформы 2 и установленным на ней в обойме ПБ 3. Для повышения устойчивости устройства с ферромагнитным образцом оно имеет три опоры, выполненные из полосовых постоянных магнитов и закрепленные с помощью клея на нижней части кольца с лимбом 1 через 120° друг от друга. Внутри неподвижного кольца диаметром $\text{Ø}130$ мм с нанесенными на нем угловыми метками (от 0 до 360° с ценой деления 5°) размещается подвижная платформа 2 с жестко установленным в обойме ПБ 3, регистрирующим $U_{\text{эф}}$ и расположенным так, чтобы ось измерительной катушки ПБ находилась нормально к поверхности образца. Благодаря круговому вращению платформы 2 с ПБ 3 в кольце 1 появляется возможность проводить измерения МШ на поверхности образца в различных направлениях с разным шагом. Наличие минимального люфта при вращении платформы с ПБ обеспечивает более высокие повторяемость и достоверность измерения МШ.

В качестве испытуемых использовались два образца (№ 1 и № 2) холоднокатанной анизотропной текстурованной электротехнической стали 3408 из разных партий в виде пластин длиной 500 мм, шириной 105 мм и толщиной 0,35 мм, обладающих, как правило, явно выраженной кристаллографической ориентацией. Исследование и оценка влияния коэффициента нормальной анизотропии тонколистового проката на МШ производились на образцах низколегированной стали (аналогичной низколегированной кипящей стали 08кп) в количестве 11 штук длиной и шириной 1000 мм и толщиной 0,8 мм, предоставленных комбинатом FQZ (Германия) с различными (вдоль и поперек) направлениями механической прокатки. При исследовании анизотропии свойств материалов с помощью МЭБ также использовались образцы из других марок сталей: высокопрочной высоколегированной (хромо-никель-титанистой) стали ВНС-2 в форме пластины длиной 200 мм, шириной 150 мм и толщиной 2 мм, конструкционной хромоникелевой низколегированной 10ХСНД – длиной 230 мм, шириной 160 мм и толщиной 2 мм, конструкционной низколегированной стали 09Г2С – длиной 700 мм,

шириной 600 мм и толщиной 6 мм, конструкционной стали 30ХГСА – длиной 110 мм, шириной 130 мм и толщиной 5 мм, а также отожженной конструкционной стали – длиной и шириной 150 мм, толщиной 2 мм.

Отметим, что при изучении анизотропии механических свойств материалов следует различать анизотропию свойств, определяемых при различных видах нагружения, например: анизотропию характеристик при статических растяжении, сжатии, кручении, изгибе, а также анизотропию прочности, ударной вязкости и др. В связи с этим изучалось влияние упругих деформаций при изгибе на круговые диаграммы и интенсивность МШ. В устройстве для реализации методики формирования напряжений при изгибе применялась трехточечная схема нагружения плоских образцов прямоугольной формы, приведенная на рисунке 2.

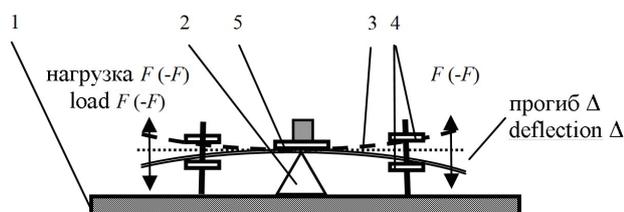


Рисунок 2 – Схема устройства для формирования упругих деформаций изгиба в анизотропных образцах электротехнической стали: 1 – основание; 2 – упор-призма; 3 – образец (нейтральное положение, растяжение, сжатие); 4 – прижимные пластины; 5 – устройство кругового вращения с преобразователем Баркгаузена

Figure 2 – Scheme of the device for formation of elastic bending deformations in anisotropic samples of electrical steel: 1 – base; 2 – stop-prism; 3 – sample (neutral position, tension, compression); 4 – pressure plates; 5 – circular rotation device with Barkhausen converter

Такая схема позволяет создавать упругие деформации изгиба, формируя в зависимости от направления усилия F различные напряжения растяжения и сжатия в образце. Учитывая, что любая деформация может вызывать анизотропию физико-механических свойств материала, а также наличие устройства вращения ПБ (рисунок 1), появилась возможность изучать влияние упругой и пластической деформации на уровень МШ при различных ориентациях ПБ на образце или направлениях обработки.

