

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 620.179.14

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ**© 2021 г. С. М. Задворкин<sup>1</sup>, Л. С. Горюлева<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия**\*e-mail: sherlarisa@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.08.2020 г.

Принята к публикации 18.12.2020 г.

В настоящей обзорной статье проанализированы литературные данные о результатах теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку научных основ оценки остаточных напряжений в ферромагнитных материалах по измерениям их магнитных параметров. Приведены сведения, свидетельствующие о целесообразности применения многопараметрового контроля для расширения диапазона контролируемых остаточных напряжений и снижения неопределенности результатов контроля.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, ферромагнитные материалы, неразрушающий контроль, магнитные методы

DOI: 10.31857/S0235711921020164

Остаточными называют механические напряжения, которые существуют и уравниваются в теле после удаления причин, вызвавших их появление. Эти напряжения иногда называют внутренними напряжениями. Остаточные напряжения возникают как при изготовлении продукции, так и в процессе эксплуатации и оказывают значительное влияние на ресурс и надежность элементов конструкций, деталей машин и механизмов [1–6]. Растягивающие остаточные напряжения способствуют усталостному разрушению и повышают склонность материалов к коррозии, а остаточные напряжения сжатия снижают чувствительность изделий к концентраторам напряжений и повышают их усталостную прочность. Знание величины остаточных напряжений позволяет провести их корректировку на этапе изготовления изделия и его отбраковки. Из сказанного следует важность определения остаточных напряжений на всех стадиях жизненного цикла изделий, особенно предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях [7–9].

В целях контроля остаточных напряжений чаще всего используют экспериментальные разрушающие и неразрушающие методы. Существующие расчетные методы определения остаточных напряжений [10–15] не учитывают многие факторы, влияющие на их уровень, поэтому требуется экспериментальная проверка результатов расчета. Неразрушающие методы имеют очевидное преимущество перед разрушающими, поскольку позволяют осуществлять не выборочный, а сплошной контроль напряженного состояния изделий, как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Следует также отметить, что разрушающие методы дают информацию лишь об изменении остаточных напряжений и их перераспределении [16].

При неразрушающем контроле структуры, фазового состава, механических свойств и напряженно-деформированного состояния изделий из ферромагнитных материа-

лов, к которым относится большинство марок конструкционных сталей, хорошо зарекомендовали себя магнитные методы [17, 18]. В настоящем обзоре на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований российских и зарубежных ученых рассмотрены возможности магнитной диагностики остаточных напряжений.

**Стандартизованные неразрушающие методы определения остаточных напряжений.** В настоящее время в России стандартизовано три неразрушающих экспериментальных метода определения остаточных напряжений – инструментального индентирования, ультразвуковой и дифракционный рентгеновский (ГОСТ Р 52731-2007, ГОСТ Р 54093-2010, ГОСТ Р 57172-2016). Аналогичные стандарты существуют и в зарубежных странах (например, ASTM E2860-12; ASTM E915-16, EN 15305, XPA 09-286, SAE J 784A Standard).

Метод инструментального индентирования позволяет оценивать остаточные напряжения только в поверхностных слоях объектов контроля. В случае остаточных напряжений сжатия глубина вдавливания индентора при заданной нагрузке уменьшается, в случае растягивающих остаточных напряжений – увеличивается. Для получения абсолютной величины остаточных напряжений необходимо проводить сравнение твердости индентирования в зоне контроля со значением, полученным на “эталонном” образце, выполненном из того же материала, что и объект контроля.

Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений основан на явлении акустоупругости, которое заключается в изменении скорости распространения упругих волн в материале при изменении его напряженного состояния [19, 20]. Теория акустоупругости хорошо разработана, имеются аналитические выражения, описывающие закономерности этого эффекта. Однако практическое использование ультразвукового метода осложняется тем, что эффект акустоупругости довольно слабый, изменение скоростей упругих волн при изменении напряженного состояния не превышает, как правило, 1%. Преимуществом данного метода является высокая проникающая способность ультразвука, многообразие типов ультразвуковых волн. Однако, как и при использовании метода инструментального индентирования, с помощью ультразвукового метода можно оценить только изменения напряженного состояния объекта контроля, для определения абсолютной величины остаточных напряжений необходим “эталон”, т.е. испытуемый объект с нулевыми остаточными напряжениями. Вследствие необходимости хорошего акустического контакта с контролируемым объектом нужна специально подготовленная поверхность. Следует учесть, что на скорости упругих волн влияют также дисперсность структуры контролируемого объекта и наличие кристаллографической текстуры, а при использовании поверхностных волн Релея – шероховатость поверхности.

Наиболее распространенным для оценки остаточных напряжений является метод, основанный на дифракции рентгеновских лучей [21–23]. Дифракционный метод позволяет получить абсолютные значения остаточных напряжений, т.е. не требуется знание предыстории изделия и условий его эксплуатации, метод позволяет определять остаточные напряжения в изделиях сложной формы, обеспечивая при этом достаточно высокую точность. Дифракционный метод чаще других стандартизованных методов используют для калибровки при разработке новых методов определения остаточных напряжений. С помощью рентгеновской дифракции можно определять параметры напряженного состояния различных фазовых компонент материала изделия.

На основе анализа рентгенограмм Н.Н. Давиденковым разработана общепринятая классификация остаточных напряжений [24, 25]. Напряжения первого рода (или макронапряжения) уравниваются в пределах областей, размеры которых одного порядка с размерами тела (макроскопические объемы) и характеризуются сдвигом дифракционных максимумов на рентгенограммах. Напряжения второго рода (или микронапряжения) уравниваются в объемах одного порядка с объемом зерен

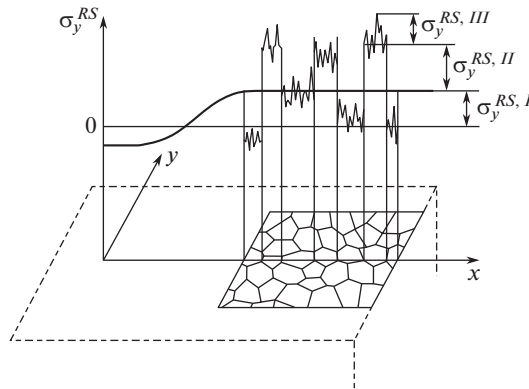


Рис. 1. Схема распределения остаточных напряжений [26].  $\sigma_y^{RSI}$  – макронапряжения,  $\sigma_y^{RSII}$  – микронапряжения,  $\sigma_y^{RSIII}$  – статические искажения решетки.

(микрообъемах) и проявляются на рентгенограммах в виде уширения дифракционных максимумов. Напряжения третьего рода (или статические искажения решетки) уравновешиваются в объемах одного порядка с элементарной кристаллической ячейкой (нанообъемах) и проявляются на рентгенограммах уменьшением интегральной интенсивности дифракционных максимумов.

В материалах всегда наблюдается суперпозиция остаточных напряжений с различными размерами областей их релаксации (рис. 1). Колебания статических искажений кристаллической решетки внутри каждого зерна происходят вблизи некоторого среднего уровня, который и является уровнем микронапряжений в этом зерне. В объеме нескольких зерен колебания микронапряжений происходят вблизи другого среднего уровня, который характеризует макронапряжения в этом объеме. Таким образом, макронапряжения характеризуют среднюю величину остаточных напряжений, а микронапряжения и статические искажения кристаллической решетки – их экстремальные значения. Указанными выше стандартами предписывается определение только макронапряжений. Необходимо отметить, что механические напряжения нельзя измерить, их величину можно только рассчитать в предположении справедливости закона Гука и гипотезы Коши о сплошной однородной среде.

Классификация остаточных напряжений по их влиянию на вид рентгенограмм является условной, поскольку природа всех трех родов остаточных напряжений одинакова и заключается, в конечном счете, в смещении атомов из идеальных положений в кристаллической решетке. Если размер рентгеновского пучка уменьшить до размера зерна, то сдвиг рентгеновских линий в этом случае будет характеризовать микронапряжения, а не макронапряжения. Н.Н. Давиденков признавал, что вместо термина “макронапряжения” корректнее использовать термин “ориентированные микронапряжения” [27].

