
Научная статья

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-141-156

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

И.С. Леднев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлен обзор развития технологий магнитного неразрушающего контроля. После краткого изложения теоретических исследований эффекта связи магнитных напряжений рассмотрены три популярные технологии магнитного неразрушающего контроля, основанные на детектировании поля рассеяния дефекта, эффекте Баркгаузена и магнитной памяти металла. Обсуждается физический механизм и некоторые важные экспериментальные результаты, относящиеся к трем технологиям неразрушающего контроля. Кратко излагаются проблемы, связанные с каждым методом в этой области.

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, ферромагнитный материал, дефект, авиационное производство, эффект Баркгаузена, магнитопорошковый контроль

Для цитирования: Леднев И.С. Магнитные методы неразрушающего контроля изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-141-156.

Scientific article

MAGNETIC METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AIRCRAFT PRODUCTS

I.S. Lednev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article provides an overview of the development of magnetic non-destructive testing technologies. After a brief summary of theoretical studies of the effect of magnetic stress coupling, three popular magnetic non-destructive testing technologies based on: detection of the defect scattering field, the Barkhausen effect and magnetic memory of metal are considered. The article considers the physical mechanism and some important experimental results related to the three technologies of non-destructive testing. The problems associated with each method in this area are also summarized.

Keywords: magnetic non-destructive testing, ferromagnetic material, defect, aviation production, Barkhausen effect, magnetic powder control

For citation: Lednev I.S. Magnetic methods of non-destructive testing of aircraft products. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-141-156.

Введение

Магнитные методы неразрушающего контроля позволяют проводить исследования деталей и образцов материалов, изготовленных из ферромагнитных материалов, – например, из углеродистых, низко- или высоколегированных сталей – в условиях производства, ремонта или эксплуатации. Магнитные методы являются наиболее важными технологиями неразрушающего контроля, основанными на физическом принципе взаимодействия магнитного поля и механических напряжений в материале, они применяются для определения механических свойств ферромагнитных материалов и при поиске в них несплошностей.

Фундаментальная особенность ферромагнитных материалов, микроструктура которых состоит из множества небольших магнитных доменов, – связь между напряженным состоянием материала и магнитным полем [1, 2], т. е. намагничивание может приводить к изменению размеров ферромагнитных материалов, а именно к магнито-стрикции [3]. С другой стороны, уровень внутренних напряжений может влиять на размер ферромагнитных материалов: при изменении их намагниченности возникает пьезомагнитный эффект [4]. Эти макроявления связаны с вращением магнитных моментов и смещением доменных границ в микроструктуре, когда ферромагнитные материалы подвергаются воздействию приложенного магнитного поля или механического напряжения [5]. По сравнению с магнито-стрикцией пьезомагнитному эффекту уделяется больше внимания в области неразрушающего контроля, поскольку он является физической основой для оценки напряженного состояния ферромагнитных структур и компонентов с помощью магнитных методов измерения. В результате разработано большое количество неразрушающих магнитных методов контроля, таких как регистрация полей рассеяния дефектов, основанных на эффекте Баркгаузена; магнитоакустическая эмиссия; магнитная анизотропия, вызванная внутренним механическим напряжением, и метод магнитной памяти металла [6].

Из теории взаимодействия магнитных полей и внутренних механических напряжений хорошо известно, что магнитные свойства ферромагнитных материалов зависят от механических напряжения. Например, коэрцитивная сила (H_c) и магнитная проницаемость (μ) ферромагнитных материалов могут изменяться более чем на 100 % в зависимости от напряжения в рамках предела упругости [7].

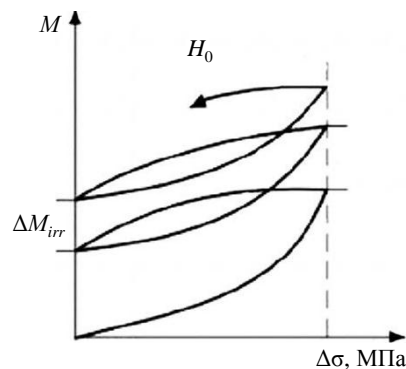


Рис. 1. Принципиальная схема уровня напряжения, влияющего на намагниченность ферромагнитного образца. Необратимая составляющая остаточной намагниченности «зеркал» сохраняется в каждом цикле нагружения (H_0 – начальная напряженность магнитного поля)

На рис. 1 представлено схематическое описание циклического напряжения, влияющего на намагничивание ферромагнитных материалов. Общая намагниченность (M) включает обратимую составляющую и необратимую составляющую (M_{irr}). В каждом цикле нагружения получается необратимая разность намагниченности (ΔM_{irr}), когда домены проходят через места закрепления под действием механического напряжения [8].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