Исследование анизотропии механических свойств низколегированной тонколистовой стали

Для оценки чувствительности МШ к механическим свойствам листового проката выполнены экспериментальные исследования влияния механической анизотропии на интенсивность МШ на специально аттестованных предприятием-изготовителем образцах с измеренными значениями коэффициента нормальной анизотропии R_n , принятого в качестве меры степени анизотропии механических свойств листового материала и определяемого экспериментально при испытаниях материала на растяжение. Здесь $R_n = 0,25 (R_0 + 2R_{45} + R_{90})$, где $R_\varphi = (\ln b / \ln b_0) / (\ln h / \ln h_0)$; $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$; b и b_0 – текущая и первоначальная ширина; h и h_0 – текущая и начальная толщина образца.

На рисунке 3 представлены результаты оценки механической анизотропии с помощью магнитошумового анализатора ИМШ для образцов из низкоуглеродистой тонколистовой стали в зависимости от R_n , характеризующего изменение свойств материала в плоскости листового проката при растяжении на разрывной машине, при продольном и поперечном направлениях прокатки. График на рисунке 3а соответствует положению, когда ось направления перемагничивания магнитопровода ПБ совпадает с направлением прокатки вдоль листа, а на рисунке 3б – поперек направления прокатки. Видно, что результаты оценки R_n с помощью МЭБ имеют качественное совпадение с заявленными производителем коэффициентами нормальной анизотропии для образцов, а магнитошумовой параметр U_{φ} является чувствительным к анизотропии свойств ферромагнитного образца, т. е. относится к магнитоизотропным. Также видно, что коэффициент корреляции R^2 для направления перемагничивания ПБ вдоль прокатки несколько выше, чем для направления поперек прокатки ($R^2_{\parallel} = 0,5241$; $R^2_{\perp} = 0,4599$), что согласуется с данными работы [9], где сделан вывод о предпочтении использования продольного направления перемагничивания перед поперечным. Для увеличения коэффициента корреляции при оценке степени анизотропии механических свойств с помощью МЭБ необходимо провести дополнительные исследования при наличии большего количества исследуемых образцов и в зонах

с минимальной неоднородностью магнитных свойств по площади поверхности образца, оптимизируя режимы перемагничивания и анализа МШ.

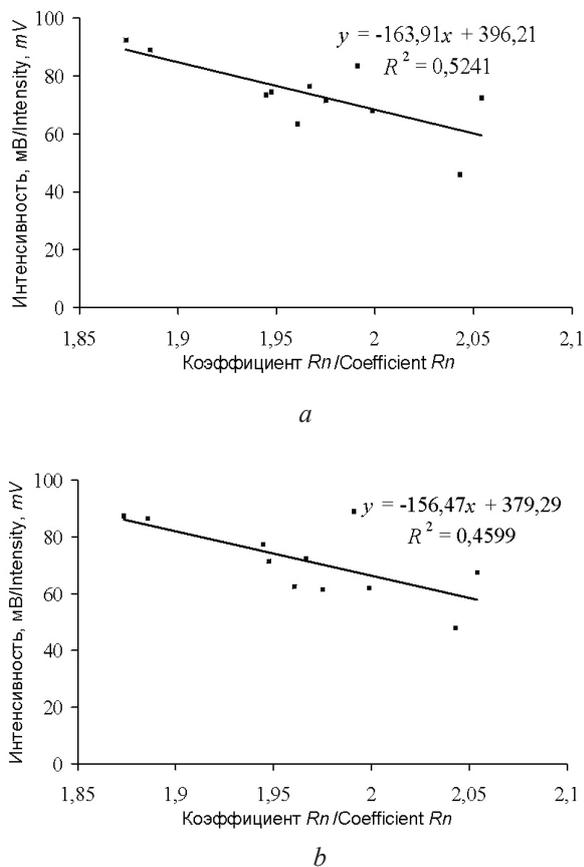


Рисунок 3 – Взаимосвязь интенсивности магнитного шума $U_{эф}$ с коэффициентом нормальной анизотропии R_n для образцов тонколистового проката при: a – продольном направлении прокатки; b – поперечном

Figure 3 – The relationship of the magnetic noise U_{eff} intensity with the coefficient of normal anisotropy R_n of rolled sheets' samples under: a – the longitudinal direction of rolling; b – the transverse one

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что интенсивность МШ коррелирует с механической анизотропией и может служить информативным, а в ряде случаев и количественным параметром, что особенно важно при экспресс-оценке степени анизотропии, мониторинге и НК механических свойств тонколистового проката при его производстве и отработке техпроцесса, а МЭБ может быть использован как самостоятельный или дополнительный при решении данной задачи.