В [28] показано, что при варьировании размера рентгеновского пучка можно получить разные значения макронапряжений не только по величине, но и по знаку. Из этого факта следует необходимость указания условий рентгеновской съемки в нормативной документации, регламентирующей определение остаточных напряжений в конкретном изделии.

Существующими стандартами регламентируется определение только макронапряжений. Однако, для более адекватной характеристики остаточных напряжений в изделиях, наряду с макронапряжениями, желательное определение и микронапряжений, которые дают информацию об экстремальных значениях остаточных напряжений. Аргументом в пользу необходимости определения микронапряжений является также и то, что образование очагов разрушения происходит в объемах, соизмеримых с размером зерна [29, 30]. Кроме того, имеются данные о наличии корреляции величины микронапряжений с макроскопическими характеристиками сопротивления деформированию [31, 32]. С помощью рентгеноструктурного анализа нельзя определить знак микронапряжений [33]. Только совместное определение макро- и микронапряжений позволяет установить и знак, и экстремальную величину остаточных напряжений в анализируемой области объекта контроля. При использовании современной вычислительной техники дополнительная операция по вычислению микронапряжений не окажет существенного влияния на оперативность контроля.

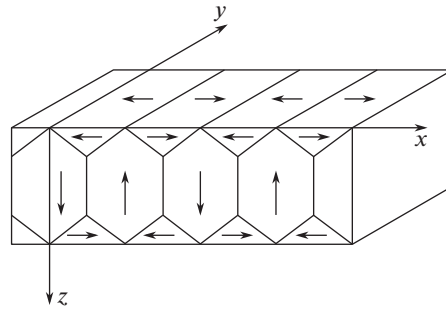
Особенностью рентгеновского метода является малая глубина проникновения рентгеновских лучей (порядка 10 мкм для большинства черных и цветных металлов), вследствие чего требуется тщательная подготовка поверхности объекта контроля. Причем применение абразивов для очистки и шлифовки поверхности нежелательно из-за возможных изменений ее напряженного состояния.

Недостатки стандартизованных методов контроля остаточных напряжений обуславливают актуальность исследований, направленных на создание новых неразрушающих способов этого контроля. В случае изделий из ферромагнитных материалов перспективным представляется магнитный контроль. Он имеет достаточно высокую чувствительность к напряженному состоянию объекта, оперативен, экологически безопасен, не требует тщательной подготовки поверхности, можно реализовать бесконтактный контроль, толщину анализируемого слоя можно варьировать в широких пределах.

**Физические основы магнитного контроля напряженного состояния ферромагнетиков и некоторые результаты применения магнитных параметров для оценки остаточных напряжений.** Магнитный контроль является одним из старейших неразрушающих физических методов структуроскопии изделий из ферромагнитных материалов. Успешное использование магнитного метода невозможно без фундаментального исследования связей магнитных свойств материала с его структурой, химическим и фазовым составом, механическими свойствами, а также напряженно-деформированным состоянием. Решение этой задачи неосуществимо без ясного представления о влиянии указанных факторов на процессы перемагничивания, которые представляют собой перестройку доменной структуры ферромагнетика в приложенном магнитном поле.

Разбиение ферромагнетика на магнитные домены, т.е. “области с пространственно однородным упорядочением магнитных моментов атомов или ионов” (определения основных терминов и характеристик, касающихся магнитоупорядоченных веществ, даны в ГОСТ 19693-74 “Магнитные материалы. Термины и определения”), приводит к тому, что, хотя каждый домен намагничен до насыщения, суммарный магнитный момент размагниченного тела в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. Тем самым достигается минимизация внутренней энергии ферромагнетика, которая представляет собой сумму энергии обменного взаимодействия, энергии кристаллографической магнитной анизотропии, магнитостатической энергии и магнитоупругой энергии [34].

Схема простейшей доменной структуры ферромагнетика показана на рис. 2 [34]. Доменная структура состоит из основных (180-градусных) доменов и замыкающих (90-градусных) доменов. Магнитные моменты основных доменов ориентированы вдоль оси легкого намагничивания и попарно антипараллельны, что приводит к “об-



**Рис. 2.** Доменная структура ферромагнитного монокристалла [34]. Стрелками показаны магнитные моменты доменов. Ось  $Z$  направлена вдоль оси легкого намагничивания.

нулению” суммарного магнитного момента ферромагнетика. Моменты замыкающих доменов ориентированы перпендикулярно моментам основных доменов, в результате чего предотвращается рассеяние собственных магнитных полей основных доменов во внешнюю среду. В  $\alpha$ -железе и сплавах на его основе оси легкого намагничивания совпадают с кристаллографическими осями  $\langle 100 \rangle$ , поэтому магнитные моменты замыкающих доменов тоже ориентированы вдоль одной из осей легкого намагничивания.

Линейные размеры доменов обычно находятся в интервале 1–100 мкм, причем каждое зерно содержит, как правило, несколько доменов [35–37]. Таким образом чем дисперснее зеренная структура ферромагнетика, тем меньше размеры доменов. Толщина доменных границ, т.е. переходных областей, разделяющих домены, по порядку величины не превосходит 0.1 мкм [35–37]. В доменной границе происходит постепенный поворот магнитных моментов атомов или ионов от направления намагниченности одного домена к направлению намагниченности другого домена.

При намагничивании предварительно размагниченного ферромагнетика по мере возрастания напряженности намагничивающего поля  $H$  сначала происходят обратимые и необратимые процессы смещения доменных границ с увеличением объема тех доменов, вектора магнитных моментов которых имеют наибольшую проекцию на вектор напряженности намагничивающего поля. При этом магнитная восприимчивость (и проницаемость) материала возрастает от некоторого начального значения, называемого начальной восприимчивостью  $k_{\text{нач}}$  (начальной проницаемостью  $\mu_{\text{нач}}$ ) до максимальной величины  $k_{\text{max}}$  ( $\mu_{\text{max}}$ ). Параметры  $k_{\text{нач}}$ ,  $\mu_{\text{нач}}$ ,  $k_{\text{max}}$  ( $\mu_{\text{max}}$ ), а также напряженность магнитного поля  $H_{k_{\text{max}}}$  ( $H_{\mu_{\text{max}}}$ ), при котором магнитная восприимчивость (проницаемость) достигает максимума, являются структурно чувствительными и часто используются в неразрушающем магнитном контроле. Процесс намагничивания при дальнейшем увеличении  $H$  происходит в основном за счет вращения векторов магнитных моментов доменов к направлению приложенного поля и сопровождается уменьшением восприимчивости (проницаемости). Процессы вращения носят преимущественно обратимый характер. Восприимчивость и проницаемость характеризуют подвижность доменных границ — чем больше эти параметры, тем выше подвижность доменных границ. Поэтому при магнитном насыщении, когда доменные границы исчезают, значения восприимчивости и проницаемости ферромагнетиков почти такие же, как у парамагнетиков.

В идеальных кристаллах доменные границы смещались бы на сколь угодно большое расстояние в сколь угодно малых полях, причем без гистерезиса, т.е. объекты об-

ладали бы бесконечно большой проницаемостью и нулевой коэрцитивной силой. В структуре реальных материалов всегда имеются несовершенства и неоднородности строения в виде дислокаций, инородных включений, полостей, трещин, межзеренных и межфазных границ, внутренних напряжений. Эти несовершенства являются препятствиями для движения доменных границ, что обуславливает, во-первых, конечные значения различных видов восприимчивости (проницаемости) и появление магнитного гистерезиса. Во-вторых, при плавном изменении намагничивающего поля доменные границы в реальных кристаллах движутся не непрерывно, а с задержкой на несовершенствах структуры, при этом намагниченность изменяется скачкообразно. Это явление было обнаружено Г. Баркгаузеном [38, 39] и названо в его честь эффектом Баркгаузена. Эффект Баркгаузена считается первым экспериментальным подтверждением наличия магнитной доменной структуры в ферромагнетиках.

