УДК 620.179.14
DOI 10.14489/td.2020.12.pp.004-023

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТАЛЯХ (ОБЗОР)

Э. С. Горкунов,
акад. РАН,
Институт машиноведения
УрО РАН,
Екатеринбург, Россия.
E-mail: egorkunov@mail.ru

А. Н. Мушников,
Институт машиноведения
УрО РАН,
Екатеринбург, Россия.
E-mail: mushnikov@
imach.uran.ru

Описаны природа магнитоупругих эффектов и существующие представления о формировании магнитных текстур под действием упругих напряжений разного типа в ферромагнитных материалах. На основании исследований магнитострикции и анализа петель магнитного гистерезиса при различных упругих деформациях рассмотрены физические предпосылки для использования магнитных параметров для оценки действующих напряжений в конструкционных сталях: оценка величины одноосных сжимающих напряжений практически не представляет сложности, однако существует проблема оценки растягивающих напряжений в низколегированных сталях ввиду неоднозначной зависимости магнитных характеристик от упругой деформации растяжения. Обсуждены возможные физические причины такой неоднозначности и показаны способы решения данной проблемы с использованием анизотропии коэрцитивной силы и параметров спектров магнитной жесткости. Рассмотрены возможности оценки действующих напряжений в многослойных ферромагнетиках на основании анализа полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости. Обсуждены работы по исследованию влияния сложнапряженного состояния на магнитные характеристики ферромагнитных материалов.

Ключевые слова: упругие деформации, магнитные методы контроля, магнитострикция, магнитная текстура, коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, спектры магнитной жесткости, конструкционные стали, многослойные материалы, сложнапряженное состояние.

E. S. Gorkunov, A. N. Mushnikov
(Institute of Engineering Science, UB RAS, Ekaterinburg, Russia)

MAGNETIC METHODS OF EVALUATING ELASTIC STRESSES IN FERROMAGNETIC STEELS (REVIEW)

The paper describes the magnetoelastic effects and the existing concepts of the formation of magnetic textures under the action of elastic stresses in ferromagnetic materials. The possibilities of using magnetic parameters to assess the acting stresses in structural steels are shown: the assessment of the value of uniaxial compressive stresses is practically not difficult, however, there is a problem of assessing tensile stresses in low-alloy steels due to the ambiguous dependence of the magnetic characteristics on elastic tensile deformation. Possible reasons for this ambiguity are discussed, and methods for solving this problem using the anisotropy of the coercive force and the parameters of the magnetic rigidity spectra are shown. The possibilities of evaluating the acting stresses in multilayer ferromagnetics based on the field dependences of the differential magnetic permeability are considered. Papers on the study of the influence of complexly stressed states on the magnetic characteristics of ferromagnetic materials are discussed.

Keywords: elastic deformations, magnetic methods of non-destructive testing, magnetostriction, magnetic texture, coercive force, magnetic permeability, spectra of magnetic rigidity, structural steels, multilayer materials, complex stress state.

Статья поступила в редакцию 10.08.2020

Received 10.08.2020

Изучение влияния упругих и пластических деформаций на процессы перемагничивания ферромагнитных материалов имеет как теоретические,

так и практические аспекты. Поэтому специалисты, занимающиеся фундаментальными исследованиями и практическим использованием магнитоупругих

явлений (например, созданием различных преобразователей), могут говорить «на разных языках» и использовать различную терминологию.

С практической точки зрения знание закономерностей изменения магнитных характеристик при действии упругих деформаций позволяет использовать магнитоупругие явления при создании новых видов преобразователей и, соответственно, получении новых возможностей в измерительной технике [1 – 3] и неразрушающем контроле [4 – 6].

В области неразрушающего контроля изучение магнитоупругих явлений в конструкционных ферромагнитных материалах позволяет продвигаться в вопросах оценки параметров напряженно-деформированного состояния отдельных элементов конструкций, а в перспективе, используя эти параметры и модельные представления механики деформации и разрушения, оценить состояние и ресурс отдельных элементов и конструкции в целом.

Исследования магнитоупругих явлений в ферромагнитных металлах и сплавах начались давно [7]. Еще в середине XIX столетия П. Виллари установил, что под влиянием упругих растягивающих и сжимающих напряжений происходят определенные изменения магнитной проницаемости ферромагнитных тел, характер которых зависит от намагничивания. Это явление подтвердилось и в целом ряде более поздних исследований.

1. Основы явления

В основе магнитоупругих эффектов лежит явление магнитострикции (изменение формы и размеров тела при его намагничивании), открытое в железе Джеймсом Джоулем в 1842 г.

Явление магнитострикции свойственно всем веществам – как сильномагнитным магнетикам, так и диа- и парамагнетикам. В ферромагнетиках магнитострикция ($\lambda = \Delta l / l$ – относительное удлинение) достигает величины 10^{-2} . Для сплавов на основе железа λ составляет порядка 10^{-6} . В диа- и парамагнетиках магнитострикция чаще всего мала ($10^{-7} \dots 10^{-5}$), за исключением Vi (диамагнетик) и редкоземельных парамагнетиков, в которых она достигает 10^{-4} .

Магнитострикция широко используется в ультразвуковой технике, в гидроакустике для создания и приема колебаний различной частоты (ультра- и гиперзвук), а также для создания различных преобразователей [8].

Обратным магнитострикции является магнитоупругий эффект. Действие магнитоупругих пре-

образователей основано на изменении магнитного состояния при намагничивании его постоянным или переменным током, а также за счет действия упругой деформации. Устройства данного типа используют для запоминания информации, для измерения параметров магнитного поля, в качестве магнитных усилителей, для измерения неэлектрических величин (положения, перемещений (вращения), усилий, деформаций, уровня жидкостей и т.п.) [1, 2].

При конструировании преобразователей используются различные эффекты. Рассмотрим некоторые из них.

1.1. Магнитоупругие эффекты, используемые в преобразователях

Эффект Виллари заключается в изменении намагниченности ΔM ферромагнетика или генерации ЭДС e в катушке индуктивности W в направлении механической деформации τ (продольной и поперечной) (рис. 1, а).

Эффект Вертхайма. Прямой эффект: при скручивании τ намагниченного стержня M между двумя концами стержня генерируется ЭДС. При подаче переменного тока на намагниченный стержень в нем возникают деформации кручения (обратный эффект) (рис. 1, б).

Эффект Гиллмена: слегка изогнутый ферромагнитный стержень выпрямляется, если его поместить в магнитное поле.

Эффект Видемана (1858 г.) (прямой). При циркулярном намагничивании током J возникающая деформация кручения τ приводит к генерации ЭДС в катушке индуктивности W , и наоборот (*эффект Маттеуччи*).

На влиянии упругих деформаций на магнитные параметры ферромагнетика строится основа создания всевозможных датчиков: силоизмерительных, положения, перемещения и многих других [1, 2].

Рис. 1. Схема работы преобразователя с использованием эффекта Виллари (а) и эффекта Вертхайма (б) при скручивании

1.2. Природа магнитострикции

Рассмотрим физические основы этих процессов. При намагничивании в ферромагнетике наблюдается изменение его формы и размеров, т.е. возникают упругие силы деформации, поэтому при оценке общего энергетического состояния следует учитывать четыре вида различных энергий в ферромагнетике [9, 10]. Магнитострикция возникает при температурах ниже точки Кюри T_C благодаря действию обменных и магнитных сил связи.

Обменная энергия

$$E_{\text{обм}} = -2 \sum_{ij} A_{ij} (\vec{s}_i \vec{s}_j), \quad (1)$$

где A_{ij} – обменный интеграл для атомов i и j , зависящий от отношения постоянной решетки a к эффективному радиусу r 3d-уровня; φ_{ij} – угол между векторами спиновых моментов $\vec{s}_i$ и $\vec{s}_j$.

Энергия кристаллографической анизотропии

$$E_K = K_0 + K_1 \alpha^2, \quad (2)$$

где K_1 – константа анизотропии; α – угол между направлением намагниченности и кристаллографическим направлением.

Энергия магнитострикционной деформации

$$E_\lambda = \frac{E \lambda_s^2}{2}, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга; λ_s – магнитострикция насыщения.

Магнитоупругая энергия (для случая изотропной магнитострикции)

$$E_\sigma = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \varphi, \quad (4)$$

где σ – действующие напряжения; $\cos \varphi$ – направляющий косинус, учитывающий направление

намагничивания и направление действующей силы.

Под действием этих энергий происходит изменение объема и формы ферромагнетика [10]. Рассмотрим явление магнитострикции на примере железа.

1.3. Спонтанная (объемная) магнитострикция

Если охладить шар, находящийся в парамагнитном состоянии выше точки Кюри $T > T_C$ (спиновые магнитные моменты находятся в хаотическом состоянии), то в момент перехода точки T_C возникает обменная энергия (обменное взаимодействие электронов сопровождается тем, что спиновые моменты электронов устанавливаются параллельно друг другу, возникает спонтанная, или самопроизвольная, намагниченность), и парамагнитный шар изменит свой радиус (рис. 2, а), что приводит к изменению объема $\Delta V/V$, т.е. спонтанной (объемной) магнитострикции.

Шар становится ферромагнитным, и его размер растет. В этот же момент (при переходе через точку Кюри) происходит фазовый переход II рода, и с появлением спонтанной магнитострикции возникают упругие волны в ферромагнетике, которые могут быть использованы для проведения контрольных операций. Например, таким образом, с использованием генерации продольных волн и электромагнитно-акустического преобразования контролируют толщину горячего проката металла при его локальном охлаждении водой [11].