Влияние упругой деформации изгиба на анизотропию магнитного шума

При изучении и оценке чувствительности МШ к анизотропии свойств посредством вращения ПБ и анализа экспериментальных данных наиболее удобно использовать круговые (угловые диаграммы [14]), характеризующие изменение МШ в зависимости от угла поворота α ПБ вокруг оси на поверхности образца в координатах $U_{эф}$ и α . Измерения $U_{эф}$ производились при амплитуде тока в ПБ $i = 96$ мА и частоте перемагничивания $f = 128$ Гц. На рисунке 4 показаны круговые диаграммы зависимости $U_{эф}$ от α ПБ на поверхности образцов № 1 и № 2 холоднокатанной анизотропной электротехнической стали при различных значениях и знаке создаваемых упругих напряжений при изгибе, полученных с помощью показанных на рисунке 1 устройства для вращения ПБ на образце и на рисунке 2 схемы его деформирования.

Расчет значений упругих напряжений растяжения σ_+ и сжатия σ_- при изгибе производился с помощью стандартных формул при известных значениях приложенной нагрузки F , измеренной электронным динамометром (или с помощью грузиков); величины прогиба Δ , измеренной индикатором часового типа; площади сечения образца S и модуля Юнга E для стали. Из представленных на рисунках 4а и 4b диаграммах следует, что в обоих образцах, особенно в образце № 1, в недеформированном состоянии присутствует магнитная анизотропия, регистрируемая МЭБ. Максимум значения $U_{эф}$ для образца № 1 наблюдался вдоль направления «160°–340°» (а не «0°–180°»), т. е. наиболее близкого к направлению деформации прокатки, что свидетельствует о выявлении магнитной анизотропии, совпадающей с осью легкого намагничивания [2]. В образце № 2 максимум $U_{эф}$ совпадал с направлением «0°–180°» с небольшим смещением диаграмм влево относительно центральной оси вращения ПБ. Видно, что рост упругих напряжений растяжения и сжатия при изгибе обоих образцов приводит к резкому изменению уровня МШ с учетом знака напряжений. Для образца с положительной константой магнитострикции при росте σ_+ при изгибе уровень МШ возрастает, при росте σ_- – снижается, степень изменения МШ в результате упругой деформации и вид диаграмм

зависят от степени деформации. Видно, что в результате холодной прокатки путем штамповки благодаря наличию в стали физико-кристаллографических свойств, листы имеют ярко выраженную текстуру, приводящую к анизотропии, обусловленную направлением прокатки вдоль длины листа и совпадающей с осью «0°–180°». Уровень МШ вдоль направления прокатки, соответствующий более высоким магнитным свойствам материала – магнитной проницаемости и магнитной индукции, значительно превышает другие направления значений интенсивности МШ. Для образца № 1 в недеформированном состоянии отношение ($U_{\text{эф max}}/U_{\text{эф min}}) \approx 3,2\text{--}3,5$ раза, для № 2 – при-

мерно 2. Если учесть, что анизотропия магнитных свойств, характеризуемая $U_{\text{эф}}$, преимущественно совпадает с анизотропией механических свойств [2], то можно сделать вывод о взаимосвязи МШ с механической анизотропией и ее надежного выявления с помощью МЭБ, а также о возможности ее использования для определения преимущественного направления физико-механических свойств. При этом характер круговых диаграмм показывает, что деформация практически не меняет текстурированность – направление наведенной анизотропии, вызванной прокаткой, т. к. для обоих образцов $U_{\text{эф}}$ и вид круговых диаграмм отличаются друг от друга в зависимости от угла α .