С микроструктурной точки зрения ферромагнитный образец состоит из множества магнитных доменов. Каждый домен имеет объем 10^{-8} – 10^{-12} м³ и включает приблизительно 10^{12} – 10^{15} атомов. В исходном состоянии магнитные моменты распределяются случайным образом, и в макромасштабе намагниченность не проявляется. Когда к ферромагнитному образцу прикладывается внешняя нагрузка, растяжение приводит к ориентации доменов в направлении приложенной нагрузки для материала с положительным магнитным сопротивлением, а сжатие ориентирует домены перпендикулярно направлению нагрузки за счет пьезомагнитного эффекта [9].

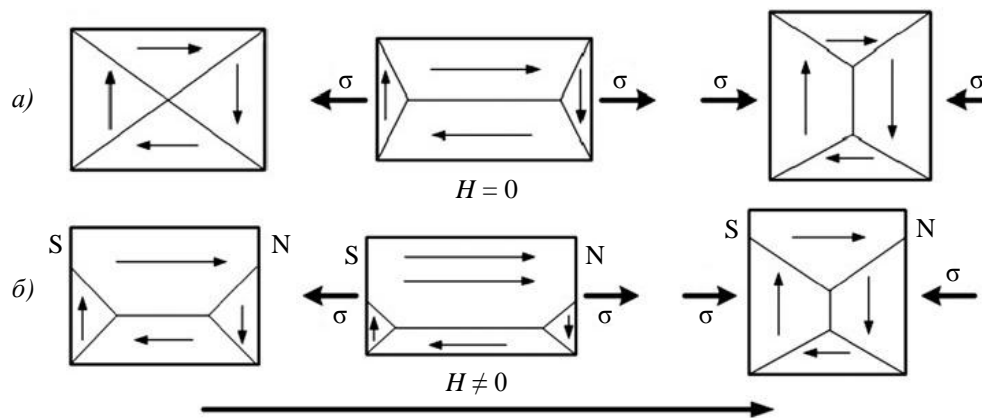


Рис. 2. Магнитное поле и напряжение, влияющие на перемещение магнитных доменов в микроструктуре. Растягивающее напряжение ориентирует домены в направлении нагрузки, а сжимающее – заставляет домены располагаться перпендикулярно направлению нагрузки. Магнитное поле разрушает систематическую доменную структуру и приводит к намагничиванию без дефектов (а) и повреждению стенки (б)

На рис. 2, а показана ненамагниченная симметричная структура. В случае если H не равно 0 (рис. 2, б), симметричная структура перестраивается и ферромагнитный образец становится намагниченным. Таким образом, наличие внешнего поля (например, искусственного поля или магнитного поля Земли) является необходимым условием для всех методов магнитного неразрушающего контроля. Этот вывод также можно сделать из следующего эксперимента: спонтанный сигнал поля рассеяния регистрируется при пластическом деформировании ферромагнитного образца под действием магнитного поля Земли, но не улавливается, когда образец подвергается пластическому деформированию в среде, защищенной от внешних магнитных полей. Теоретические исследования эффекта взаимодействия магнитного поля и напряжения дают физическое представление о различных технологиях магнитного неразрушающего контроля.

Концептуальное описание взаимодействия между напряжением и магнетизмом появилось более полувека назад. В работе [10] впервые представлен теоретический анализ магнитомеханического эффекта в ферромагнитных материалах: приложенное напряжение заменили эквивалентным магнитным полем. Позже в работе [11] рассмотрены подобные явления с точки зрения принципа Ле Шателье. В работе [12] рассмотрены изменения гистерезиса ферромагнитных материалов при постоянном напряжении. Кроме того, исследования магнитомеханического эффекта, основанные на концепциях «теории эффективного поля» и «закона приближения», проведены в работе [13].

Классическое магнитоупругое строение ферромагнитного материала обычно выражается следующим образом [14]:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_\sigma + \varepsilon_H = S_\sigma + D^\sigma H; \\ B = B_\sigma + B_H = D^H \sigma + \mu H, \end{cases} \quad (1)$$

где S_σ , μ , D^σ и D^H – тензоры матриц жесткости, эффективной магнитной проницаемости, магнитоупругого коэффициента и упругомагнитного коэффициента соответственно; σ и H – тензоры напряжений и внешнего магнитного поля соответственно; функции ε и B обозначают тензоры деформации и эффективного магнитного поля соответственно; ε_σ и ε_H – компоненты деформации, вызванные напряжением и магнитным полем соответственно; B_σ и B_H – компоненты намагниченности, вызванные напряжением и магнитным полем соответственно.