1.4. Энергия кристаллографической анизотропии

Одновременно с возникновением спонтанной магнитострикции ниже точки Кюри в действие вступают магнитные силы решетки, имеющие анизотропию, и ферромагнитный шар превращается в эллипсоид (рис. 2, а).

Чем ниже будет температура, тем сильнее проявят себя анизотропные магнитные силы. Для различных кристаллографических направлений железа магнитострикция будет иметь различные закономерности изменения при намагничивании (рис. 3).

Физические свойства поликристалла, в том числе магнитострикция, обусловлены свойствами составляющих его зерен. Если размеры зерен малы по сравнению с размером всего поликристалла, а их ориентация

Рис. 2. Магнитострикционные эффекты в однодоменном кристалле в виде шара

Рис. 3. Магнитострикция в монокристалле железа для различных кристаллографических направлений [10] и в поликристаллическом армко-железе

хаотична, то свойства такого поликристалла будут изотропны, а кривая магнитострикции, например, армко-железа по виду будет близка к кристаллографическому направлению [110] (см. рис. 3), т.е. λ имеет начальный положительный участок и далее отрицательный.

1.5. Линейная магнитострикция и магнитострикция парапроцесса

Поместим эллипсоид (см. рис. 2, а) в растущее магнитное поле H . Вектор намагниченности M начнет поворачиваться, и, соответственно, эллипсоид изменит свою форму и положение в пространстве (линейная магнитострикция (см. рис. 2, б)). С увеличением поля линейная магнитострикция растет и достигает насыщения λ_s в поле H_s . В полях выше технического насыщения $H > H_s$ в области парапроцесса намагниченность получает приращение ΔM_s , и эллипсоид незначительно меняет свой объем (см. рис. 2, в) (магнитострикция парапроцесса).

Рассматриваемый случай однодоменного состояния является модельным. В реальных ферромагнетиках ниже точки Кюри образуется многодоменная структура, которая в виде модельных представлений Ландау–Лившица [12] приведена на рис. 4.

Ферромагнетик разбивается на отдельные магнитные домены, каждый из которых намагничен до насыщения. В железе образуются основные, 180-градусные, и замыкающие (снижающие магнитостатическую энергию), 90-градусные, домены. Схематическая картина изменения ориентации магнитных моментов внутри 180-градусной доменной границы Блоха (переходного слоя между доменами) представлена на рис. 4, б. С появлением замыкающих 90-градусных доменов возникает энергия магнитострикционной деформации (см. раздел 3).

При намагничивании происходит изменение объема доменов и направления намагниченности в каждом из них, но на изменение энергии магнитострикционной деформации влияет только изменение объема 90-градусных доменов. Магнитострикционную деформацию в 180-градусных доменных стенках не рассматривали в силу ее малости.

2. Влияние изменений структуры металла и напряженно-деформированного состояния

Изменение структурного состояния при внешнем воздействии (например, термообработка, деформация) сопровождается изменением всех видов энергий, рассмотренных здесь, и, соответственно, доменной структуры ферромагнетика, что отражается на магнитоупругих характеристиках (рис. 5) [14].

Магнитострикция чувствительна к структурным изменениям, происходящим при термической

Рис. 4. Структура плоскопараллельных 180-градусных и замыкающих 90-градусных доменов в магнитоодноосном кристалле (а) и схема переходного слоя 180-градусной доменной границы (б) [13]

Рис. 5. Влияние термической обработки (закалка (а, б) и отпуск (в, г)) на магнитострикцию конструкционной стали 34ХНЗМ и ее зависимости от режимов термообработки (при определенных значениях индукции)

обработке; следовательно, магнитоупругие параметры также должны чувствовать изменения, происходящие в структуре материала, т.е. магнитострикцию и магнитоупругие параметры можно использовать для оценки структурных изменений в ферромагнитных материалах, например, при закалке (рис. 5, а, б) и отпуске (рис. 5, в, г).

2.1. Формирование магнитной текстуры

Действие упругих деформаций сопровождается формированием особой доменной структуры (так называемой магнитной текстуры), которая определяет процессы намагничивания и перемагничивания в ферромагнетике.

Рассмотрим влияние отдельных видов нагружения и их комбинаций на результирующую намагниченность материала с положительной магнитострикцией $\lambda > 0$ (рис. 6). В ненагруженном размагниченном состоянии векторы магнитных моментов доменов ориентированы в ферромагнетике хаотично, и их сумма (результирующая намагниченность M) равна нулю. Под действием магнитного поля H векторы магнитных моментов доменов начинают перестраиваться на направление поля (ось z на рис. 6, а), и результирующая намагниченность, меняясь по кривой намагничивания, принимает некоторое значение $M \neq 0$.

При воздействии одноосного растяжения ($\lambda\sigma_z > 0$) формируется магнитная текстура с преимущественной ориентацией магнитных моментов доменов вдоль направления приложения нагрузки. Поэтому для достижения некоторой величины намагничивания требуется приложить меньшее магнитное поле относительно ненагруженного состоя-

ния. Таким образом, при намагничивании в поле H (недостаточном для насыщения) после приложения растягивающей нагрузки результирующая намагниченность будет на $\Delta M_{\sigma}^{\parallel}$ больше, чем в случае намагничивания в ненагруженном состоянии (рис. 6, б). В этом случае при перестройке доменной структуры возникает преимущественное направление векторов намагниченности типа «ось легкого намагничивания», и процессы перемагничивания в направлении действия напряжений облегчаются.

При действии соосных с полем сжимающих напряжений ($\lambda\sigma_z < 0$) формируется магнитная текстура типа «плоскость легкого намагничивания».

Векторы магнитных моментов доменов $\delta\vec{M}$ стремятся ориентироваться в плоскости, перпендикулярной направлению приложения нагрузки (рис. 6, в). Поэтому при намагничивании полем H после приложения нагрузки результирующая намагниченность будет на $\Delta M_{\sigma}^{\parallel}$ меньше, чем при намагничивании в ненагруженном состоянии, что приводит к затруднению процессов перемагничивания.

При двухосном растяжении, когда одно из направлений нагружения совпадает с направлением намагничивания (рис. 6, г), растягивающие напряжения способствуют формированию текстур типа «ось легкого намагничивания» вдоль осей y и z . Одна будет препятствовать повороту векторов магнитных моментов доменов к направлению поля, а вторая способствовать этому. Поэтому изменения результирующей намагниченности будут определяться величиной приложенного поля и значениями напряжений σ_y и σ_z . Симметричное растяжение

($\sigma_y = \sigma_z$) будет оказывать меньшее влияние на магнитные характеристики по сравнению с одноосным растяжением.

В случае двухосного сжатия (рис. 6, д) сжимающие напряжения способствуют формированию текстур типа «плоскость легкого намагничивания» в плоскостях xy и xz , пересечением которых является ось x . Фактически получаем «ось легкого намагничивания», ортогональную направлению магнитного поля. Поэтому за счет преимущественного распределения направлений векторов $\delta\vec{M}$ вдоль оси x результирующая намагниченность уменьшится на $\Delta M_{\sigma}^{\perp}$.

Если напряжения по двум осям имеют разный знак, а одна из нагрузок прикладывается вдоль направления намагничивания (рис. 6, е), то «ось легкого намагничивания», создаваемая растягивающей нагрузкой, будет лежать в «плоскости легкого намагничивания», образованной в результате действия сжимающей нагрузки. При $\sigma_z > 0$ получим $\Delta M_{\sigma}^{\parallel} > 0$, а в случае $\sigma_z < 0$ – $\Delta M_{\sigma}^{\perp} < 0$. То есть изменения намагниченности будут зависеть главным образом от той нагрузки, которая направлена вдоль направления намагничивания, как это было показано на рис. 6, б и в.

Касательные напряжения τ , возникающие при кручении, эквивалентны паре нормальных взаимно перпендикулярных растягивающих и сжимающих напряжений, расположенных под углом 45° к оси образца (рис. 6, ж). С точки зрения формирования магнитной текстуры данный вид нагружения схож со случаем, разобранным на рис. 6, е. Векторы магнитных моментов доменов $\delta\vec{M}$ будут стремиться выстроиться под углом 45° к оси образца вдоль направления растягивающих напряжений. После намагничивания в магнитном поле H вектор результирующей намагниченности будет располагаться под углом α к направлению приложенного магнитного поля. Угол α находится в интервале от 0 до 45° и зависит от величин H и τ . Очевидно, что в таком случае проекция вектора результирующей намагниченности на ось z ($pr_z M$) будет меньше величины результирующей намагниченности в ненагруженном состоянии на некоторую величину ΔM_{τ} . Чем больше τ и, следовательно, угол α , тем меньше $pr_z M$.

Для материалов с $\lambda < 0$ напряжения окажут противоположное (относительно описанных выше) действие на преимущественную ориентацию магнитных моментов доменов.