Скачкообразное смещение доменных границ сопровождается излучением электромагнитных импульсов (магнитные шумы Баркгаузена, МШБ) и акустических шумов (магнитоакустическая эмиссия). Величина скачков Баркгаузена и число скачков тесно связаны с подвижностью доменных границ – в области полей, соответствующих максимальным значениям проницаемости и восприимчивости, величина скачков максимальна, а число скачков минимально. Параметры сигналов МШБ и магнитоакустической эмиссии, такие как среднеквадратичное напряжение МШБ и число скачков за цикл перемагничивания, активно используются в целях структуроскопии изделий из ферромагнитных материалов, а также при контроле их напряженного состояния [40].

В основе магнитных методов оценки напряженного состояния ферромагнетиков лежит магнитоупругий эффект [41–43], который заключается в изменении намагниченности ферромагнитного тела при деформации. Впервые этот эффект был обнаружен Э. Виллари в 1865 г. [44]. Магнитоупругий эффект является следствием перестройки доменной структуры под действием механических напряжений. Магнитоупругий вклад  $U_\sigma$  во внутреннюю энергию ферромагнетика описывается соотношением [45]

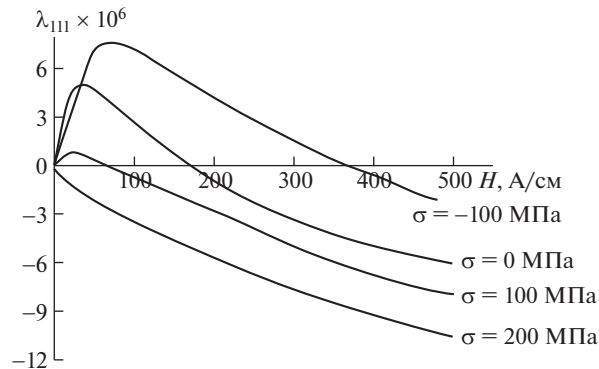
$$U_\sigma \sim \sigma \lambda, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $\lambda$  – линейная магнитострикция. Как известно [46], магнитострикция магнетиков с кубической кристаллической решеткой описывается двумя константами –  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$ . Константа  $\lambda_{100}$  характеризует магнитострикционную деформацию вдоль осей  $\langle 100 \rangle$ , т.е., в случае железа и сталей – вдоль осей легкого намагничивания, константа  $\lambda_{111}$  – вдоль осей  $\langle 111 \rangle$ .  $\alpha$ -Железо имеет константы магнитострикции разных знаков: при 20°C  $\lambda_{100} = 20.3 \times 10^{-6}$ , а  $\lambda_{111} = -21.1 \times 10^{-6}$  [47]. Для изотропного поликристалла  $\lambda$  определяется соотношением [46]

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \left( \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right). \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_s = 0.4\lambda_{100} + 0.6\lambda_{111}$  – магнитострикция насыщения;  $\theta$  – угол между направлением измерения магнитострикции и направлением намагниченности.

Вследствие разных знаков констант магнитострикции железа и его сплавов полевые зависимости  $\lambda(H)$  имеют сложный характер. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости  $\lambda(H)$  для среднеуглеродистой стали марки 45 при различных одноосных напряжениях, направление которых совпадает с направлениями приложения намагничивающего поля и измерения магнитострикции. При  $\sigma = 0$  МПа в поле до 170 А/см магнитострикция положительна с максимумом примерно при 30 А/см, а при увеличении напряженности магнитного поля свыше 170 А/см магнитострикция становится отрицательной. Такое поведение объясняется тем, что на начальной стадии намагни-



**Рис. 3.** Полевые зависимости продольной магнитострикции стали 45 при различных значениях приложенных напряжений [48].

чивания, когда превалируют процессы смещения границ магнитных доменов, магнитострикция железа и сплавов на его основе определяется положительной константой  $\lambda_{100}$ . В силу этого в слабых полях у сталей наблюдается рост положительной величины магнитострикции  $\lambda$  при возрастании напряженности внешнего магнитного поля.

При дальнейшем увеличении поля, когда начинаются процессы вращения векторов намагниченности доменов в направлении приложенного поля, величину магнитострикции определяет отрицательная константа  $\lambda_{111}$ .

При растяжении происходит уменьшение положительного участка полевой зависимости магнитострикции (рис. 3). Этот факт обусловлен тем, что по мере увеличения напряжений объем 90-градусных доменов постепенно уменьшается, остаются только 180-градусные соседства доменов, которые не вносят вклад в магнитостриксию в силу четности эффекта. При этом преобладают процессы вращения векторов намагниченности, и основной вклад в магнитостриксию вносит отрицательная константа  $\lambda_{111}$ . При сжатии положительный участок  $\lambda(H)$  увеличивается, и растет величина максимума, наблюдаемого в слабых полях. Легирование стали также приводит к увеличению положительного участка полевой зависимости линейной магнитострикции [48].

Рассмотрим влияние различных соотношений знаков напряжений и магнитострикции на магнитное состояние ферромагнетика. В случае растяжения ферромагнетика с положительной магнитострикцией ( $\lambda\sigma > 0$ ) создаются предпосылки для преимущественной ориентации магнитных моментов доменов вдоль направления растяжения, что будет облегчать намагничивание в этом направлении и, соответственно, уменьшать коэрцитивную силу и увеличивать магнитную проницаемость. Сжатие материала с положительной магнитострикцией ( $\lambda\sigma < 0$ ) приведет к обратным эффектам, поскольку в этом случае магнитным моментам доменов энергетически выгоднее располагаться в плоскости, перпендикулярной направлению действия сжимающих напряжений. Если ферромагнетик обладает отрицательной магнитострикцией, механические напряжения окажут противоположное влияние на преимущественную ориентацию магнитных моментов доменов.

Таким образом, при сжатии железного (или стального) образца ( $\sigma < 0$ ,  $\lambda > 0$ ) вдоль направления приложения нагрузки коэрцитивная сила будет монотонно возрастать с увеличением (по модулю) напряжений сжатия. При растяжении этого образца с увеличением напряжений коэрцитивная сила вдоль оси растяжения будет сначала умень-

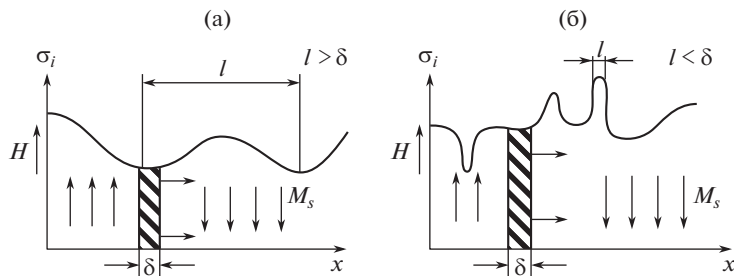


Рис. 4. Схема движения 180-градусной доменной границы ферромагнетика при наличии остаточных напряжений различной дисперсности, где  $l$  – длина “волны” напряжений,  $\delta$  – толщина доменной границы [52].

шаться ( $\sigma > 0$ ,  $\lambda > 0$ ), а затем, когда магнитострикция сменит знак ( $\sigma > 0$ ,  $\lambda < 0$ ) – возрастать.

Особенность магнитоупругого эффекта, заключающаяся в неоднозначности зависимостей магнитных характеристик от механических напряжений, ограничивает возможности магнитного контроля приложенных напряжений в стальных изделиях. В [49] отмечается, что в отличие от приложенных напряжений, которые могут как способствовать намагничиванию, так и затруднять его, остаточные напряжения всегда препятствуют изменению намагниченности, и с ростом интенсивности остаточных напряжений возрастает трудность намагничивания и перемагничивания тела.