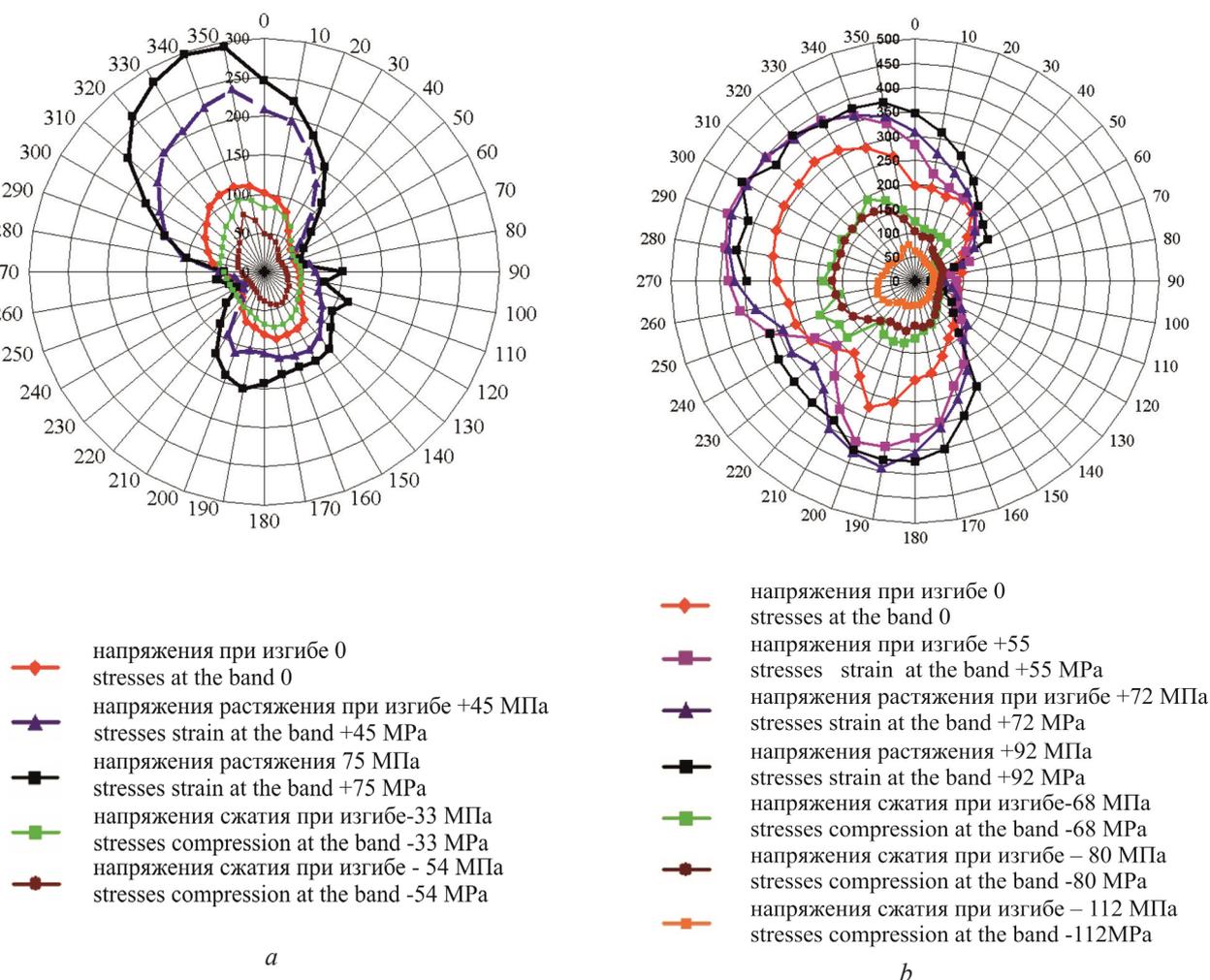


Рисунок 4 – Круговые диаграммы зависимости магнитного шума от угла поворота преобразователя Баркгаузена на поверхности двух образцов электротехнической стали 3408 при различных уровнях и знаках упругих деформаций изгиба: *a* – образец № 1; *b* – образец № 2

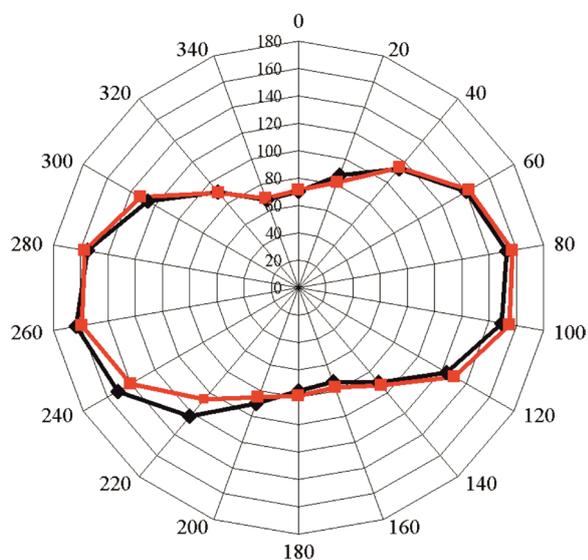
Figure 4 – Pie charts of magnetic noise dependence on the angle of rotation of the Barkhausen transducer on the surface of two samples of 3408 electrical steel at various levels and signs of elastic bending deformations: *a* – sample № 1; *b* – sample № 2

Таким образом, упругая деформация образцов электротехнической стали при статическом изгибе в исследуемом диапазоне напряжений, по результатам измерения МШ, не привела к возникновению заметной дополнительной механической анизотропии. Полученные результаты совпали с данными, полученными в работе [16] при исследовании упругой деформации в материалах с положительной константой магнитострикции при статическом растяжении и статическом сжатии, когда при растяжении информативный параметр МЭБ также возрастает, а при сжатии – снижается.