Рис. 6. Схематичное представление влияния напряжений на намагниченность для различных схем нагружения $\lambda > 0$:

а – без нагрузки, $\sigma = 0$; б – растяжение, $\sigma > 0$; в – сжатие, $\sigma < 0$; г – двустороннее растяжение; д – двустороннее сжатие; е – двустороннее растяжение-сжатие; ж – кручение

Рис. 7. Полевые зависимости магнитострикции при упругом сжатии и растяжении стали 45

2.2. Магнитострикция различных сталей

В свою очередь перестройка доменной структуры будет влиять на поведение магнитострикции. Для сплавов на основе железа при растяжении магнитострикция уменьшается для любого значения поля, а при сжатии растет. Наглядно это видно на рис. 7 на примере полевых зависимостей продольной магнитострикции при различных значениях приложенных напряжений растяжения и сжатия для стали 45 [15]. Здесь и везде далее в испытаниях, выполненных авторами обзора, измерения магнитных характеристик осуществляли с помощью гистерезисграфа Remagraph C-500 непосредственно в процессе деформирования образцов растяжением или сжатием на испытательной машине. Внутреннее поле H в рабочей части образца измеряли с помощью потенциометра, а индукцию – специальной катушкой с компенсацией воздушного зазора, благодаря чему получали информацию о магнитных

Рис. 8. Полевые зависимости продольной магнитострикции сталей с различным химическим составом

свойствах материала. Для измерений магнитострикции использовали классическую мостовую схему с термокомпенсацией на основе фольговых тензорезисторов.

В ненагруженном состоянии магнитострикция стали 45 положительна в диапазоне напряженности магнитного поля от 0 до 180 А/см и отрицательна в более сильных полях. При действии растягивающих напряжений положительный участок уменьшается, и полевая зависимость магнитострикции становится целиком отрицательной при $\sigma > 100$ МПа.

Повышение степени легирования стали сопровождается изменением полевой зависимости магнитострикции (рис. 8). В легированных сталях переход магнитострикции к отрицательным значениям происходит в более сильных магнитных полях (например, для стали 08Г2Б это поле почти в 3 раза больше, чем для стали 45). При уровне суммарного легирования более 5 % полевая зависимость магнитострикции остается положительной вплоть до насыщения. Это связано с ростом энергии магнитострикционной деформации (см. раздел 2) в легированных сталях.

Действие растягивающих напряжений в легированных сталях, так же как и для рассмотренной стали 45, приводит к снижению магнитострикции. При этом значения магнитострикции могут переходить в отрицательную область при некоторой величине растягивающих напряжений, либо (в сильно легированных сталях) зависимость $\lambda(H)$ может оставаться целиком положительной, независимо от величины приложенных напряжений. В качестве примера на рис. 8 приведены полевые зависимости продольной магнитострикции стали 15XH4Д при напряжениях -150 и $+150$ МПа. Аналогичную положительную полевую зависимость продольной магнитострикции стали 13XM4 во всем исследованном диапазоне растягивающих напряжений (до 250 МПа) наблюдали в работе [16].

3. Процессы намагничивания и перемангничивания и возможные параметры оценки упругих деформаций

Изменение напряженно-деформированного состояния сопровождается изменением всех видов энергий в ферромагнетике, что в свою очередь влияет на протекание процессов перемангничивания в нем. Для практической оценки действующих напряжений в ферромагнитных материалах требуется определить

Рис. 9. Петли магнитного гистерезиса (а), дифференциальная магнитная проницаемость (б) и величина ее пика (в) стали 45 в зависимости от напряжений растяжения и сжатия

такой структурочувствительный параметр (или комбинацию из нескольких параметров), который монотонно изменяется от величины напряжений и имеет достаточно высокую чувствительность.

На рис. 9, а показано, как действие различных по знаку напряжений меняет вид петель гистерезиса: под действием растягивающих напряжений форма петли становится более «прямоугольной», а под действием сжимающих – «наклонной». Об особенностях протекания процессов перемагничивания в стали можно судить по полевым зависимостям дифференциальной магнитной проницаемости (рис. 9, б), которые характеризуют процессы подвижности доменных границ.

Растягивающие упругие деформации формируют текстуру типа «ось легкого намагничивания» (см. рис. 6), при этом высота пиков $\mu_{\text{диф}}$ повышается, а их местоположение – поле максимальной дифференциальной магнитной проницаемости $H_{\mu_{\text{диф max}}}$ – изменяется незначительно (по сравнению со случаем сжатия). Действительно, на начальном этапе упругого растяжения, примерно до 80...100 МПа, наблюдается снижение значений H_c (рис. 10, сталь 45), а далее коэрцитивная сила начинает увеличиваться.

Природа формирования минимума на зависимости $H_c(\sigma)$ определяется двумя возможными факторами. При деформациях растяжения примерно в 80...100 МПа меняется знак магнитострикции, и положительная область на зависимости $\lambda(\sigma)$ исчезает (см. рис. 7), что приводит к изменению типа текстуры, связанной с переходом от «оси легкого намагничивания» к «плоскости легкого намагничивания». Второй фактор можно связать с высказанной в работе [17] гипотезой С. В. Вонсовского о том, что при определенных условиях могут локально облегчаться процессы перемагничивания за счет

компенсации в некоторых областях части микронапряжений действующими напряжениями. При этом будет увеличиваться подвижность доменных границ, и перемагничивание будет осуществляться более крупными скачками Баркгаузена. Экспериментальное подтверждение второго фактора приведено в работах [18 – 20], где на различно термообработанных и пластически деформированных образцах железа и конструкционных сталей показано, что величина приложенных напряжений, при которых коэрцитивная сила минимальна, коррелирует со средней величиной внутренних микронапряжений.

При сжатии формируется текстура «плоскость легкого намагничивания», процессы перемагничивания затрудняются (см. рис. 6). Максимумы пиков $\mu_{\text{диф}}$ смещаются в область более сильных магнитных полей (см. рис. 9, б), коэрцитивная сила увеличивается (см. рис. 10). Для процессов перемагничи-

Рис. 10. Относительные изменения коэрцитивной силы при упругом одноосном деформировании для сталей различной степени легирования

вания, по-видимому, будет характерно перемагничивание мелкими скачками Баркгаузена.

Формирование подобных экстремумов на зависимости $H_c(\sigma)$ (см. рис. 10) можно наблюдать и для других низколегированных сталей [15, 21, 22].

Таким образом, отсутствие монотонности в изменении коэрцитивной силы при одноосном упругом растяжении не позволяет использовать ее для оценки действующих одноосных напряжений.

Поскольку при повышении степени легирования стали магнитострикция при растяжении не переходит в отрицательную область, то следует ожидать, что для легированных сталей зависимости будут монотонными. Действительно (см. рис. 10), по мере повышения степени легирования (стали 11ХНЗД, 15ХН4Д) закономерности $H_c(\sigma)$ становятся монотонными во всем диапазоне упругих деформаций. Из рис. 10 также следует, что стали, имеющие различную степень легирования, различное структурное состояние и фазовый состав, обладают различной чувствительностью коэрцитивной силы к упругим деформациям.

При действии на ферромагнетик упругих деформаций растяжения в перпендикулярном направлении развивается деформация сжатия, поэтому следует ожидать, что при растяжении коэрцитивная сила, измеренная в перпендикулярном направлении, должна вести себя подобно продольной коэрцитивной силе при сжатии. Рис. 11 иллюстрирует результаты измерения коэрцитивной силы с помощью накладных преобразователей коэрцитиметра КРМ-Ц во взаимно перпендикулярных направлениях. Возникающие напряжения сжатия приводят к монотонному росту коэрцитивной силы, измеренной в направлении, перпендикулярном действующему

напряжению растяжения. В то же время зависимость перпендикулярных значений коэрцитивной силы от сжимающих напряжений меняется незначительно или остается неоднозначной в данной области.

Таким образом, если вид одноосного нагружения известен (растяжение или сжатие), то величина сжимающих напряжений может быть оценена по коэрцитивной силе, измеренной вдоль направления сжатия, а величина растягивающих напряжений – по коэрцитивной силе, измеренной перпендикулярно к направлению растяжения.

В общем случае одноосного деформирования, когда неизвестно, в состоянии растяжения или сжатия находится материал, в качестве параметра для оценки действующих напряжений может быть использовано явление наведенной магнитной анизотропии, т.е. измерение разности коэрцитивных сил в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 11, б). Данный способ подходит для большинства конструкционных сталей [23 – 29]. Как видно из рис. 11, б, зависимость разности значений коэрцитивных сил от напряжений стали класса прочности Х70 не только монотонна, но и близка к линейной (коэффициент корреляции 0,98). Однако данный способ требует выполнения двух измерений, которые будут затруднены для выполнения одним преобразователем в случае различия геометрии поверхностей контроля в разных направлениях. Дополнительно следует учитывать, что в процессе изготовления (например, при холодной прокатке) в изделии может образоваться исходная текстура, приводящая к анизотропии магнитных свойств в ненагруженном состоянии (см., например, рис. 3 в работе [25]).

Рис. 11. Продольная $H_c^{\parallel}$ и поперечная $H_c^{\perp}$ коэрцитивные силы (а) и их разность (б) в зависимости от одноосных напряжений для стали класса прочности Х70

Рис. 12. Относительные изменения остаточной индукции (а) и максимальной магнитной проницаемости (б) различных сталей при упругом одноосном деформировании

Другим широко используемым в практике магнитного структурного анализа параметром является остаточная индукция. Довольно часто закономерности изменения остаточной индукции (рис. 12, а) близки по виду к обратным закономерностям изменения коэрцитивной силы от упругих деформаций.

Из приведенных на рис. 12, а зависимостей остаточной индукции от напряжений следует, что она как параметр контроля имеет те же ограничения по ее применению, что и коэрцитивная сила. Остаточная индукция может быть успешно использована для оценки деформаций сжатия, а растяжения — только для легированных сталей, и то для стали 15ХН4Д в области больших напряжений (300...800 МПа) контроль невозможен.