Е.И. Кондорским впервые была разработана модель, описывающая влияние остаточных напряжений на смещения доменных границ [50]. Схема движения 180-градусной доменной границы в среде с остаточными напряжениями различной дисперсности показана на рис. 4. В рамках “теории напряжений” Кондорского для критических полей 180-градусных доменных границ  $H_{кр}^{180}$  получены выражения [51]

$$\begin{aligned} H_{кр}^{180} &= \frac{\lambda_s \Delta \sigma_i \delta}{M_s l} \quad \text{при } l > \delta, \\ H_{кр}^{180} &= \frac{\lambda_s \Delta \sigma_i l}{M_s \delta} \quad \text{при } l < \delta. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\Delta \sigma_i$  – изменение остаточных напряжений  $\sigma_i$  на толщине доменной границы  $\delta$ ;  $M_s$  – намагниченность насыщения материала. Критическим полем называют магнитное поле, необходимое для преодоления смещающейся доменной границей всех потенциальных барьеров, существующих из-за наличия различного рода дефектов в реальных ферромагнетиках. Критическое поле пропорционально коэрцитивной силе  $H_c$ .

В формуле (3) фигурирует не величина остаточных напряжений, а их градиент, поскольку в случае 180-градусных соседств вследствие четности эффекта магнитострикции вклад в магнитоупругую энергию дает только доменная граница между ними. Из (3) следует, что коэрцитивная сила линейно возрастает с ростом градиента остаточных напряжений на толщине 180-градусной доменной границы. Максимальное значение критического поля (соответственно, коэрцитивной силы) для необратимого смещения 180-градусных доменных границ достигается, когда  $l \approx \delta$ . Толщина доменных границ в железе и его сплавах не превышает 0.1 мкм, что намного меньше длины “волны” как макронапряжений, так и микронапряжений. В этих условиях изменение остаточных напряжений на толщине доменной границы невелико, по сравнению с самой величиной остаточных напряжений. С учетом того, что и отношение  $\delta/l$  в этом



случае мало, можно сделать вывод о незначительной величине  $H_{кр}^{180}$ , обусловленной задержкой движения 180-градусных доменных границ из-за наличия остаточных напряжений.

В отличие от 180-градусных соседств, необратимые смещения 90-градусных доменных границ сопровождаются магнитоупругой деформацией всей перемагничиваемой области. В этом случае критическое поле 90-градусной доменной границы линейно возрастает с увеличением остаточных напряжений [50, 51]

$$H_{кр}^{90} = \frac{\lambda_s \sigma_i}{M_s}. \quad (4)$$

Поскольку при намагничивании происходит движение обоих типов доменных границ, коэрцитивная сила представляет собой некое усреднение по критическим полям перемагничивания 90-градусных и 180-градусных доменных границ [51]. Такое же “усреднение” касается и других магнитных характеристик.

В магнитной структуроскопии в качестве информативных параметров чаще всего применяют такие характеристики начальной кривой намагничивания и петли гистерезиса как остаточную индукцию  $B_r$ , максимальную магнитную проницаемость  $\mu_{max}$  и, особенно, коэрцитивную силу  $H_c$  [17, 50, 52–55]. Определение магнитных характеристик дано в ГОСТ 19693-74 “Магнитные материалы. Термины и определения”. Применяются эти параметры и для оценки уровня остаточных напряжений в изделиях, подвергнутых термической обработке, пластической деформации, сварке и т.д. [56–59].

В качестве примера на рис. 5 показаны зависимости  $H_c$ ,  $B_r$  и  $\mu_{max}$  образцов, вырезанных из сварной трубы группы прочности К60 по ГОСТ 31447-2012, от микронапряжений  $\sigma_i$  [57]. Труба была изготовлена из стали контролируемой прокатки, химический состав стали соответствовал марке 09Г2С. Уровень остаточных напряжений в образцах варьировали путем отжига. Методами рентгеноструктурного анализа определяли макронапряжения и микронапряжения. Измерения магнитных параметров проводили при намагничивании образцов в том же направлении, в котором определяли  $\sigma_i$  рентгеновским методом. В широком интервале остаточных напряжений (рис. 5) наблюдаются однозначные, близкие к линейным зависимости  $H_c(\sigma_i)$ ,  $B_r(\sigma_i)$  и  $\mu_{max}(\sigma_i)$ . С учетом того, что величины  $B_r$  и  $\mu_{max}$  обратно пропорциональны величине коэрцитивной силы [60, 61], можно сделать вывод, в соответствии с (3), (4), о хорошем согласии этих данных и “теории напряжений” Кондорского, а также о слабом влиянии градиента остаточных напряжений на магнитные характеристики исследованной в [57] экономнолегированной стали с низким содержанием углерода.

Результаты исследования влияния остаточных напряжений, величину которых варьировали интенсивным деформационным воздействием равноканальным угловым прессованием по разным режимам, на магнитные характеристики стали 09Г2С приведены в [62]. Так же, как и для близкой по составу стали контролируемой прокатки, с увеличением остаточных напряжений наблюдается рост коэрцитивной силы и уменьшения остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости, причем эти изменения тоже описываются линейными функциями.

На рис. 6 показаны полученные в [58] зависимости  $H_c$  от  $\sigma_i$  для закаленных и отпущенных при разных температурах углеродистых сталей с содержанием углерода 0.35 и 0.8%. Из сравнения рис. 5 и 6 видно, что зависимости  $H_c(\sigma_i)$  для сталей с более высоким содержанием углерода имеют более сложный характер, чем для стали 09Г2С с меньшим содержанием углерода – во-первых, приведенные на рис. 6 зависимости нелинейны и, во-вторых, по мере уменьшения остаточных напряжений (то есть повышения температуры отпуска) наблюдается неоднозначность зависимостей  $H_c(\sigma_i)$ , что

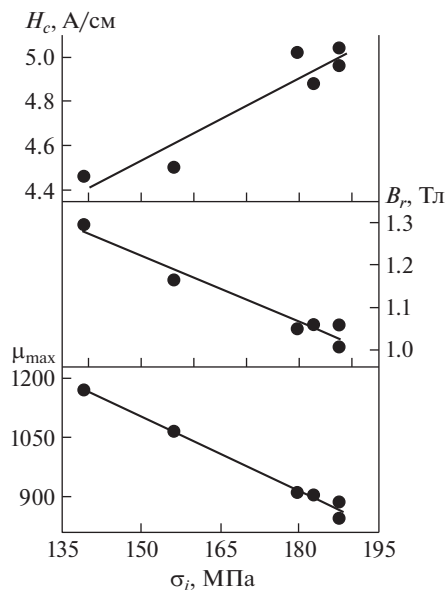


Рис. 5. Зависимости коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции,  $B_r$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{max}$  образцов из трубной стали контролируемой прокатки от остаточных напряжений  $\sigma_i$  [57].

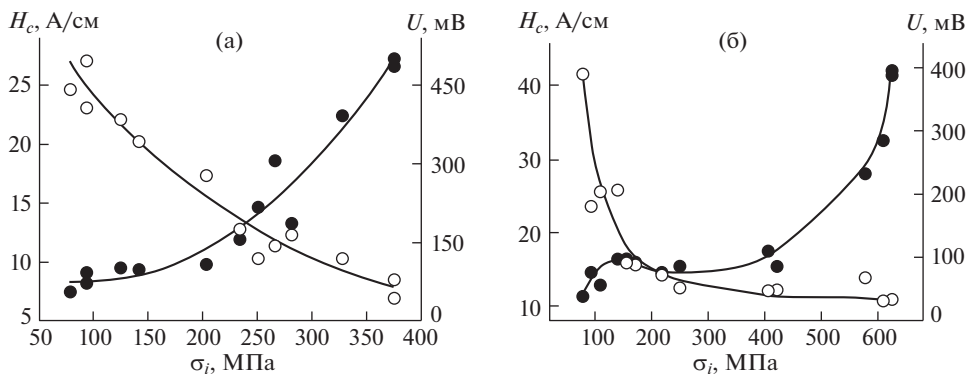


Рис. 6. Зависимости коэрцитивной силы  $H_c$  (●) и среднеквадратичного напряжения магнитных шумов Баркгаузена  $U$  (○) от остаточных напряжений для углеродистых сталей 35 (а) и У8А (б) [58].