Исследование магнитной анизотропии различных материалов

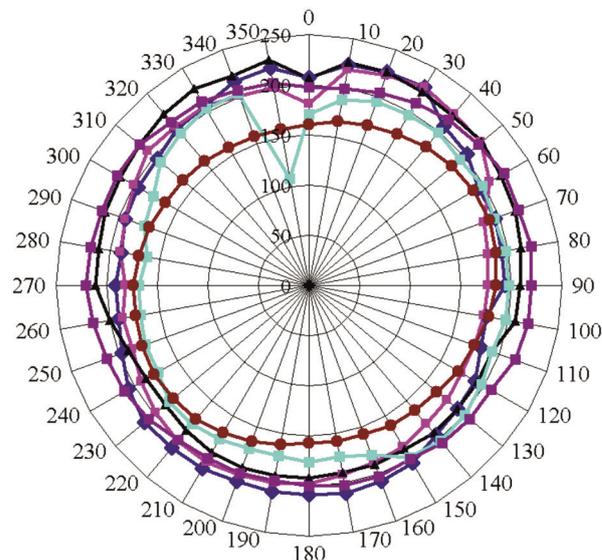
Для сравнения с представленными на рисунке 4 экспериментальными круговыми диаграммами зависимости $U_{эф}$ от α для электротехнической стали 3408 на рисунке 5 показаны круговые диаграммы МШ, полученные на образцах стали ВНС-2 (рисунок 5а), стали 09Г2С (рисунок 5б), 10ХСНД (рисунок 5с) и конструкционной легированной стали (рисунок 5д).

Из анализа рисунка 5а видно, что, по данным измерения МШ, в образце холоднокатаной жаропрочной высоколегированной коррозионностойкой стали ВНС-2 присутствует магнитошумовая анизотропия, обусловленная появлением механической анизотропии в процессе производства стали при прокатке. Максимум $U_{эф}$ наблюдается вдоль оси «(90°–85°)–(270°–265°)», практически совпадающей с видимым на образце направлением прокатки. Диаграмма, показанная на рисунке 5б, свидетельствует о незначительной магнитошумовой анизотропии в образце свариваемой стали 09Г2С, имеющей в исходном состоянии ферритно-перлитную мелкозернистую (средний размер зерен феррита равен примерно 10–20 мкм) и преимущественно, по данным металлографии, однородную структуру, которая не оказывает значительного влияния на магнитную анизотропию и на МШ. Независимо от местоположения точек измерения МШ по поверхности образца, включая обратную его сторону, значения $U_{эф}$ также остаются близкими между собой, что подтверждает высокую структурную однородность образца.



—♦— точка 1
point 1
—■— точка 2 в 3 см от 1-й
point 2 in 3 sm

a



—♦— точка 1 на стороне 1
point 1 on side 1
—■— точка 2
point 2
—▲— точка 3
point 3
—■— точка 4
point 4
—■— точка 3 с обратной стороны листа
point 3 on the back side of the sheet
—●— точка 2 с обратной стороны
point 2 on the back side of the sheet