Исследования максимальной магнитной проницаемости, определяемой по кривой намагничивания (рис. 12, б), свидетельствуют, что данный параметр имеет чувствительность к одноосным деформациям, аналогичную остаточной индукции или превышающую ее, с теми же ограничениями по возможности использования как параметра контроля.

Измерение остаточной индукции на крупных объектах сложной геометрии в общем случае является технически сложной задачей из-за необходимости учета влияния размагничивающего фактора и его изменений при деформации. Между тем этот параметр нашел применение в неразрушающем контроле механических свойств (твердости, временного сопротивления, относительного удлинения) листового проката непосредственно в процессе его движения в технологическом потоке [30 – 32], поэтому этот опыт может быть использован при оценке степени натяжения листа при прокатке.

Существенное расширение возможностей применения остаточной индукции для оценки напряженно-деформированного состояния дает изучение спектров магнитной жесткости, характеризующих распределение критических полей в намагничиваемом или перемагничиваемом объеме контролируемого ферромагнетика.

Для изучения распределения критических полей в образцах при намагничивании и перемагничивании измеряли значения остаточных индукций с кривой намагничивания $B_r(H)$ и с нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса $B_d^-(H)$. Кривые, полученные дифференцированием $B_r(H)$ и $B_d^-(H)$ по H , отражают распределения критических полей данного ферромагнетика, которые называют спектрами магнитной жесткости [33]. Площади под кривыми характеризуют относительные объемы ферромагнетика, намагнитившегося (первичный спектр магнитной жесткости) или перемагнитившегося (вторичный спектр) в поле заданной напряженности H . Положения максимумов кривых соответствуют магнитным полям, в которых происходят наиболее интенсивные процессы необратимого намагничивания или перемагничивания.

На рис. 13 приведены изменения спектров магнитной жесткости стали 15ХН4Д при испытаниях на растяжение и сжатие [34]. Положения максимумов полевых зависимостей спектров немного превышают значения коэрцитивной силы при соответствующих упругих напряжениях. При сжатии происходит смещение максимумов спектров магнитной жесткости в область более сильных полей, высота максимумов спектров магнитной жесткости уменьшается, а ширина возрастает. При увеличении рас-

Рис. 13. Первичные (а) и вторичные (б) спектры магнитной жесткости стали 15ХН4Д и деформационные зависимости получаемых из них параметров (в, з)

тягивающих напряжений максимумы спектров смещаются в область более слабых полей, высота максимумов спектров магнитной жесткости увеличивается, а ширина уменьшается.

Проиллюстрируем возможность создания способа оценки напряжений растяжения в области 300...800 МПа для стали 15ХН4Д, где контроль напряжений по остаточной индукции практически невозможен (см. рис. 12). Используя вторичный спектр жесткости, считаем, что наиболее информативным для оценки больших напряжений представляется спектр, соответствующий деформации 600 МПа. Значение поля максимума H_p вторичного спектра жесткости при $\sigma = 600$ МПа (см. рис. 13, б) берем как базовую точку для анализа значений остальных спектров жесткости. Прделав эту операцию для всех спектров, получаем однозначную зависимость значений $\Delta B_d^- / 2\Delta H B_{r \max}$ от величины напряжений (см. рис. 13, в).

Предлагаемым алгоритмом контроля будет измерение остаточной индукции после цикла намагничивания, получение состояния $2\Delta H B_{r \max}$, размагничивание по нисходящей ветви петли гистерезиса до величины поля $H_{p\sigma=600}$, уменьшение поля до нуля и измерение остаточной индукции B_d^- [35]. Такой алгоритм измерений фактически позволил исключить из процесса измерений вклад магнитных фаз, обладающих низкими критическими полями.

В приведенном примере получен параметр, имеющий высокую чувствительность к растяги-

вающим напряжениям, но слабо зависящий от напряжений сжатия. Варьируя поля H_p , можно подобрать параметры для оценки напряжений в требуемом диапазоне контроля.

Используя спектры магнитной жесткости, можно объяснить возможность использования того или иного параметра для оценки напряжений. Так, например, на трубных сталях показана возможность использовать для оценки напряженно-деформированного состояния параметры кривой «коэрцитивного возврата» [36], т.е. кривой намагничивания, начинающейся в точке $(H, B) = (H_c, 0)$. В частности, получены монотонные зависимости намагниченности, достигаемой по данной кривой в нулевом поле, а также показана возможность выбрать индукцию, для достижения которой величина требуемого поля монотонно изменяется от напряжений. Фактически речь идет о величине пика вторичного спектра магнитной жесткости, положение которого близко к коэрцитивной силе. Такая зависимость для стали 15ХН4Д (см. рис. 13, в) оказалась близка к линейной для всего исследованного интервала упругих деформаций, хотя и несколько проигрывала приведенной на рис. 13, в в чувствительности к растягивающим напряжениям.

Для легированной стали 11ХНЗД на рис. 14, а, б представлена эволюция предельных и частных петель магнитного гистерезиса при одноосном сжатии и растяжении. Можно видеть, что, во-первых,

Рис. 14. Петли магнитного гистерезиса стали 11ХНЗД (а – предельные, б – при $B_{max} = 0,05$ Тл) и соответствующие им значения коэрцитивной силы (в, з)

петли гистерезиса, измеренные при различных напряжениях, чувствительны к действующим напряжениям; во-вторых, есть области, в которых они пересекаются, и в этих областях индукция обладает слабой чувствительностью к действию напряжений [37, 38]. Таким образом, определенные в этих областях индукций магнитоупругие характеристики будут слабо чувствительны к упругим деформациям.

Аналогично параметрам предельной петли магнитного гистерезиса для целей контроля можно рассматривать параметры частных петель, полученных при перемагничивании в полях, не достаточных для насыщения [39]. На рис. 14 можно видеть, что действующие напряжения по-разному влияют на процессы перемагничивания в слабых и сильных магнитных полях (аналогичные эффекты наблюдали на стали 34ХНЗМ [40]). Более наглядно это можно проследить на примере коэрцитивной силы. Закономерности изменения коэрцитивной силы от напряжений в сильных (рис. 14, в) и слабых (рис. 14, з) полях практически противоположны, т.е. выбор величины намагниченного поля влияет на закономерности магнитоупругих параметров и чувствительность этого параметра к упругим деформациям.

Относительные изменения параметров, измеренных по частным циклам гистерезиса в слабых магнитных полях, могут быть более информативными, чем традиционные магнитные характеристики, получаемые из предельных петель гистерезиса. Для описания начальной кривой намагничивания и симметричной петли гистерезиса в слабых магнитных полях используют закон Рэлея [7, 41],

согласно которому начальный участок кривой намагничивания описывается зависимостью

$$M(H) = \chi_{нач} H + b H^2, \quad (5)$$

где $\chi_{нач}$ – начальная восприимчивость; b – коэффициент Рэлея. Для ряда сталей коэффициент Рэлея имеет более высокую чувствительность к одноосным растягивающим и сжимающим напряжениям по сравнению с другими интегральными гистерезисными параметрами [42], но, являясь расчетным параметром, он имеет и более высокую относительную погрешность, которая складывается из относительных погрешностей определения намагниченности и поля.

Как и другие магнитные характеристики, для некоторых сталей коэффициент Рэлея может иметь экстремум в упругой области растяжения. Хотя, например, изменения этого параметра для стали 15ХН4Д под действием упругих напряжений монотонны (рис. 15), а чувствительность превосходит чувствительность коэрцитивной силы (см. рис. 10).

Рис. 15. Влияние напряжений на коэффициент Рэлея стали 15ХН4Д

4. Оценка изменений напряжений в слоях многослойных изделий

В практике неразрушающего контроля возникают проблемы оценки упругих деформаций в отдельных слоях многослойных материалов (например, поверхностно упрочненных).

В простейшем случае петля гистерезиса двухслойного ферромагнетика, слою которого обладают различной магнитной жесткостью, имеет характерный вид, отличающийся от петель однородных материалов, в частности, наличием двух перегибов [43]. В качестве примера на рис. 16, а представлены петли для образца, составленного из отожженной стали Ст3 ($H_c = 1,8$ А/см) и закаленной стали 45, обладающей значительно большей коэрцитивной силой ($H_c = 13,6$ А/см) [44].

Положение перегибов на петле составного ферромагнетика соответствует коэрцитивным силам отдельных слоев. На полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости, рассчитанной из нисходящей ветви гистерезиса, эти перегибы проявляются в виде двух пиков (рис. 16, б), положение которых соответствует положению пиков дифференциальной магнитной проницаемости отдельных слоев. Соотношение высот пиков определяется, помимо непосредственно величин магнитной проницаемости составляющих материалов, соотношением перемагничиваемых объемов (толщин слоев). В процессе деформации перегибы на петлях

(рис. 16, в) и, соответственно, поля обоих пиков (рис. 16, г) смещаются аналогично тому, как это происходит у однослойных материалов. На рис. 16, в, г для наглядности приведены только три точки нагружения: исходное состояние, половина от предела прочности и непосредственно перед разрушением образца.