связано с процессами выделения карбидов. Это обстоятельство свидетельствует о возможности однопараметрового магнитного контроля только в ограниченном диапазоне остаточных напряжений.

Нелинейный характер зависимостей магнитных характеристик термообработанных среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталей от остаточных напряжений можно объяснить большими градиентами остаточных напряжений в этих материалах и, возможно, значительным вкладом собственно доменных границ в магнитоупругую энергию.

Этот вклад считают пренебрежимо малым, поскольку толщина доменных границ значительно меньше размеров доменов. Однако, в случае мелкодисперсной сложной доменной структуры, например, лабиринтарной, объем, занимаемый доменными границами, может быть сравним с объемом доменов, соответственно, сравнимы их роли в магнитоупругом эффекте.

Большое число публикаций посвящено контролю остаточных напряжений с использованием параметров магнитных шумов Баркгаузена [58, 59, 63–68]. Достоинством метода МШБ является высокая оперативность. С другой стороны, метод магнитных шумов Баркгаузена связан с использованием переменного магнитного поля, что ограничивает толщину анализируемого слоя. Она зависит от частоты перемагничивания и может меняться от нескольких микрометров до примерно 1 мм [69, 70]. Таким образом, метод МШБ позволяет оценить лишь поверхностные и приповерхностные остаточные напряжения. Необходимо отметить еще и сильную зависимость параметров магнитных шумов Баркгаузена от шероховатости поверхности объекта контроля.

Чаше всего в качестве параметров магнитных шумов Баркгаузена применяют среднеквадратичное напряжение скачков МШБ и число скачков МШБ. На рис. 6 кроме зависимостей  $H_c(\sigma_i)$  показаны зависимости среднеквадратичного напряжения скачков МШБ  $U$  от  $\sigma_i$  для закаленных и отпущенных при разных температурах углеродистых сталей с различным содержанием углерода [58]. В отличие от коэрцитивной силы, среднеквадратичное напряжение МШБ уменьшается с возрастанием уровня остаточных напряжений, причем зависимость  $U(\sigma_i)$  тоже нелинейна. Параметры  $H_c$  и  $U$  дополняют друг друга – в тех диапазонах изменения  $\sigma_i$ , где чувствительность  $H_c$  к остаточным напряжениям мала, чувствительность  $U$  к ним максимальна, и наоборот. В [58] сделан вывод о том, что в целях расширения диапазона контроля остаточных напряжений можно применять двухпараметровый контроль – коэрцитивную силу в области высоких остаточных напряжений (в данном случае после закалки и низкого отпуска), а среднеквадратичное напряжение скачков магнитных шумов Баркгаузена – при пониженных остаточных напряжениях (после высокого отпуска).

В [64, 71] предложено для оценки остаточных напряжений использовать новый параметр – “коэрцитивную силу магнитных шумов Баркгаузена” (точка пересечения полевой зависимости временного интеграла огибающей МШБ с осью поля), которая была введена по аналогии с гистерезисной коэрцитивной силой. Такой параметр, как высота второго пика огибающей магнитных шумов Баркгаузена применили для количественной оценки остаточных напряжений в работах [71, 72].

В то же время имеются данные, что зачастую метод магнитных шумов Баркгаузена можно применить лишь для качественной оценки остаточных напряжений. Такой вывод сделан, например, в [68], поскольку большая часть полученных авторами значений среднеквадратичного напряжения МШБ не укладывается в 95-процентный доверительный интервал зависимости остаточных напряжений от значений среднеквадратичного напряжения МШБ. Возможно, это обусловлено проблемой снижения достоверности магнитного контроля остаточных напряжений из-за неучитываемого влияния их градиента, поскольку параметры скачков Баркгаузена связаны с макроскопическими характеристиками начальной кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса [73–75].

Ряд исследователей показал возможность использования магнитной дифференциальной проницаемости, начальной и обратимой проницаемостей для контроля остаточных напряжений. Например, в [76–78] в качестве параметра оценки остаточных напряжений предложено применять дифференциальную проницаемость. Показано количественное согласие распределений дифференциальной проницаемости и остаточных напряжений вдоль сварного шва. Остаточные напряжения определяли мето-

дами рентгеновской и нейтронной дифракции. Авторы [76–78] отмечали необходимость точной калибровки величины дифференциальной проницаемости по остаточным напряжениям во всех зонах сварного соединения.

М. Керстен показал, что начальная магнитная восприимчивость никеля (магнито-стрикция отрицательна) обратно пропорциональна остаточным напряжениям [61]. Для железа зависимость начальной магнитной восприимчивости (проницаемости) от остаточных напряжений может быть более сложной и даже неоднозначной, поскольку знак магнито-стрикции зависит от напряженного состояния и приложенного магнитного поля. Чтобы избежать этой неоднозначности, в [79–83] для оценки остаточных напряжений в железе и сталях применен такой параметр как отношение обратимой проницаемости, измеренной в остаточно намагниченном состоянии объекта контроля, и начальной проницаемости. Таким образом, фактически было использовано два параметра контроля.

Следует учесть, что дифференциальная, начальная и обратимая проницаемости определяются с большими погрешностями.

Особенности зависимостей коэрцитивной силы и других магнитных параметров сталей от приложенных напряжений, а именно наличие экстремумов на этих зависимостях в [51, 84] предложено использовать для оценки остаточных напряжений. В этих работах показано, что величина приложенных растягивающих напряжений, отвечающая минимуму коэрцитивной силы (соответственно максимумам магнитной проницаемости, остаточной индукции и остаточной намагниченности), коррелирует с величиной остаточных напряжений. Понятно, что практическое применение способа оценки остаточных напряжений, связанного с упругим нагружением объекта контроля, весьма затруднительно.

Обычно при получении калибровочных зависимостей информативных параметров контроля от величины остаточных напряжений не разделяют влияние на магнитные характеристики объекта контроля самой величины остаточных напряжений и их градиента. Такой подход может негативно сказаться на достоверности результатов контроля, поскольку невозможно точно воспроизвести напряженное состояние нескольких одинаковых изделий, изготовленных в одних и тех же условиях по одной технологии.

В [85–88] предлагается разделять вклады от критических полей перемагничивания двух видов доменных границ и оценивать уровень остаточных напряжений по положению экстремумов на полевых зависимостях дифференциальной проницаемости и обратимой проницаемости. Однако реализация такого подхода к определению остаточных напряжений сопряжена со значительными методическими трудностями и большими погрешностями в определении дифференциальной проницаемости.

Большой интерес представляют методы оценки остаточных напряжений, в которых основной вклад в информативный сигнал обусловлен изменением объема, занимаемого 90-градусными доменами. С.В. Вонсовский [89] показал, что в условиях, когда приложенные напряжения равны примерно  $0,4\sigma_i$  для железа или  $2\sigma_i$  для никеля в этих материалах реализуются условия для максимальной подвижности 90-градусных доменных границ. Соответственно, при указанных выше значениях приложенных напряжений будут наблюдаться максимальные значения начальной восприимчивости (начальной проницаемости). Практическое применение способа оценки остаточных напряжений, связанного с упругим нагружением объекта контроля, весьма затруднительно.

Изменение объема, занимаемого 90-градусными доменами, сопровождается генерацией не только электромагнитных волн, как в случае 180-градусных доменов, но и упругих волн [90–93]. Методы, сочетающие в себе воздействие на объект контроля магнитного поля и регистрацию отклика на это воздействие упругой “подсистемы” объекта, основаны на эффектах магнитоакустической эмиссии и электромагнитно-акустического преобразования [94–97].