Для изотропного ферромагнитного материала представлен ряд репрезентативных макромоделей, чтобы охарактеризовать магнитомеханический эффект [12, 13]:

$$\left(\frac{d\lambda}{dH}\right)_\sigma = \left(\frac{dB}{d\sigma}\right)_H; \quad (2)$$

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{1}{k^2} \sigma(1-c)(M_{an} - M_{irr}) + \frac{dM_{an}}{d\sigma}; \quad (3)$$

$$E_\sigma = -\frac{3}{2} \lambda \sigma \cos^2 \theta. \quad (4)$$

В уравнении (2) параметр $(d\lambda/dH)_\sigma$ – изменение магнитострикции при постоянном напряжении приложенного поля; $(dB/d\sigma)_H$ – изменение магнитной индукции при постоянном напряжении в поле. Уравнение (2) количественно определяет взаимосвязь между магнитострикционным эффектом и магнитоупругим эффектом.

Уравнение (3) описывает зависимость намагничивания материала от напряжения, а также от внутренней намагниченности M_{an} (идеальное или абсолютное намагничивание материала) и M_{irr} (необратимый компонент намагничивания); k и c – константы для материала.

Уравнение (4) показывает зависимость энергии напряжения E_σ от напряжения σ , объемной магнитострикции λ и углом между приложенным напряжением и полем θ .

При рассмотрении различных физических механизмов намагничивания магнитных материалов на различных стадиях в работах [15, 16] предложены нелинейные магнитоупругие модели, включающие магнитомеханический эффект, которые, однако, не различают упругую и пластическую деформации. Известно, что упругая и пластическая деформации представляют собой различные режимы деформации микроструктуры. Упругая деформация связана с увеличением или уменьшением расстояния между атомами, в то время как пластическая – может привести к образованию и накоплению различных дефектов кристаллической решетки – например, дислокаций. Очевидно, что различные режимы деформации по-разному влияют на магнитное поведение ферромагнитных материалов. Для того чтобы охарактеризовать такую разницу количественно, в работе [17] предложена магнитоупругопластическая модель с различными механизмами упругих и пластических деформаций:

$$- \text{сила намагничивания } M = M_s \left(\coth \frac{H_{total}}{\mu_0 \alpha} - \frac{\mu_0 \alpha}{H_{total}} \right);$$

- эффективное поле $H_{\text{total}} = H_H + H_{\sigma}^e + H_{\sigma}^P$;
- магнитоиндуцированное эффективное поле $H_H = H + \alpha M$;
- эффективное поле, индуцированное упругими силами,

$$H_{\sigma}^P = \frac{3\sigma_{\text{eq}} \cos^2 \beta}{\mu_0} \cdot [(\lambda_{11} + \lambda_{12}\sigma) + 2(\lambda_{21} + \lambda_{22}\sigma)M^2]M;$$

- эффективное поле, индуцированное пластическими силами,

$$H_{\sigma}^P = -k|\varepsilon^P|, \text{ где } k = \frac{1}{\mu_0} \frac{b\langle \varepsilon_{\pi} \rangle}{2M_s}, \quad (5)$$

где M_s – намагниченность насыщения; μ_0 – проницаемость вакуума; a – параметр поля, представляющий интерполяционную связь; σ_{eq} – эквивалентное напряжение для сложного напряженного состояния; β – угол между направлениями намагничивания и эквивалентного напряжения; λ_{11} , λ_{12} , λ_{21} , λ_{22} – коэффициенты магнитострикции; ε^P – пластическая деформация; $\langle \varepsilon_{\pi} \rangle$ – средняя энергия закрепления для 180-градусной доменной стенки; b – постоянная материала.

Эта модель приводит к результатам, подтвержденным экспериментальными наблюдениями: упругое растягивающее напряжение в направлении поля ускоряет намагничивание материалов с положительным магнитным сопротивлением, но сжимающее напряжение противодействует намагничиванию; в отличие от упругой деформации, как растягивающая, так и сжимающая пластическая деформация могут снижать намагниченность ферромагнитных материалов. Однако, как и в большинстве предлагаемых моделей связи магнитных напряжений, действие приложенного поля и напряжения при намагничивании не связаны в уравнении (5). Очевидно, что разделение в моделях связи магнитных напряжений приводит к неоднозначному выводу: ферромагнитный образец может быть намагничен напряжением, даже если магнитного поля не существует, что противоречит опубликованным экспериментальным наблюдениям. Поэтому следует предложить более убедительные модели, чтобы иметь полное представление об эффекте взаимодействия ферромагнитных материалов с магнитными напряжениями.