Наибольшие изменения пиков наблюдаются для магнитотвердой компоненты, что, во-первых, связано с описанным ранее явлением – слабой зависимостью коэрцитивной силы (а следовательно, и поля $H_{\text{диф max}}$) от напряжений у низкоуглеродистых сталей. Во-вторых, разрушение образца происходит по закаленной стали 45, обладающей меньшей упругостью, т.е. при одинаковых значениях деформации величина напряжений в закаленном слое значительно выше. Перед разрушением пик, соответствующий этому слою, практически полностью исчезает, что можно использовать в качестве индикатора приближения напряжений к пределу прочности.

Разобраный пример является модельным, поскольку образец соединен механически из двух различных компонентов с четкой границей раздела. На практике подобные многослойные системы могут быть получены, например, в процессе сварки взрывом, трением или поверхностной обработки. При этом между основными компонентами будет располагаться переходный слой с неоднородными характеристиками. В качестве примера на рис. 17 приведены зависимости дифференциальной магнитной проницаемости стали 20, упрочненной газовой цементацией, из работы [45].

Между пиками, соответствующими магнитомягкой сердцевине (в ненагруженном состоянии $H_{\text{диф max}} = 4,1$ А/см) и более магнитотвердому поверхностному цементированному слою (в ненагруженном состоянии $H_{\text{диф max}} = 12,3$ А/см), можно выделить пик, соответствующий переходному слою. Наиболее заметен он становится при растяжении.

Упругое сжатие приводит к значительному снижению высоты пиков магнитной проницаемости сердцевины и переходного слоя. Под действием упругого растяжения магнитная проницаемость основы тоже уменьшается, тогда как проницаемость переходного слоя не снижается, как при сжатии,

Рис. 16. Предельные петли магнитного гистерезиса (а, в) и полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости (б, г) для составного образца из сталей Ст3 и 45 и его отдельных компонентов (а, б), а также для составного образца при одноосном растяжении (в, г)

Рис. 17. Влияние напряжений на полевую зависимость дифференциальной магнитной проницаемости стали 20 после цементации и закалки в масло

а заметно возрастает и при напряжениях около 400 МПа практически сравнивается с проницаемостью сердцевин. При этом пик цементованного слоя и пик переходного слоя сливаются, образуя один максимум. Величина пика дифференциальной магнитной проницаемости, соответствующего сердцевине, меняется хотя и существенно, но монотонно, вследствие чего она непригодна для оценки приложенных напряжений, если неизвестен вид нагружения (растяжение или сжатие). Изменения пиков проницаемости, соответствующих поверхностной зоне и переходному слою, напротив, демонстрируют монотонный характер и могут использоваться для определения схемы нагружения и величины приложенных напряжений: одновременная регистрация снижения проницаемости переходной зоны и рост проницаемости поверхностного слоя указывают на упругое сжатие; рост проницаемости переходной зоны и снижение проницаемости поверхностного слоя – на упругое растяжение.

Одна из проблем использования дифференциальной проницаемости заключается в некорректности операции численного дифференцирования: общая погрешность метода может неограниченно возрастать при уменьшении шага измерения. Даже небольшая ошибка измерения поля или

намагниченности способна привести к значительным искажениям результата. Для решения этой проблемы существует огромное количество методов фильтрации помех, выбора шага дифференцирования, сглаживания или аппроксимации данных гладкими функциями, перечисление которых выходит за рамки данного обзора.

5. Оценка сложнапряженного состояния

В реальных условиях конструкции подвержены не только одноосным нагрузкам. На рис. 18 приведены зависимости относительных изменений коэрцитивной силы сталей марок Ст3, 09Г2С и зарубежного аналога стали 10 при упругом симметричном ($\sigma_x = \sigma_y$) и асимметричном ($\sigma_x = -\sigma_y$) двухосном нагружении растяжением/сжатием [46, 47]. В этих экспериментах измерения коэрцитивной силы осуществлялись в направлении напряжения σ_x .

Симметричное сжатие способствует формированию текстур «плоскость легкого намагничивания», пересечение которых можно представить в виде наиболее легкой оси, направленной перпендикулярно к плоскости, в которой действуют напряжения. Это затрудняет процессы перемагничивания и приводит к значительному росту коэрцитивной силы (рис. 18, а).

При двухосном растяжении возникают предпосылки к формированию текстур типа «ось легкого намагничивания» в двух перпендикулярных направлениях. Независимо от знака магнитострикции получится, что одна из текстур способствует облегчению процессов перемагничивания, а вторая препятствует этим процессам. В итоге симметричное двухосное растяжение (рис. 18, а) оказывает гораздо меньшее влияние на коэрцитивную силу, чем одноосное растяжение. Результаты Р. Лэнгмана [46] в случае двухосного растяжения противоречат

Рис. 18. Влияние симметричного (а) и асимметричного (б) двухосного нагружения на коэрцитивную силу различных сталей

модельным представлениям, что может быть обусловлено недостатками схемы его эксперимента: двухосное растяжение в зоне измерений создавали четырехточечным изгибом в каждом плече крестообразного склеенного композита бакелит-сталь. Такой подход вызывает вопросы об однородности деформаций в зоне измерений и, как следствие, формировании преимущественной ориентации векторов намагниченности в одном из плеч образца. Поскольку измерения в каждом плече проводились не одновременно, то возможно, что в момент измерения флуктуационно в этом же плече формировался тип текстуры, аналогичный предыдущему случаю. Вероятно, таким способом можно объяснить противоречивость результатов работы [46].

При асимметричном двухосном нагружении создаются предпосылки для формирования оси и плоскости легкого намагничивания таким образом, что ось лежит в плоскости. В этом случае влияние напряжений на процессы перемагничивания подобны влиянию одноосного деформирования вдоль направления магнитных измерений. Так, в направлении сжатия ($\sigma_x < 0$, $\sigma_y > 0$) наблюдается значительный и монотонный рост коэрцитивной силы, а в направлении растяжения ($\sigma_x > 0$, $\sigma_y < 0$) изменения коэрцитивной силы неоднозначны (рис. 18, б).

Авторам не удалось найти большого числа подобных исследований на конструкционных сталях, но описанные процессы находят подтверждение в экспериментах с технически чистым железом [48] и электротехническими сталями [49 – 53].

Исследования возможностей оценки объемного (трехосного) напряженного состояния ограничиваются частными случаями ввиду сложности проведения подобных экспериментов. Например, в работах [22, 54] для получения трехосного напряженного состояния использовано комбинированное

нагружение полых цилиндрических образцов одноосным растяжением (или сжатием), кручением и внутренним давлением. Такая схема позволила получить взаимно независимое изменение величин главных напряжений, однако она не дает возможность провести испытания на всестороннее растяжение или всестороннее сжатие, т.е. знак одного из главных напряжений будет отличаться от двух других.

При комбинировании растяжения (сжатия) с кручением действие касательных напряжений ослабляет влияние нормальных напряжений на магнитные характеристики (на рис. 19 для примера приведена коэрцитивная сила). Это объясняется тем, что растягивающие напряжения стремятся повернуть векторы магнитных моментов доменов вдоль оси образца, сжимающие – в плоскость, перпендикулярную оси, а за счет действия касательных напряжений вектор намагниченности будет расположен под некоторым промежуточным углом. Дополнительное воздействие внутренним давлением оказывает аддитивное влияние на магнитные характеристики: коэрцитивная сила увеличивается, при этом вид ее зависимости от комбинации двух других видов нагружения практически не меняется.

В некоторых случаях напряженное состояние можно разделить на известную и неизвестную составляющие и использовать магнитные методы для оценки величины неизвестной составляющей. Например, часть напряжений, обусловленная внутренним давлением в трубе, может быть рассчитана, если давление, толщина стенки и диаметр трубы известны. В работе [55] рассмотрены зависимости анизотропии коэрцитивной силы от величины внутреннего давления и обсуждается возможность привести условия измерения коэрцитивной силы на трубе под давлением к случаю с нулевым внутренним давлением. В работе [56] изучено влияние плосконапряженного состояния на магнитные характеристики сплава 3 % Si-Fe в целях оценки напряженного состояния роторов определенной формы. Для определения распределения действующих напряжений используется численное моделирование, а магнитные характеристики позволяют оценить состояние детали в целом.

В данном обзоре не рассматривался метод оценки максимально действующих напряжений, основанный на запоминании изменений остаточной намагниченности под действием упругих деформаций (рас-

Рис. 19. Изменения коэрцитивной силы стали 09Г2С от действия растягивающих или сжимающих напряжений σ , касательных напряжений τ и внутреннего давления P

тяжения, сжатия, кручения и удара) [57 – 59], который реально является способом магнитного запоминания.

В целом же «метод магнитной памяти» в интерпретации А. А. Дубова [60] неоднократно критически оценивался российскими и зарубежными учеными [61 – 64]. Современный и исчерпывающий обзор возможностей и перспектив использования «метода магнитной памяти» выполнен в работе китайских ученых [64]. Авторы настоящего обзора высказывали сами [65] и согласны с выводами работы [64] о том, что на сегодняшний день «метод магнитной памяти» не в полной мере учитывает множество факторов, бесконтрольно влияющих на магнитное состояние объекта контроля (таких как температура, внешние магнитные и электромагнитные поля, магнитная предыстория, особенности влияния циклических нагрузок, вид и скорость нагружения, геометрические параметры контролируемого объекта), которые в свою очередь влияют на измеряемый в методе магнитной памяти магнитометрический параметр. Приведенная в работах [61, 66] статистика свидетельствует о том, что более чем 2/3 случаев магнитных аномалий, выявленных на реальных объектах, оказались не связанными с напряженно-деформированным состоянием конструкций, что еще раз подтверждает существование ограничений в заявленных возможностях «метода магнитной памяти».