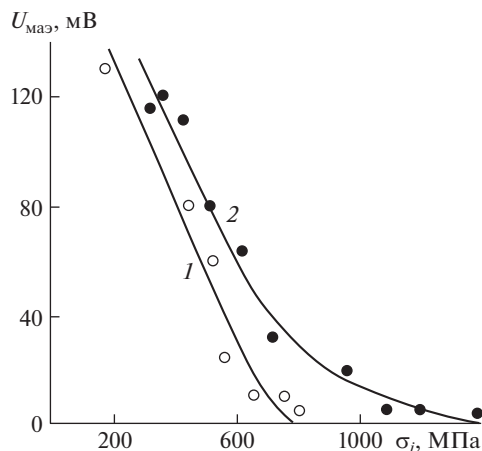


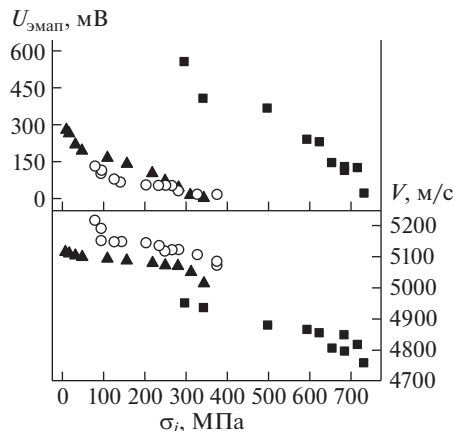
Рис. 7. Зависимости среднеквадратичного напряжения сигнала магнитоакустической эмиссии  $U_{MAЭ}$  от остаточных напряжений  $\sigma_i$  для термообработанных сталей 34ХН3М (1) и 60С2Ф (2) [93].

Высокая чувствительность амплитуды сигнала магнитоакустической эмиссии, которая пропорциональна относительному объему 90-градусных доменов [92], к изменению структурного и напряженно-деформированного состояния ферромагнетика продемонстрирована в [98–101] и др. В качестве примера на рис. 7 показаны полученные в [93] зависимости среднеквадратичного напряжения сигнала магнитоакустической эмиссии  $U_{MAЭ}$  от внутренних напряжений для двух марок легированных сталей. Как видно, при больших значениях остаточных напряжений наблюдается нелинейность зависимостей  $U_{MAЭ}(\sigma_i)$ . Возможно, это связано со значительным вкладом в магнитоупругую энергию 180-градусных доменных границ материалов в таком сложном структурно-фазовом состоянии, в котором находятся легированные стали после закалки и отпуска.

Метод двойного электромагнитно-акустического преобразования основан на преобразовании энергии электромагнитных колебаний в энергию упругих колебаний и последующем обратном преобразовании энергии упругих колебаний в электромагнитные колебания. Созданная на границе “воздух–ферромагнетик” посредством катушки возбуждения электромагнитная волна вызывает движение 90-градусных доменных границ, что порождает упругую волну, которая, в свою очередь, проходя по ферромагнетика “ферромагнетик–воздух” возбуждает электромагнитную волну, регистрируемую приемной катушкой. Таким образом, в основе электромагнитно-акустического преобразования лежат такие свойства твердых тел как способность проводить электрический ток, намагничиваться и при воздействии магнитного поля менять свои размеры.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований возможностей метода электромагнитно-акустического преобразования по оценке напряженно-деформированного состояния изделий приведены в [62, 102–107] и многих других публикациях. В частности, показано, что амплитуда сигнала электромагнитно-акустического преобразования обратно пропорциональна остаточным напряжениям (рис. 8).

Метод электромагнитно-акустического преобразования позволяет определять и скорость упругих волн. Причем, в отличие от традиционного ультразвукового контроля, метод электромагнитно-акустического преобразования является бесконтактным.



**Рис. 8.** Зависимости амплитуды сигнала электромагнитно-акустического преобразования  $U_{\text{ЭМАП}}$  и скорости нулевой симметричной моды продольных упругих волн  $V$  от остаточных напряжений в углеродистых и легированной сталях:  $\circ$  – сталь 35;  $\blacktriangle$  – У8,  $\blacksquare$  – P6M5 [62, 106].

Следует отметить ряд особенностей магнитных методов оценки напряженно-деформированного состояния изделий: 1) как и все задачи неразрушающего контроля, восстановление параметров напряженного состояния неразрушающими физическими методами представляет собой обратную задачу, т.е. является некорректно поставленной задачей со свойственными для решений таких задач неопределенностям; 2) магнитные методы определения остаточных напряжений являются косвенными и в каждом конкретном случае требуют калибровки с помощью стандартизованных методов, например, дифракционных; 3) практически невозможно учесть все факторы, которые влияют как на исходную величину информативного параметра контроля, так и на его зависимость от уровня остаточных напряжений, что существенно снижает достоверность результатов контроля остаточных напряжений. Однако приведенные в настоящем обзоре результаты исследований показывают, что во многих случаях магнитные методы дают вполне адекватную оценку уровня остаточных напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов. В целях повышения достоверности результатов контроля во многих работах [61, 62, 68, 108–110] предлагается использовать многопараметровый контроль.

**Заклучение.** В обзоре рассмотрены опубликованные в российских и зарубежных источниках результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку научных основ магнитного контроля уровня остаточных напряжений, сформированных в стальных изделиях термической обработкой и пластической деформацией, с использованием наиболее широко применяемых параметров контроля – коэрцитивной силы, параметров шумов Баркгаузена, различных видов магнитной проницаемости. Приведены данные, свидетельствующие о наличии значимых корреляций тех или иных магнитных параметров с остаточными напряжениями, определенными с помощью рентгеновской дифракции.

Однако при использовании магнитного контроля остаточных напряжений в стальных изделиях могут возникнуть трудности в интерпретации результатов контроля, обусловленные особенностями проявления магнитоупругого эффекта в железе и его сплавах, а также чувствительности магнитных характеристик этих материалов не только к величине остаточных напряжений, но и их градиенту. В связи с этим в обзоре сделан вывод о том, что для расширения диапазона контролируемых остаточных напря-

жений и снижения неопределенности результатов контроля целесообразно применять многопараметровый контроль, например, использовать в качестве информативных параметров коэрцитивную силу и среднеквадратичное напряжение магнитных шумов Баркгаузена или начальную и обратимую магнитные проницаемости.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность академику РАН Э.С. Горкунову за помощь в подготовке обзора.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-18-50065).

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-18-50065.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудрявцев И.В.* Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали. М.: ВИНТИ, 1957. 17 с.
2. *Кудрявцев П.И.* Остаточные сварочные напряжения и прочность изделий. М.: Машиностроение, 1964. 95 с.
3. *Колмогоров Г.Л., Кузнецов Е.В., Тиунов В.В.* Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. 226 с.
4. *Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М.* Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. 2002. № 10. С. 17.
5. *Totten G.E.* Handbook of residual stresses and deformation of steel. ASM International, 2002. 499 p.
6. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
7. *Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф.* Техническая диагностика опасных производственных объектов. М.: Наука, 2010. 415 с.
8. *Махутов Н.А.* Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.
9. *Фортвов В.Е., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.М.* Машиностроение России: техника Сибири, Севера и Арктики. Красноярск: Изд-во СФУ, 2018. 178 с.
10. *Рожков И.И., Мыльников В.В.* Расчет внутренних остаточных напряжений, возникающих в закаленных деталях машин после химико-термической обработки // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 1–2. С. 114.
11. *Махутов Н.А., Гаденин М.М., Одинцев И.Н., Разумовский И.А.* Развитие методов расчетного и экспериментального определения локальных напряжений при сложных спектрах нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 53.
12. *Сахвадзе Г.Ж.* Особенности конечно-элементного моделирования остаточных напряжений, возникающих в материале при лазерно-ударно-волновой обработке, с использованием метода собственных деформаций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 4. С. 87.
13. *Murugan N., Narayan R.* Finite element simulation of residual stresses and their measurement by contour method // Mater. Desingn. 2009. V. 30. № 6. P. 2067.
14. *Гриб В.В.* Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических объектов. М. ЦНИИТЭнефтехим, 2002. 268 с.
15. *Богаатов А.А.* Остаточные напряжения и разрушение металла. Инновационные технологии в металлургии и машиностроении // Сб. научных трудов. Екатеринбург: Тип. "Альфа-принт", 2013. С. 95.