b

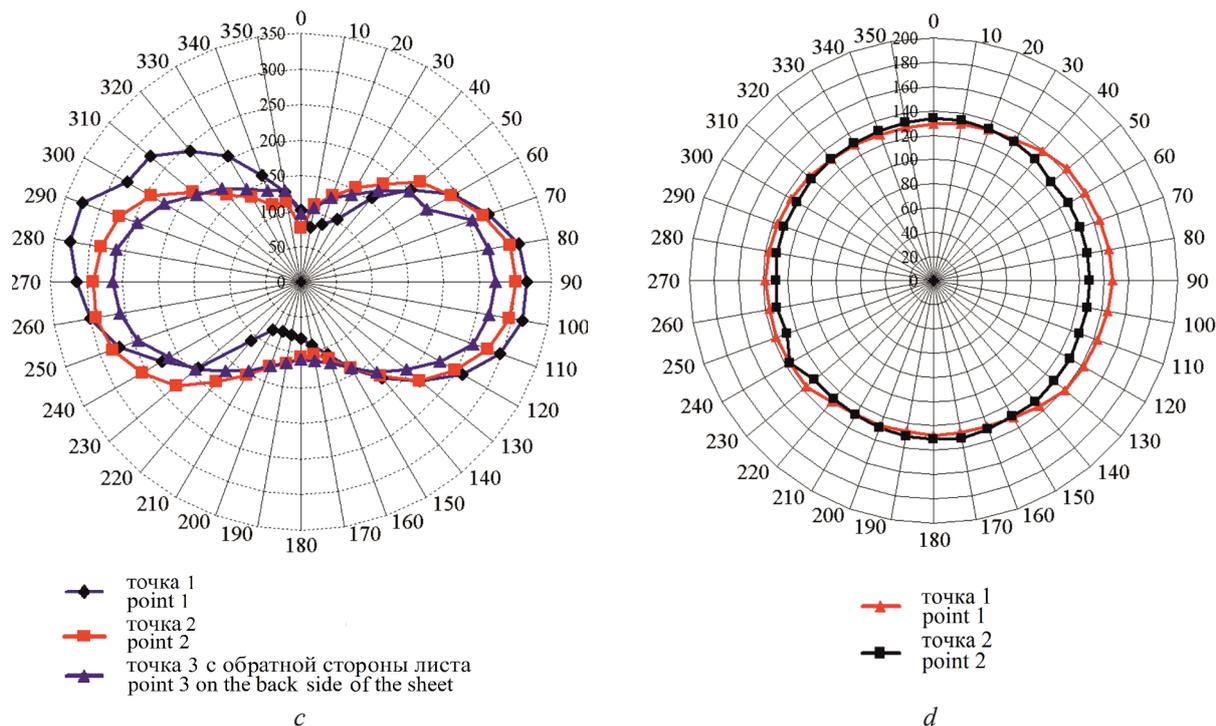


Рисунок 5 – Круговые диаграммы зависимости магнитного шума от угла поворота преобразователя Баркгаузена на поверхности образцов: *a* – высокопрочная высоколегированная сталь ВНС-2; *b* – низколегированная сталь 09Г2С; *c* – низколегированная сталь 10ХГСНД; *d* – изотропная конструкционная отожженная сталь

Figure 5 – Pie charts of magnetic noise dependence on the angle of rotation of the Barkhausen transducer on the sample surface: *a* – high-strength high-alloy steel VNS-2; *b* – low-alloy steel 09G2S; *c* – low-alloy steel 10HSND; *d* – isotropic structural annealed steel

Анализ представленной на рисунке 5*c* круговой диаграммы зависимости $U_{\text{эф}}$ от α для стали 10ХГСНД показал, что она имеет вытянутую форму строго вдоль направления оси «90°–270°», соответствующего максимальным значениям $U_{\text{эф}}$ и совпадает с направлением механической шлифовки, приводящей к росту растягивающих остаточных напряжений, в том числе, и под влиянием важного для легированных сталей теплового фактора [16].

Пример изменения $U_{\text{эф}}$ изотропной и отожженной конструкционной стали представлен на рисунке 5*d*, из которого следует, что распределение $U_{\text{эф}}$ от α характеризует практически магнитошумовую изотропность и структурную однородность стали, когда при любых положениях датчика в различных точках образца зависимости $U_{\text{эф}}$ от α остаются практически постоянными и представляют собой концентрически ровные окружности, свидетельствующие об отсутствии магнитной анизотропии или оценке однородности. Отметим, что данный образец характеризовался высокой степенью чистоты обработки по-

верхности, что также обеспечило уменьшение погрешности измерения МШ.

Таким образом, экспериментально установлена корреляционная зависимость между интенсивностью магнитного шума и анизотропией физико-механических свойств ряда ферромагнитных материалов.

Заключение

Для экспериментального исследования возможности применения магнитошумового метода для неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов изготовлены устройство для кругового вращения (от 0° до 360° с ценой деления 5°) преобразователя Баркгаузена на поверхности исследуемого ферромагнитного образца и устройство для формирования в образце упругих деформаций изгиба.

На основе сопоставления полученных с помощью метода эффекта Баркгаузена результатов и предоставленных изготовителем образцов штампуемой тонколистовой стали с известными

коэффициентами нормальной анизотропии сделан вывод о том, что имеется качественное и удовлетворительное количественное совпадение зависимостей, свидетельствующее о наличии взаимосвязи магнитного шума с механическими свойствами и возможности использования метода эффекта Баркгаузена для изучения и контроля механических свойств.