Заключение

Обсуждена природа магнитоупругих эффектов с учетом основных видов энергий в ферромагнетике. Описаны модельные представления о формировании магнитных текстур в ферромагнитных материалах при различных видах их упругого деформирования.

На основе изучения магнитострикции в конструкционных сталях различной степени легирования рассмотрены возможности использования различных магнитоупругих параметров для неразрушающей оценки уровня напряжений в них. Оценка величины одноосных сжимающих напряжений по магнитным характеристикам является сравнительно простой задачей. Проблема оценки растягивающих напряжений в низколегированных сталях заключается в слабых или немонотонных зависимостях ряда магнитных характеристик от деформаций. Обсуждены возможные причины (и их экспериментальные подтверждения) возникновения таких зависимостей, связанные с компенсацией части микронапряжений приложенными растягивающими напряжениями, а также со сменой знака продольной магнитострикции при деформировании растяжением. Показаны способы решения задачи оценки упругих деформаций растяжения с использованием анизотропии коэрцитивной силы и параметров спектров магнитной жесткости.

Обсуждены вопросы возможности оценки напряженного состояния в отдельных слоях многослойных ферромагнетиков по параметрам пиков полевых зависимостей дифференциальных магнитных проницаемостей каждого из слоев.

Рассмотрены экспериментальные работы по влиянию двухосных и трехосных упругих деформаций на магнитные характеристики ферромагнитных материалов. Перечисленные результаты позволяют осуществлять оценку напряженного состояния в частных случаях, однако в общем виде задача определения произвольного напряженно-деформированного состояния магнитными методами на сегодняшний день остается не разрешенной.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-18-50253.

Библиографический список

1. Гуманюк М. Н. Магнитоупругие датчики в автоматике. Киев: Техника, 1972. 201 с.
2. Гинзбург В. Б. Магнитоупругие датчики. М.: Энергия, 1970. 72 с.
3. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 160 с.
4. Garshelis I. A Study of the inverse Wiedemann effect on circular remanence // IEEE Transactions on Magnetism. 1974. V. Mag-10, No. 2. P. 344 – 358.
5. Lahyaoui O., Lanfranchi V., Buiron N. et al. Effect of mechanical stress on magnetization and magnetostriction strain behavior of non-oriented Si-Fe steels at different directions and under pseudo-DC conditions // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2019. V. 60, No. 2. P. 299 – 312.
6. **Неразрушающий контроль:** справочник: в 8 т. / под ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В. В. Клюев, В. Ф. Мужикский, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. С. 19 – 375.
7. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: ИИЛ, 1956. 784 с.
8. Голямина И. П. Ультразвук. М.: Сов. энцикл., 1979. 400 с.
9. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с.
10. Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М.: Гостехиздат, 1957. 280 с.
11. Буденков Г. А., Гуревич С. Ю. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 5. С. 5 – 33.
12. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005. 656 с.
13. Кандаурова Г. С., Оноприенко Л. Г. Основные вопросы теории магнитной доменной структуры. Свердловск: УрГУ, 1977. 120 с.
14. Горкунов Э. С. Влияние термической обработки на магнитострикцию конструкционной стали 34ХН2М // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 105 – 108.
15. Горкунов Э. С., Субачев Ю. В., Поволоцкая А. М., Задворкин С. М. Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магни-

тостриктию в продольном и поперечном направлениях // Дефектоскопия. 2013. № 10. С. 40 – 52.

16. Jus A., Nowak P., Ginko O. Assessment of the magnetostrictive properties of the selected construction steel // Acta Physica Polonica A. 2017. V. 131, No. 4. P. 1084 – 1086.

17. Вонсовский С. В. Влияние слабых упругих напряжений на начальную обратимую восприимчивость ферромагнетиков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1947. Т. 17, вып. 12. С. 1094 – 1105.

18. Ничипурук А. П., Горкунов Э. С., Кулеев В. Г., Чарикова Н. И. Влияние структурных изменений при отпуске на обратимые процессы намагничивания в конструкционных сталях // Дефектоскопия. 1990. № 8. С. 68 – 75.

19. Ничипурук А. П., Носкова Н. И., Горкунов Э. С., Пономарева Е. Г. Влияние дислокационной структуры, формируемой пластической деформацией, на магнитные и магнитоупругие свойства железа и низкоуглеродистой стали // Физика металлов и металловедение. 1992. № 12. С. 81 – 87.

20. Кулеев В. Г., Царькова Т. П. Особенности зависимости коэрцитивной силы сталей от упругих растягивающих напряжений после пластических деформаций и термообработки // Физика металлов и металловедение. 2007. Т. 104, № 5. С. 479 – 486.

21. Горкунов Э. С., Субачев Ю. В., Поволоцкая А. М., Задворкин С. М. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 49 – 60.

22. Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Мушников А. Н. и др. Влияние механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55, № 3(325). С. 181 – 191.

23. Захаров В. А., Боровкова М. А., Комаров В. А., Мужикский В. Ф. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей // Дефектоскопия. 1992. № 1. С. 41 – 46.

24. Мужикский В. Ф., Попов Б. Е., Безлюдько Г. Я. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подземных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Контроль. Диагностика. 2000. № 9. С. 48 – 50.

25. Новиков В. Ф., Бахарев М. С., Нассонов В. В., Яценко Т. А. Измерение напряжений в стали с помощью коэрцитиметра // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2005. № 2. С. 89 – 94.

26. Елфимов А. В., Сальников А. В., Бирилло И. Н., Кузьбожев А. С. Экспериментальная проверка определения механических напряжений магнитным методом на трубном стенде из высокопрочной стали // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 3(105). С. 103 – 109.

27. Бердник М. М., Александров Ю. В., Агиней Р. В. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей // Наука в нефтяной и газовой промышленности. 2010. № 3. С. 2 – 6.

28. Бердник М. М., Александров Ю. В., Агиней Р. В. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей // Контроль. Диагностика. 2011. № 1. С. 22 – 26.

29. Новиков В. Ф., Яценко Т. А., Бахарев М. С. Зависимость коэрцитивной силы от одноосных напряжений (часть 2) // Дефектоскопия. 2002. № 4. С. 10 – 17.

30. Матюк В. Ф., Мельгуй М. А., Осипов А. А. и др. О возможности контроля механических свойств стали 50ХГФА импульсным магнитным методом // Дефектоскопия. 2003. № 9. С. 28 – 36.

31. Матюк В. Ф. Приборы магнитной структуро- скопии листового проката сталей в технологическом потоке производства // Неразрушающий контроль и диагностика. 2013. № 2. С. 3 – 28.

32. Мельгуй М. А. Многопараметровые методы магнитной структуро- скопии и приборы для их реализации (обзор). Ч. II. Импульсный магнитный многопараметровый метод и прибор ИМА-М для его реализации // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 11 – 20.

33. Дерягин А. В., Кандаурова Г. С., Шур Я. С. О природе магнитной жесткости в пластически деформированном сплаве марганец–галлий // Физика металлов и металловедение. 1973. Т. 35, № 2. С. 286 – 293.

34. Горкунов Э. С., Якушенко Е. И., Задворкин С. М. и др. Влияние упругой деформации сжатием, растяжением, кручением на распределение критических магнитных полей в стали 15ХН4Д // Дефектоскопия. 2010. № 2. С. 3 – 13.

35. Щербинин В. Е., Горкунов Э. С. Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 264 с.

36. Костин К. В., Царькова Т. П., Ничипурук А. П., Смородинский Я. Г. Изменение гистерезисных характеристик трубных сталей при их упругом и пластическом деформировании растяжением // Дефектоскопия. 2011. № 9. С. 25 – 36.

37. Ronggao Cui, Shuhui Li, Zhe Wang, Xinke Wang. A modified residual stress dependent Jile-Atherton hysteresis model // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. V. 465. P. 578 – 584.

38. Bulte D. P., Langman R. A. Origins of the magnetomechanical effect // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. V. 251. P. 229 – 243.

39. Горкунов Э. С., Михеев М. Н., Дунаев Ф. Н. Магнитные и электрические свойства сталей 18ХНВА, 34ХНЗМ, У9А в зависимости от режима термообработки // Дефектоскопия. 1975. № 3. С. 119 – 126.

40. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. О возможных причинах различия процессов перемагничивания в слабых и средних магнитных полях термически обработанных конструкционных сталей // Физика металлов и металловедение. 1981. Т. 51, вып. 4. С. 749 – 755.

41. Матюк В. Ф., Осипов А. А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть I. Анализ моделей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 2. С. 3 – 35.

42. Костин В. Н., Царькова Т. П., Ничипурук А. П. и др. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54 – 67.

43. Горкунов Э. С. Магнитные методы оценки структурных и фазовых изменений в отдельных слоях многослойных изделий // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2017. № 2. С. 6 – 27.

44. Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Емельянов И. Г., Митропольская С. Ю. Закономерности измене-

ния магнитных характеристик двухслойных изделий из углеродистых сталей в условиях растяжения // Физика металлов и металловедение. 2007. Т. 103, № 6. С. 657 – 666.

45. Горкунов Э. С., Митропольская С. Ю., Грозная Е. М. и др. Влияние упругопластического нагружения на магнитные свойства стали 20, упрочненной газовой цементацией // Дефектоскопия. 2011. № 4. С. 3 – 16.