16. Биргер И.А., Дроздов В.М., Казанцев А.С. Оценка механических методов определения остаточных напряжений. Новые методы испытания и обработки материалов. Минск: Наука и техника, 1975. С. 23.
17. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
18. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: Кн. 1: Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
19. Withersand P.J., Bhadeshia H.K.D.H. Residual stress part 2 – nature and origins // Materials Science and Technology, 2001. V. 17. P. 366.
20. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
21. Азеев В.А. Определение остаточных напряжений при помощи рентгеновских лучей // Журнал техн. физики. 1958. Вып. 28. № 11.
22. Рентгенография в применении к исследованию материалов. Под общей редакцией проф. Курдюмова Г.В. М.; Л.: ОНТИ НКТП, 1936. 568 с.
23. Muni A.S., Waddell A.J., Walker C.A. A method for determining x-ray constants for the measurement of residual stress // Strain. 2003. V. 39. P. 3.
24. Давиденков Н.Н. Об остаточных напряжениях // Заводская лаборатория. 1935. № 6. С. 688.
25. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металлов. М.: Л.: ОНТИ, 1936. 395 с.
26. Gert Nolze The Determination of Residual Stress. Conference: Powder diffraction International school. At: Kolkata, India, October 2002.
27. Давиденков Н.Н. К вопросу о классификации и проявлении остаточных напряжений // Заводская лаборатория. 1959. № 3. С. 318.
28. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S. Specific Features of the Determination of Residual Stresses in Materials by Diffraction Techniques // AIP Conf. Proc. 2017. 1915. P. 030006.
29. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Металлургия, 1971. 264 с.
30. Остаточные напряжения, сборник статей / под ред. Осгуда В.Р. Издательство иностранной литературы, 1957. 396 с.
31. Cagliotti V, Sachs G. Die Entwicklung von Eigenspannungen durch Dehnen // Z. Phys. 1932. V. 74. P. 647.
32. Голубков В.М., Ильина В.А., Крицкая В.К., Курдюмов Г.В., Перкас М.Д. Изучение физических факторов, определяющих упрочнение легированного железа. В сб.: Проблемы металловедения и физики металлов. М.: Metallurg издат., 1958. С. 65.
33. Русаков А.А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
34. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. К теории магнитной проницаемости ферромагнитных тел, см. Л.Д. Ландау. Собрание трудов. М.: Наука, 1972. Т. I. 510 с.
35. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. М.: Изд. МГУ, 1985. 336 с.
36. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. Киев: Наукова думка, 1986. 159 с.
37. Такадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М.: Мир, 1987. 419 с.
38. Barkhausen H. Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen // Phys. Ztschr., 1919. V. 20. № 17. P. 401.
39. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена // УФН. Т. 101. Вып. 3. 1970. С. 429.
40. Венгринович В.Л., Винтов Д.А., Прудников А.Н., Подугольников П.А., Рябцев В.Н. Особенности измерения напряжений в ферромагнетиках методом эффекта Баркгаузена // Контроль. Диагностика. 2017. № 8. С. 10.
41. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. М.: Л.: ОГИЗ, 1948. 816 с.
42. Becker R., Doring W. Ferromagnetismus. Berlin, Springer, 1939. 440 p.
43. Jiles D.C. Microstructure and Stress Dependence of the Magnetic Properties of Steels. In: Thompson D.O., Chimenti D.E. (eds) Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Boston, Springer, 1990. P. 1821.
44. Villary E. Ueber die Aenderungen des magnetischen Moments, welche der Zug und das Hindurchleiten eines galvanischen Stroms in einem Stabe von Stahl oder Eisen hervorbringen // Ann. Phys. Chem. 1865. V. 126. P. 87.



45. Белов К.П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах. М.: Гостехиздат, 1951. 254 с.
46. Акулов Н.С. Ферромагнетизм. М. Л.: Гостеоретиздат, 1939. 188 с.
47. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. Кикоина И.К. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
48. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Povolotskaya A.M. Studying magnetoelastic effects in ferromagnetic structural materials // X International Conference Navy and Shipbuilding Nowadays NSN Proceedings, Saint Petersburg, 2019. P. 26.
49. Бозорт Р.М. Современное состояние теории ферромагнетизма // Успехи физических наук. 1936. Т. 16. № 8. С. 1044.
50. Кондорский Е.И. К вопросу о природе коэрцитивной силы и необратимых изменениях при намагничивании // ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 1117.
51. Кулеев В.Г., Горкунов Э.С. Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. 1997. № 11. С. 3.
52. Шербинин В.В., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов, Екатеринбург: Изд. УрО РАН, 1996. 264 с.
53. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справ. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
54. Бида В.Г., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 3.
55. Вицена Ф. По поводу связи коэрцитивной силы ферромагнетиков с внутренними напряжениями // Чехословацкий физический журнал. 1954. V. 4. С. 419.
56. Махалов М.С., Блюментейн В.Ю. Неразрушающий контроль остаточных напряжений магнитными методами в условиях простого нагружения // Вестник машиностроения. 2016. № 4. С. 22.
57. Горкунов Э.С., Митропольская С.Ю., Задворкин С.М., Шершнева Л.С., Туева Е.А. Влияние внутренних и внешних напряжений на магнитные свойства трубной стали после контролируемой прокатки // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 6. С. 35.
58. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С., Бухвалов А.Б. Об эффективности использования магнитных и электрических параметров неразрушающего контроля микроискажений кристаллической решетки в углеродистых сталях после термической обработки // Дефектоскопия. 2012. № 3. С. 27.
59. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С. Сопоставление магнитных параметров закаленных трубных сталей с остаточными макро- и микронапряжениями, определенными рентгеновским методом // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 22.
60. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 1. Постоянное электрическое и магнитное поле. М. Л.: ОНТИ НКТП, 1934. 230 с.
61. Меськин В.С. Ферромагнитные сплавы. М., Л.: ОНТИ НКТП, 1937. 791 с.
62. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Горулева Л.С., Туева Е.А., Веселов И.Н., Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г. Влияние режимов равноканального углового прессования на механические и магнитные свойства стали 09Г2С // Дефектоскопия. 2012. № 10. С. 18.
63. Филинов В.В., Шатерников В.Е., Араkelов П.Г. Контроль технологических напряжений методом магнитных шумов // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 58.
64. Stupakov A., Takagi T., Kolarik K. Barkhausen Noise Testing of Residual Stresses Introduced by Surface Hardening Techniques. Conference: 18th International Workshop on Electromagnetic Non-destructive Evaluation At: Bratislava, Slovak Republic, 2013. Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013. V. 39.
65. Santa-aho, Vippola M., Saarinen T., Isakov M., Sorsa A., Lindgren M., Leiviskä K., Lepistö T. Barkhausen noise characterisation during elastic bending and tensile-compression loading of case-hardened and tempered samples // Journal of Material Science. 2012. V. 47. P. 6420.
66. Vourna P., Ktena A., Tsakiridis P.E., Hristoforou E. An accurate evaluation of the residual stress of welded electrical steels with magnetic Barkhausen noise // Measurement. 2015. V. 71. P. 31.
67. Ilker Yelbay H., Ibrahim Cam, Hakan Gur Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique // NDT & E International. 2010. V. 43. P. 29.