Установлено, что упругие напряжения растяжения (в диапазоне от 0 до ≈ 70 МПа) и сжатия (в диапазоне от 0 \approx до -120 МПа) при изгибе образцов электротехнической стали приводят к резкому изменению уровня магнитного шума с учетом знака формируемых напряжений. Степень изменения магнитного шума, а также вид круговых диаграмм зависят от величины и знака создаваемых механических напряжений в образце. Показано, что в результате деформации от холодной прокатки листы стали имеют ярко выраженную текстуру, формируемую направлением проката вдоль длины листа. Значения интенсивности магнитного шума вдоль направления прокатки, соответствующие более высоким магнитным свойствам стали, значительно (примерно в 2–3,5 раза) превышают другие направления измеренных значений магнитного шума. Создаваемые упругие напряжения растяжения и сжатия при деформациях изгиба в рассматриваемом диапазоне их изменения практически не меняют текстурированность, или наведенную анизотропию, вызванную прокаткой.

Степень магнитной анизотропии, характеризующаяся изменением интенсивности магнитного шума и формой круговых диаграмм, относится к информативным параметрам, позволяющим выявлять и оценивать степень естественной и наведенной анизотропии при производстве и эксплуатации изделий из ферромагнитных материалов. Отличие и особенности оценки анизотропии с помощью метода эффекта Баркгаузена от аналогов состоит в высокой чувствительности и производительности, универсальности и снижении требований к размагничиванию изделий перед контролем, относительной простоте и малой стоимости реализации метода.

Таким образом, полученные результаты по исследованию возможности применения магнитношумового метода неразрушающего контроля механической анизотропии физико-механических свойств показали эффективность и пригодность метода, который может быть применен

в лабораторных и заводских условиях в качестве самостоятельного, дополнительного или экспресс-метода: например, при контроле и оценке механической анизотропии, текстуры, структурной неоднородности и других свойств листового проката, тонколистовой и рулонной стали, листовой штамповки и решения других задач.

Список использованных источников

1. Radchenko, A.V. Numerical modeling of development of fracture in anisotropic composite materials at low-velocity loading / A.V. Radchenko, P.A. Radchenko // Journal of Materials Science. – 2010. – Vol. 46, no. 8. – P. 2720–2725.

DOI: 10.1007/s10853-010-5142-8

2. Gorkunov, E.S. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of Ferromagnetic Materials, Review Article I. / E.S. Gorkunov, Y.N. Dragoschanski // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1999. – No. 6. – P. 3–23.

3. Туунов, В.Ф. Контроль неоднородности магнитной проницаемости листовой анизотропной электротехнической стали // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 46–49.

4. Korzunin, G.S. The effect of the Anisotropy of Magnetic Properties of electrical steel on losses in power transformer cores / G.S. Korzunin [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46, no. 9. – P. 632–637.

DOI: 10.1134/S1061830910090020

5. Borsutzki, M. Magnetische und akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung von Stahlblechen / M. Borsutzki, J. Kroos, W. Reimche, E. Schneider // Stahl und Eisen, 120 (2000), H. 12. – P. 115–121.

6. Korzunin, G.S. Effect of Mechanical Stresses on the Magnetic Properties of Anisotropic electrical steel / G.S. Korzunin, R.B. Puzhevich, M.B. Tsyrlin // The Physics of Metals and Metallography. – 2007. – Vol. 103, no. 2. – P. 142–151. DOI: 10.1134/S0031918X07020044

7. Nichipuruk, A.P. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching / A.P. Nichipuruk, A.N. Stashkov, M.S. Ogneva, A.V. Korolev, A.A. Osipov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 10. – P. 610–615.

DOI: 10.1134/S1061830915100095

8. Матюк, В.Ф. Состояние неразрушающего контроля шумности листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 3. – С. 3–24.

9. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А.С. Счаст-

ный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.

10. Matyuk, V.F. Modern state of Nondestructive testing of Mechanical properties and stamping ability of steel sheets in a manufacturing technological flow / V.F. Matyuk., S.A. Goncharenko, H. Hartmann, H. Reichelt // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2003. – Vol. 39, no. 5. – P. 347–380.

DOI: 10.1023/B:RUNT.0000011264.99280.de

11. Bida, G.V. Multiparameter methods in magnetic structuroscopy and nondestructive testing of mechanical properties of steels / G.V. Bida, A.P. Nichipuruk // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2007. – Vol. 43, no. 8. – P. 493–509.

DOI: 10.1134/S1061830907080013

12. Gorkunov, E.S. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of ferromagnetic Materials, Review Article V. / E.S. Gorkunov, Y.N. Dragoschanski, M. Mikhovski // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2000. – V. 36, no. 6. – P 389–417. **DOI:** 10.1007/BF02759376

13. Ivanova, Y. Comparative measurements of the stress state in a rolled carbon steel using magnetic barkhausen noise and ultrasonic method / Y. Ivanova, T. Partalin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. – Vol. 48, no. 2. – P. 137–146.