46. Langman R. Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress // IEEE Transactions on magnetics. 1990. V. 26, No. 4. P. 1246 – 1251.

47. Новиков В. Ф., Захаров В. А., Ульянов А. И. и др. Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 59 – 68.

48. Pearson J., Squire P. T., Maylin M. G., Gore J. G. Biaxial stress effects on the magnetic properties of pureIron // IEEE Transactions on magnetics. 2000. V. 36, No. 5. P. 3251 – 3253.

49. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Development of system for vector magnetic property measurement under stress // Journal of Electrical Engineering. 2010. V. 61, No. 7/s. P. 77 – 80.

50. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Influence of biaxial stress on vector magnetic properties and 2D-magnetostriction of a nonoriented electrical steel sheet under alternating magnetic flux conditions // IEEE Transactions on magnetic. 2014. V. 50, No. 4. P. 6100204.

51. Aydin U., Rasilo P., Singh D. et al. Coupled magneto-mechanical analysis of iron sheets under biaxial stress // IEEE Transactions on magnetic. 2016. V. 52, No. 3. P. 2000804.

52. Aydin U., Rasilo P., Martin F. et al. Effect of multi-axial stress on iron losses of electrical steel sheets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. V. 469, P. 19 – 27.

53. Aydin U., Martin F., Rasilo P. et al. Rotational single sheet tester for multi-axial magneto-mechanical effects in steel sheets // IEEE Transactions on magnetic. 2019. V. 55, No. 3. P. 2001810.

54. Горкунов Э. С., Якушенко Е. И., Задворкин С. М., Мушников А. Н. Влияние упругих деформаций на магнитные характеристики хромоникелевых сталей // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116, № 2. С. 156 – 164.

55. Александров Ю. В. Особенности применения магнитного метода для оценки напряженного состояния нефтегазопроводов с учетом действия внутреннего давления продукта // Наука в нефтяной и газовой промышленности. 2010. № 4. С. 7 – 10.

56. Rekik M., Hubert O., Daniel L. Influence of a multi-axial stress on the reversible and irreversible magnetic behaviour of a 3 %Si-Fe alloy // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2014. V. 44, No. 3–4. P. 301 – 315.

57. Большаков В. Н., Горбаш В. Г., Кулик А. Ф. Прибор для контроля механических напряжений по изменению локальной остаточной намагниченности // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 57 – 62.

58. Горкунов Э. С. Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивость к внешним воздействиям. К вопросу о «Методе магнитной памяти» // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 3 – 21.

59. Кулак С. М., Новиков В. Ф. Определение механических напряжений в стали методом магнитоупругого размагничивания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 7. С. 56 – 59.

60. Дубов А. А. Принципиальные отличия метода магнитной памяти металла от других известных магнитных методов неразрушающего контроля. Итоги и перспективы развития метода // Территория NDT. 2016. № 2. С. 64 – 68.

61. Ключев В. В., Артемьев Б. В. Проблемы применения магнитного метода НК для определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // Контроль. Диагностика. 2016. № 10. С. 12–13.

62. Горкунов Э. С., Ефимов А. Г., Шубочкин А. Е., Артемьев Б. В. К вопросу применения магнитного метода НК для определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19, № 3. С. 43 – 46.

63. Аркулис М. Б., Барышников М. П., Мишенева Н. И., Савченко Ю. И. О проблемах применимости метода магнитной памяти металла при контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // Дефектоскопия. 2009. № 8. С. 10 – 12.

64. Shi P., Su S., Chen Z. Overview of Researches on the Nondestructive Testing Method of Metal Magnetic Memory: Status and Challenges // Journal of Nondestructive Evaluation. 2020. V. 39. Article No. 43.

65. Gorkunov E. S. Different remanence states and their resistance to external effects. Discussing the so-called magnetic memory method // Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2015. V. 57, No. 12. P. 709 – 717.

66. Шикуненко В. Г. Опыт диагностики трубопроводов тепловых сетей бесконтактным магнитометрическим методом // Новости теплоснабжения. 2011. № 8(132).

References

1. Gumanyuk M. N. (1972). *Magnetoelastic sensors in automation*. Kiev: Tekhnika. [in Russian language]
2. Ginzburg V. B. (1970). *Magnetoelastic sensors*. Moscow: Energiya. [in Russian language]
3. Belov K. P. (1987). *Magnetostrictive phenomena and their technical applications*. Moscow: Nauka. [in Russian language]
4. Garshelis I. (1974). A Study of the inverse Wiedemann effect on circular remanence. *IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-10, (2)*, pp. 344 – 358.
5. Lahyaoui O., Lanfranchi V., Buiron N. et al. (2019). Effect of mechanical stress on magnetization and magnetostriction strain behavior of non-oriented Si-Fe steels at different directions and under pseudo-DC conditions. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 60, (2)*, pp. 299 – 312.
6. Klyuev V. V. (Ed.), Muzhitskiy V. F., Gorkunov E. S., Shcherbinin V. E. (2006). *Non-destructive testing: reference book: in 8 volumes. Vol. 6. Book 1. Magnetic control methods. 2nd ed.*, pp. 19 – 375. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian language]
7. Bozort R. (1956). *Ferromagnetism*. Moscow: IIL. [in Russian language]
8. Golyamina I. P. (1979). *Ultrasound*. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya. [in Russian language]
9. Vonsovskiy S. V. (1971). *Magnetism*. Moscow: Nauka. [in Russian language]
10. Belov K. P. (1957). *Elastic, thermal and electrical phenomena in ferromagnets*. Moscow: Gostekhzdat. [in Russian language]
11. Budenkov G. A., Gurevich S. Yu. (1981). The current state of non-contact methods and means of ultrasonic testing (review). *Defektoskopiya, (5)*, pp. 5 – 33. [in Russian language]

12. Landau L. D., Lifshits E. M. (2005). *Continuous media electrodynamics*. Moscow: Fizmatlit. [in Russian language]
13. Kandaurova G. S., Onoprienko L. G. (1977). *Basic questions of the theory of magnetic domain structure*. Sverdlovsk: UrGU. [in Russian language]
14. Gorkunov E. S. (1979). Effect of heat treatment on the magnetostriction of structural steel 34XH2M. *Defektoskopiya*, (11), pp. 105 – 108. [in Russian language]
15. Gorkunov E. S., Subachev Yu. V., Povolotskaya A. M., Zadvorkin S. M. (2013). Influence of elastic uniaxial deformation of medium-carbon steel on its magnetostriction in the longitudinal and transverse directions. *Defektoskopiya*, (10), pp. 40 – 52. [in Russian language]
16. Jus A., Nowak P., Ginko O. (2017). Assessment of the magnetostrictive properties of the selected construction steel. *Acta Physica Polonica A, Vol. 131*, (4), pp. 1084 – 1086.
17. Vonsovskiy S. V. (1947). Influence of weak elastic stresses on the initial reversible susceptibility of ferromagnets. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki, Vol. 17*, (12), pp. 1094 – 1105. [in Russian language]
18. Nichipuruk A. P., Gorkunov E. S., Kuleev V. G., Charikova N. I. (1990). Influence of structural changes during tempering on reversible magnetization processes in structural steels. *Defektoskopiya*, (8), pp. 68 – 75. [in Russian language]
19. Nichipuruk A. P., Noskova N. I., Gorkunov E. S., Ponomareva E. G. (1992). Effect of a dislocation structure formed by plastic deformation on the magnetic and magnetoelastic properties of iron and low-carbon steel. *Fizika metallov i metallovedenie*, (12), pp. 81 – 87. [in Russian language]
20. Kuleev V. G., Tsar'kova T. P. (2007). Features of the dependence of the coercive force of steels on elastic tensile stresses after plastic deformations and heat treatment. *Fizika metallov i metallovedenie, Vol. 104*, (5), pp. 479 – 486. [in Russian language]
21. Gorkunov E. S., Subachev Yu. V., Povolotskaya A. M., Zadvorkin S. M. (2015). Influence of preliminary plastic deformation on the behavior of the magnetic characteristics of high-strength pipe steel of controlled rolling under elastic uniaxial tension (compression). *Defektoskopiya*, (9), pp. 49 – 60. [in Russian language]
22. Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., Mushnikov A. N. et al. (2014). Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, Vol. 55*, 325(3), pp. 181 – 191. [in Russian language]
23. Zaharov V. A., Borovkova M. A., Komarov V. A., Muzhitskiy V. F. (1992). The effect of external stresses on the coercive force of carbon steels. *Defektoskopiya*, (1), pp. 41 – 46. [in Russian language]
24. Muzhitskiy V. F., Popov B. E., Bezlyud'ko G. Ya. (2000). Magnetic monitoring of the stress-strain state and residual life of steel metal structures of underground structures and vessels operating under pressure. *Kontrol'. Diagnostika*, (9), pp. 48 – 50. [in Russian language]
25. Novikov V. F., Baharev M. S., Nasonov V. V., Yatsenko T. A. (2005). Measurement of stresses in steel with a coercimeter. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Neft' i gaz*, (2), pp. 89 – 94. [in Russian language]
26. Elfimov A. V., Sal'nikov A. V., Birillo I. N., Kuz'bozhev A. S. (2016). Experimental verification of the determination of mechanical stresses by the magnetic method on a pipe stand made of high-strength steel. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*, 105(3), pp. 103 – 109. [in Russian language]
27. Berdnik M. M., Aleksandrov Yu. V., Aginey R. V. (2010). Study of the influence of a plane stress state on the change in the magnetic characteristics of pipe steels. *Nauka v neftyanoy i gazovoy promyshlennosti*, (3), pp. 2 – 6. [in Russian language]
28. Berdnik M. M., Aleksandrov Yu. V., Aginey R. V. (2011). Study of the influence of a plane stress state on the change in the magnetic characteristics of pipe steels. *Kontrol'. Diagnostika*, (1), pp. 22 – 26. [in Russian language]
29. Novikov V. F., Yatsenko T. A., Baharev M. S. (2002). Dependence of the coercive force on uniaxial stresses (part 2). *Defektoskopiya*, (4), pp. 10 – 17. [in Russian language]
30. Matyuk V. F., Melguy M. A., Osipov A. A. et al. (2003). On the possibility of controlling the mechanical properties of steel 50HGFA by a pulsed magnetic method. *Defektoskopiya*, (9), pp. 28 – 36. [in Russian language]
31. Matyuk V. F. (2013). Devices for magnetic strucroscopy of sheet steel in the production process flow. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika*, (2), pp. 3 – 28. [in Russian language]
32. Mel'guy M. A. (2015). Multiparameter methods of magnetic structuroscopy and devices for their implementation (review). Part II. Pulsed magnetic multiparameter method and IMA-M device for its implementation. *Defektoskopiya*, (3), pp. 11 – 20. [in Russian language]
33. Deryagin A. V., Kandaurova G. S., Shur Ya. S. (1973). On the nature of magnetic rigidity in a plastically deformed manganese-gallium alloy. *Fizika metallov i metallovedenie, Vol. 35*, (2), pp. 286 – 293. [in Russian language]
34. Gorkunov E. S., Yakushenko E. I., Zadvorkin S. M. et al. (2010). Influence of elastic deformation by compression, tension, torsion on the distribution of critical magnetic fields in steel 15HN4D. *Defektoskopiya*, (2), pp. 3 – 13. [in Russian language]
35. Shcherbinin V. E., Gorkunov E. S. (1996). *Magnetic quality control of metals*. Ekaterinburg: UrO RAN. [in Russian language]
36. Kostin K. V., Tsar'kova T. P., Nichipuruk A. P., Smorodinskiy Ya. G. (2011). Changes in the hysteresis characteristics of pipe steels during their elastic and plastic deformation by tension. *Defektoskopiya*, (9), pp. 25 – 36. [in Russian language]
37. Ronggao Cui, Shuhui Li, Zhe Wang, Xinke Wang. (2018). A modified residual stress dependent Jile-Atherton hysteresis model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 465*, pp. 578 – 584.
38. Bulte D. P., Langman R. A. (2002). Origins of the magnetomechanical effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 251*, pp. 229 – 243.
39. Gorkunov E. S., Miheev M. N., Dunaev F. N. (1975). Magnetic and electrical properties of steels 18HNVA, 34HN3M, U9A depending on the heat treatment mode. *Defektoskopiya*, (3), pp. 119 – 126. [in Russian language]
40. Miheev M. N., Gorkunov E. S. (1981). Possible reasons for the difference in magnetization reversal processes in weak and medium magnetic fields of heat-treated structural steels. *Fizika metallov i metallovedenie, Vol. 51*, (4), pp. 749 – 755. [in Russian language]
41. Matyuk V. F., Osipov A. A. (2011). Mathematical models of the magnetization curve and magnetic hysteresis