68. *Hizli H., Hakan GU RC.* Applicability of the magnetic Barkhausen noise method for nondestructive measurement of residual stresses in the carburized and tempered 19CrNi5H steels // *Res Nondestr. Eval.* 2018. V. 29. № 4. P. 221.
69. *Венгринович В.Л., Якушин В.П., Леготин С.Д., Бусько В.Н.* К вопросу о толщине информативного слоя при магнитно-шумовой структуроскопии // *Дефектоскопия.* 1986. № 2. С. 89.
70. *Филинов В.В., Араkelов П.Г., Кунин Н.Т., Головченко Д.А.* К вопросу о толщине информативного слоя при магнитошумовом контроле // *Дефектоскопия.* 2019. № 1. С. 32.
71. *Stupakov O., Perevertov O., Tom'a's I., Skrbek B.* Evaluation of surface decarburization depth by magnetic Barkhausen noise technique // *JMMM.* 2011. V. 323. P. 1692.
72. *Moorthy V., Shaw B.A., Mountford P., Hopkins P.* Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised En36 steel // *Acta Materialia.* 2005. V. 53. P. 4997.
73. *Клюев В.В., Васильев В.М., Дегтярев А.П., Есилевский В.П.* К статической теории связи характеристик эффекта Баркгаузена с параметрами петли гистерезиса // *ФММ.* 1981. Т. 52. № 5. С. 971.
74. *Киренский Л.В., Саланский Н.М., Родичев А.М.* Эффект Баркгаузена при приближении петли гистерезиса к прямоугольной // *ФММ.* 1963. Т. 16. № 4. С. 630.
75. *Stupakov O., Pal'a J., Yurchenko V.V., Tomas Ivan, Bydžovský J.* Measurement of Barkhausen noise and its correlation with magnetic permeability // *JMMM.* 2008. V. 320. Iss. 3–4. P. 204.
76. *Hristoforou E., Vourna P., Ktena A., Svec P.* On the Universality of the Dependence of Magnetic Parameters on Residual Stresses in Steels // *IEEE Trans. Magn.* 2016. V. 52. P. 1.
77. *Vourna P., Ktena A., Tsakiridis P.E., Hristoforou E.* A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels // *NDT E Int.* 2015. V. 71. P. 33.
78. *Vourna P., Ktena A., Tsakiridis P.E., Hristoforou E.* Magnetic residual stresses monitoring technique for ferromagnetic steels // *Metals.* 2018. V. 8. P. 592.
79. *Горкунов Э.С., Сомова В.М., Ничипурук А.П.* Способ электромагнитного контроля качества термической обработки изделий. Авторское свидетельство. Институт физики металлов Уральского отделения АН СССР, 1990.
80. *Горкунов Э.С., Хамитов В.А., Бартынев О.А., Сомова В.М., Волков В.А.* Магнитоупругая акустическая эмиссия в термически обработанных конструкционных сталях // *Дефектоскопия.* 1987. № 3. С. 3.
81. *Dahl O., Pfaffenberger J., Sprung H.* Neue Magnetische Werkstoffe für Pupinspulen // *Elektr. Nachr. Technik.* 1933. V. 10. P. 317.
82. *Abuku S., Cullity B.D.* A magnetic method for the determination of residual stress // *Experimental Mechanics.* 1971. V. 11. P. 217.
83. *Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Goruleva L.S.* Correlation of Residual Stresses with Magnetic Properties of Armco Iron // *AIP Conf. Proc.* 2018. V. 2053. P. 030022.
84. *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.
85. *Кулеев В.Г., Сташков А.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П.* Экспериментальное нахождение полей необратимых смещений 90-градусных доменных границ в пластически деформированных малоуглеродистых сталях // *Дефектоскопия.* 2018. № 10. С. 37.
86. *Сташков А.Н., Кулеев В.Г., Шапова Е.А., Ничипурук А.П.* Исследование зависимостей обратной проницаемости от поля в пластически деформированных малоуглеродистых сталях // *Дефектоскопия.* 2018. № 12. С. 35.
87. *Кулеев В.Г., Дегтярев М.В., Сташков А.Н., Ничипурук А.П.* О физической природе пиков дифференциальной магнитной проницаемости в пластически деформированных малоуглеродистых сталях // *ФММ.* 2019. Т. 120. № 2. С. 137.
88. *Кулеев В.Г., Сташков А.Н., Ничипурук А.П.* Причина отличия полей пиков обратной и дифференциальной магнитной проницаемости в деформированных малоуглеродистых сталях // *ФММ.* 2019. Т. 120. № 7. С. 688.
89. *Вонсовский С.В.* Влияние слабых упругих напряжений на начальную обратимую восприимчивость ферромагнетиков // *ЖЭТФ.* 1947. Т. 17. № 12. С. 1094.
90. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.

91. Kobayashi E., Sano K. Microstructure dependence of acoustic emission in magnetization process // Transaction ISIJ. 1985. V. 25. P. 128.
92. Юдин А.А., Лопатин М.В. К теории магнитной акустической эмиссии. Деп. в ВИНТИ. 1987. № 3158-В-877. 19 с.
93. Горкунов Э.С., Ульянов А.И., Хамитов В.А. Магнитоупругая акустическая эмиссия в ферромагнитных материалах // Дефектоскопия. 2002. № 5. С. 87.
94. Васильев А.Н., Гайдуков Ю.П. Электромагнитное возбуждение звука в металлах // УФН. 1983. Т. 141. С. 431.
95. Конторович В.М., Глуцок А.М. Преобразование звуковых и электромагнитных волн на границе проводника в магнитном поле // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 1195.
96. Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: Изд УНЦ АН СССР, 1986. 235 с.
97. Комаров В.А. Электромагнитно-акустическое преобразование — метод неразрушающего контроля // УФН. 1986. Т. 150. С. 164.
98. Горкунов Э.С., Хамитов В.А., Бартенев О.А. Исследование возможности контроля внутренних напряжений в ферромагнитных сталях методом магнито-упругой акустической эмиссии. Тезисы докл. науч.-техн. конф. “Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение”. Ижевск, 1986. С. 38.
99. Ng D.H.L., Jakubovics J.P., Scruby C.B., Briggs G.A.D. Effect of stress on magnetoacoustic emission from mild steel and nickel // J. Magnetism and Magnetic Materials. 1992. V. 104. P. 355.
100. Tochilin S.B., Jakubovics J.P., Briggs G.A.D. Use of Magnetoacoustic Emission for Studying Stress in Industrial Components // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. 1995. V. 31. № 6. P. 4163.
101. Namkung M., Heyman J.S., Allison S.G., Ultata D. Low-Field Magnetoacoustic Residual Stress Measurement in Steel // NDT & E International. 1987. V. 24. P. 301.
102. Комаров В.А., Мужижский В.Ф. Особенности электромагнитно-акустического преобразования при наличии механических напряжений. III Внутренние напряжения // Дефектоскопия. 2005. № 11. С. 70.
103. Комаров В.А. Магнитоупругое электромагнитно-акустическое преобразование часть 5\*. Связь приложенных и внутренних напряжений с ЭМАП при эффекте Джоуля // Контроль. Диагностика. 2019. Т. 253. № 7. С. 14.
104. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Куликов В.А. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 12.
105. Fujisawa Kazuo, Murayama Riichi, Yonehara Sadao, Sakamoto Haruo Nondestructive measurement of residual stress in railroad wheel by EMAT (Electromagnetic acoustic transducer) // NDT & E International. 1995. V. 28. Iss. 2. P. 113.
106. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Соломеин М.Н. Использование метода электромагнитно-акустического преобразования для оценки микронапряжений в сталях // Дефектоскопия. 2004. № 7. С. 26.
107. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Родионова С.С., Соломеин М.Н., Царькова Т.П. Оценка внутренних микронапряжений в высокоуглеродистых сталях по параметрам электромагнитно-акустического преобразования // Дефектоскопия. 1999. № 9. С. 38.
108. Мельгуй М.А. Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации (обзор), ч. I. Многопараметровая магнитная структуроскопия с использованием параметров петли гистерезиса, измеряемых в замкнутой магнитной цепи электромагнит—изделие // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 27.
109. Мужижский В.Ф., Султанов М.Х., Загидулин Р.В., Макаров П.С. Многопараметровый метод оценки напряженно-деформированного состояния стальных изделий и трубопроводов // Контроль. Диагностика. 2006. № 8. С. 17.
110. Lachmann C., Nitschke-Pagel T., Wohlfahrt H. Characterisation of Residual Stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-Ray Diffraction and Barkhausen Noise Method Materials, Science Forum, 2000. V. 347–349. P. 374.