Результаты и обсуждение

Технологии магнитного неразрушающего контроля широко применяются в авиастроении для обеспечения безопасности эксплуатации ферромагнитных конструкций и компонентов. Далее будут обобщены исследования трех типичных технологий магнитного неразрушающего контроля – детектирование поля рассеяния дефекта, исследование эффекта Баркгаузена и магнитная память металла (МПМ). К числу данных методов можно отнести методы активных магнитных исследований, при которых применяется сильное магнитное поле. Однако метод МПМ – это метод контроля в слабом поле, при котором в качестве стимулятора используется магнитное поле Земли, а не искусственное поле.

Поле рассеяния дефекта

Детектирование поля рассеяния дефекта – это одна из традиционных электромагнитных технологий, основанная на использовании магнитных частиц. Это явление впервые обнаружено в 1918 г. Однако из-за отсутствия в то время технологий намагничивания, первое применение этой технологии осуществлено только в 1933 г. при оценке качества сварных соединений. С 1960-х гг. эта технология широко используется в качестве аналитической в авиационной, нефтехимической, транспортной, энергетической и металлургической отраслях.

Принцип этой технологии, как классического метода, относительно прост. Когда к ферромагнитному материалу применяется сильное магнитное поле, любое геометрическое нарушение непрерывности в исследуемом объекте приведет к тому, что поле будет протекать по объекту частично по воздуху (рис. 3). Утечка магнитного потока может контролироваться датчиком магнитного поля или частицами магнитного порошка и использоваться для оценки места расположения дефекта. Несмотря на то, что это явление легко понять, проектирование и анализ систем поиска потока рассеяния дефекта сопряжены со сложными взаимодействиями между полем возбуждения, «полем рассеяния дефекта» и дефектами в материале. Необходимо рассмотреть несколько важных аспектов. Во-первых, уровень магнитного поля возбуждения должен быть большим и однородным, чтобы обеспечить изменение магнитного поля для точного определения местоположения дефекта. Во-вторых, эти датчики должны быть расположены близко к положению, при котором изменения плотности магнитного поля, возникающие из-за дефекта, отличаются от фонового шума. Кроме того, разрабатывается эффективный метод преобразования для идентификации дефекта. Дефектные характеристики записанных сигналов поля рассеяния дефекта сложные, поскольку дефект является нерегулярным.

Большое количество усилий приложено для разработки простой аналитической модели, объясняющей формирование сигнала поля рассеяния дефекта [18–20]. В статье [19] разработана модель, в которой предполагалось наличие магнитных диполей на поверхности дефекта. Данная модель описывает феномен сигнала поля рассеяния дефекта с микроскопической точки зрения. Для учета нелинейного магнитного поведения ферромагнитных материалов в работах [19, 20] предложены более сложные модели.

Представленные модели могут эффективно описывать основные характеристики и топографию сигнала поля рассеяния дефекта для обычных дефектов (например, прямоугольных щелей), но не для нерегулярных дефектов. Для анализа сигнала поля рассеяния дефекта, генерируемого нерегулярными дефектами, приведены некоторые интегральные уравнения, описывающие индуцированные дефектами магнитные заряды, основанные на линейной аппроксимации ферромагнитных материалов, которые могут быть решены численно с использованием итерационного метода [21].

По сравнению с теоретическим анализом магнитный метод конечных элементов (МКЭ) является мощным инструментом для исследования сигнала поля рассеяния дефекта благодаря своей гибкости при моделировании различных неправильных геометрических дефектов. Методы двумерного магнитного МКЭ [22] предоставляют достаточную информацию для определения характеристик дефектов острой формы, но не позволяют точно определить естественные дефекты, например коррозионные трещины под напряжением. Поэтому в последние годы все больше внимания уделяется трехмерному магнитному МКЭ. В этом аспекте в исследовании [23] представлены сравнения 2D- и 3D-моделей. Кроме того, в работе [24] изучено влияние локальных напряжений, вызванных вмятинами, на сигнал поля рассеяния дефекта с использованием как магнитного МКЭ-моделирования, так и экспериментальных испытаний.