loops. Part I. Analysis of models. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika*, (2), pp. 3 – 35. [in Russian language]

42. Kostin V. N., Tsarkova T. P., Nichipuruk A. P. et al. (2009). Irreversible changes in magnetization as indicators of the stress-strain state of ferromagnetic objects. *Defektoskopiya*, (11), pp. 54 – 67. [in Russian language]

43. Gorkunov E. S. (2017). Magnetic methods for assessing structural and phase changes in individual layers of multilayer products. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, (2), pp. 6 – 27. [in Russian language]

44. Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., Emel'yanov I. G., Mitropol'skaya S. Yu. (2007). Regularities of changes in the magnetic characteristics of two-layer products made of carbon steels under tension. *Fizika metallov i metallovedenie*, Vol. 103, (6), pp. 657 – 666. [in Russian language]

45. Gorkunov E. S., Mitropol'skaya S. Yu., Groznaya E. M. et al. (2011). Effect of Elastoplastic Loading on the Magnetic Properties of Gas-Carburized Steel 20. *Defektoskopiya*, (4), pp. 3 – 16. [in Russian language]

46. Langman R. (1990). Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress. *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 26, (4), pp. 1246 – 1251.

47. Novikov V. F., Zaharov V. A., Ulyanov A. I. et al. (2010). The effect of biaxial elastic deformation on the coercive force and local remanent magnetization of structural steels. *Defektoskopiya*, (7), pp. 59 – 68. [in Russian language]

48. Pearson J., Squire P. T., Maylin M. G., Gore J. G. (2000). Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure Iron. *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 36, (5), pp. 3251 – 3253.

49. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. (2010). Development of system for vector magnetic property measurement under stress. *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 61, (7/s), pp. 77 – 80.

50. Kai Y., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. (2014). Influence of biaxial stress on vector magnetic properties and 2D-magnetostriction of a nonoriented electrical steel sheet under alternating magnetic flux conditions. *IEEE Transactions on magnetic*, Vol. 50, (4).

51. Aydin U., Rasilo P., Singh D. et al. (2016). Coupled magneto-mechanical analysis of iron sheets under biaxial stress. *IEEE Transactions on magnetic*, Vol. 52, (3).

52. Aydin U., Rasilo P., Martin F. et al. (2019). Effect of multi-axial stress on iron losses of electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 469, pp. 19 – 27.

53. Aydin U., Martin F., Rasilo P. et al. (2019). Rotational single sheet tester for multiaxial magneto-mechanical effects in steel sheets. *IEEE Transactions on magnetic*, Vol. 55, (3).

54. Gorkunov E. S., Yakushenko E. I., Zadvorkin S. M., Mushnikov A. N. (2015) Effect of elastic deformations on the magnetic characteristics of chromium-nickel steels. *Fizika metallov i metallovedenie*, Vol. 116, (2), pp. 156 – 164. [in Russian language]

55. Aleksandrov Yu. V. (2010). Features of the application of the magnetic method for assessing the stress state of oil and gas pipelines taking into account the action of the internal pressure of the product. *Nauka v neftyanoy i gazovoy promyshlennosti*, (4), pp. 7 – 10. [in Russian language]

56. Rekik M., Hubert O., Daniel L. (2014). Influence of a multiaxial stress on the reversible and irreversible magnetic behaviour of a 3 %Si-Fe alloy. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 44, (3–4), pp. 301 – 315.

57. Bol'shakov V. N., Gorbash V. G., Kulik A. F. (1990). Device for monitoring mechanical stresses by changing the local remanent magnetization. *Defektoskopiya*, (2), pp. 57 – 62. [in Russian language]

58. Gorkunov E. S. (2014). Various states of remanent magnetization and their resistance to external influences. On the question of the "Method of magnetic memory". *Defektoskopiya*, (11), pp. 3 – 21. [in Russian language]

59. Kulak S. M., Novikov V. F. (2015). Determination of mechanical stresses in steel by the method of magnetoelastic demagnetization. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, Vol. 81, (7), pp. 56 – 59. [in Russian language]

60. Dubov A. A. (2016). Fundamental differences between the metal magnetic memory method and other known magnetic non-destructive testing methods. Results and prospects for the development of the method. *Territoriya NDT*, (2), pp. 64 – 68. [in Russian language]

61. Klyuev V. V., Artem'ev B. V. (2016). Problems of using the magnetic NDT method for determining the stress-strain state of metal structures. *Kontrol' i Diagnostika*, (10), pp. 12–13. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2016.10.pp.012-013

62. Gorkunov E. S., Efimov A. G., Shubochkin A. E., Artem'ev B. V. (2016). On the application of the magnetic NDT method to determine the stress-strain state of metal structures. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, Vol. 19, (3), pp. 43 – 46. [in Russian language]

63. Arkulis M. B., Baryshnikov M. P., Misheneva N. I., Savchenko Yu. I. (2009). On the problems of applicability of the metal magnetic memory method for monitoring the stress-strain state of metal structures. *Defektoskopiya*, (8), pp. 10 – 12. [in Russian language]

64. Shi P., Su S., Chen Z. (2020). Overview of Researches on the Nondestructive Testing Method of Metal Magnetic Memory: Status and Challenges. *Journal of Non-destructive Evaluation*, Vol. 39, 43.

65. Gorkunov E. S. (2015). Different remanence states and their resistance to external effects. Discussing the so-called magnetic memory method. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 57, (12), pp. 709 – 717.

66. Shikunenko V. G. (2011). Experience in diagnostics of pipelines of heating networks using a non-contact magnetometric method. *Novosti teplosnabzheniya*, 132(8). [in Russian language]

Для цитирования статьи:

Горкунов Э. С., Мушников А. Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23, № 12. С. 4 – 23. DOI 10.14489/td.2020.12.pp.004-023

Use the reference below to cite the publication:

Gorkunov E. S., Mushnikov A. N. (2020). Magnetic Methods for Evaluating Elastic Stresses in Ferromagnetic Steels (Review). *Kontrol' i Diagnostika*, Vol. 23, (12), pp. 4 – 23. DOI 10.14489/td.2020.12.pp.004-023. [in Russian language]