DOI: 10.1134/S1061830912020040

14. Венгринович, В.Л. Новые возможности НК напряжений методом эффекта Баркгаузена / В.Л. Венгринович [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – № 1 (27). – С. 36–39.

15. Iordache, V.E. Effect of mechanical strains on the magnetic properties of electrical steels / V.E. Iordache., E. Hug // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – December 2004. – Vol. 6, no. 4. – P. 1297–1303.

16. Филинов, В.В. Применение метода магнитных шумов для контроля технологических напряжений / В.В. Филинов [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 3. – С. 17–22.

17. Бусько, В.Н. Лабораторная система для исследования усталостной деградации ферромагнитных материалов и примеры ее реализации / В.Н. Бусько, Д.А. Винтов // Приборы и методы измерений. – 2012 – № 2 (5). – P. 33–39.

References

1. Radchenko A.V., Radchenko P.A. Numerical modeling of development of fracture in anisotropic composite materials at low-velocity loading. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 46, no. 8, pp. 2720–2725.

DOI: 10.1007/s10853-010-5142-8

2. Gorkunov E.S., Dragoschanski Y.N. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of Ferro-

magnetic Materials, Review Article I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1999, no. 6, pp. 3–23.

3. Tiunov V.F. [Monitoring of the magnetic permeability heterogeneity of anisotropic electrical steel sheets] *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2019, no. 3, pp. 46–49. (in Russian).

4. Korzunin G.S., Bulychev O.A., Sysolyatina I.P., Chistyakov V.K. The effect of the Anisotropy of Magnetic Properties of electrical steel on losses in power transformer cores. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, no. 9, pp. 632–637.

DOI: 10.1134/S1061830910090020

5. Borsutzki M., Kroos J., Reimche W., Schneider E. Magnetische und akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung von Stahlblechen, *Stahl und Eisen*, 2000, 120, H. 12, pp. 115–121.

6. Korzunin G.S., Puzhevich R.B., Tsyrlin M.B. Effect of Mechanical Stresses on the Magnetic Properties of Anisotropic electrical steel. *The Physics of Metals and Metallography*, 2007, vol. 103, no. 2, pp. 142–151.

DOI: 10.1134/S0031918X07020044

7. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Ogneva M.S., Korolev A.V., Osipov A.A. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 10, pp. 610–615.

DOI: 10.1134/S1061830915100095

8. Matyuk V.F. [The state of non-destructive testing of the stampability of sheet steel for steel]. *Nerazrushayushhij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 3, pp. 15–42 (in Russian).

9. Schastnyj A.S., Happily A.S., Osipov A.A. [Study of the possibility of controlling sheet metal anisotropy]. *Nerazrushayushhij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive testing and diagnostics], 2014, no. 3, pp. 20–33 (in Russian).

10. Matyuk V.F., Goncharenko S.A., Hartmann H., Reichelt H. Modern state of Nondestructive testing of Mechanical properties and stamping ability of steel sheets in a manufacturing technological flow. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 347–380.

DOI: 10.1023/B:RUNT.0000011264.99280.de

11. Bida G.V., Nichipuruk A.P. Multiparameter methods in magnetic structuroscopy and nondestructive testing of the mechanical properties of steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, no. 8, pp. 3–24.

DOI: 10.1134/S1061830907080013

12. Gorkunov E.S., Dragoschanski Y.N., Mikhovski M. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of ferromagnetic Materials, Review Article V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 389–417. **DOI:** 10.1007/BF02759376

13. Ivanova Y., Partalin T. Comparative Measurements of the Stress State In A Rolled Carbon Steel Using

Magnetic Barkhausen Noise And Ultrasonic Methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 137–146.

DOI: 10.1134/S106183091202004014.

14. Vengrinovich V.L., Tsukerman V.L., Denkevich Yu.B. [New possibilities of NK voltages by the Barkhausen effect method]. *V mire nerazrushayushhego kontrolya* [In the world of nondestructive testing], no. 1 (27), March 2005, pp. 36–39 (in Russian).

15. Iordache V.E., Hug E. Effect of mechanical strains on the magnetic properties of electrical steels.

Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, December 2004, vol. 6, no. 4, pp. 1297–1303.

16. Filinov V.V., Shaternikov V.E., Rukavishnikov I.V. [Application of the magnetic noise method for the control of process voltages]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2005, no. 3, pp. 17–22 (in Russian).

17. Busko V.N., Vintov D.A. [Laboratory system for investigation of the fatigue degradation in ferromagnetic materials and examples of its implementation]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2012, no. 2 (5), pp. 33–39 (in Russian).