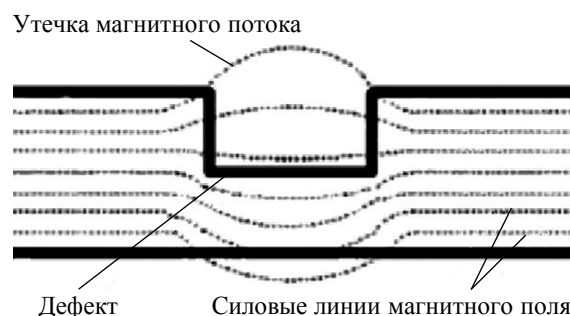


Рис. 3. Схематическое изображение утечки потока при наличии геометрического разрыва

Следует отметить, что метод поля рассеяния дефекта является одним из самых популярных методов магнитного неразрушающего контроля и широко используется в различных областях техники. В тесте поля рассеяния дефекта ключевым моментом является обратное определение дефектов исследуемого объекта с использованием записанных сигналов поля рассеяния дефекта. В работе [25] применены различные новые алгоритмы – например, вейвлеты, нейтральные сети и генетический алгоритм. Однако при обнаружении дефекта существуют два основных препятствия. Во-первых, дефект в реальности, как правило, сложный и характеризуется множеством параметров, таких как ширина, толщина, местоположение и состояние краев дефекта, которые в свою очередь существенно влияют на измеряемые сигналы поля рассеяния дефекта. Очевидно, что, как правило, трудно охарактеризовать каждый параметр на основе измеренных сигналов поля рассеяния дефекта. Во-вторых, по-прежнему сложно работать с упруго-пластической зоной вблизи трещин и обычно предполагается, что свойства материала идеализированы. Отчасти это связано с тем, что влияние пластической деформации на магнитные характеристики ферромагнитных материалов до конца не изучено.

Магнитный шум Баркгаузена

В отличие от метода поля рассеяния дефекта, разработанного для контроля макродефектов, метод магнитного шума Баркгаузена (МШБ) обычно используется для определения направления намагничивания материала, остаточных и приложенных напряжений и размера зерна ферромагнитных материалов.

В 1919 г. Баркгаузен [26] обнаружил, что когда ферромагнитный материал намагничивается усиливающимся полем, в катушке, расположенной рядом с материалом, генерируется шум в виде импульсов напряжения. На рис. 4, *а* показана схема шума Баркгаузена во время процесса намагничивания. Тестовая система представлена на рис. 4, *б*. С микроструктурной точки зрения появление шума Баркгаузена обусловлено резким перемещением 180-градусных доменных стенок по локальным участкам закрепления [27].

Параметром, обычно используемым при анализе обнаруженного напряжения (V) сигнала МШБ, является энергия МШБ, определяемая как

$$MBN_{\text{energy}} = A \sum_{\text{events}} \int V^2 dt. \quad (6)$$

Как правило, энергия МШБ может быть отображена на полярной шкале и описана с помощью уравнения [28]

$$MBN_{\text{energy}} = \alpha \cos^2(\theta - \varphi) + \beta, \quad (7)$$

где θ – угол наклона приложенного магнитного поля относительно опорного направления нагрузки; α – угловая зависимость изменения сигнала МШБ; β – независимый от угла сигнал (изотропный фон); φ – направление оси магнитного поля относительно опорного направления.

Сигнал МШБ генерируется из-за необратимого перемещения границ магнитных доменов. Амплитуда зависит от остаточных и приложенных напряжений. Таким образом, это полезный метод неразрушающего контроля для определения наличия остаточных и приложенных напряжений в ферромагнитных образцах. В сталях с положительной магнитострикционной постоянной эксперименты подтвердили [29], что амплитуда МШБ увеличивается из-за упругого растягивающего напряжения в направлении намагничивания, но уменьшается из-за напряжения сжатия. Это связано с различным воздействием растягивающих и сжимающих напряжений на перемещение доменных границ [30]: растягивающее напряжение увеличивает количество подвижных 180-градусных доменных стенок, переориентирует домены или изменяет барьеры закрепления, но сжимающее напряжение приводит к образованию домена с замкнутым потоком за счет уменьшения количества подвижных 180-градусных доменных стенок.

Пластическая деформация приводит к значительному увеличению плотности дислокаций и изменяет энергию доменных границ в некоторых местах закрепления. Следует отметить, что влияние пластической деформации на сигналы МШБ является более сложным, чем влияние упругой деформации [31]. Такая сложность особенно проявляется в некоторых противоречивых заявлениях, касающихся зависимости сигналов МШБ от пластической деформации. Например, в исследовании [32] сообщается о непрерывном уменьшении шума Баркгаузена по мере увеличения пластической деформации, в то время как в другом исследовании [33] наблюдалось увеличение этого параметра при низкой пластической деформации с последующим уменьшением при высокой пластической деформации.

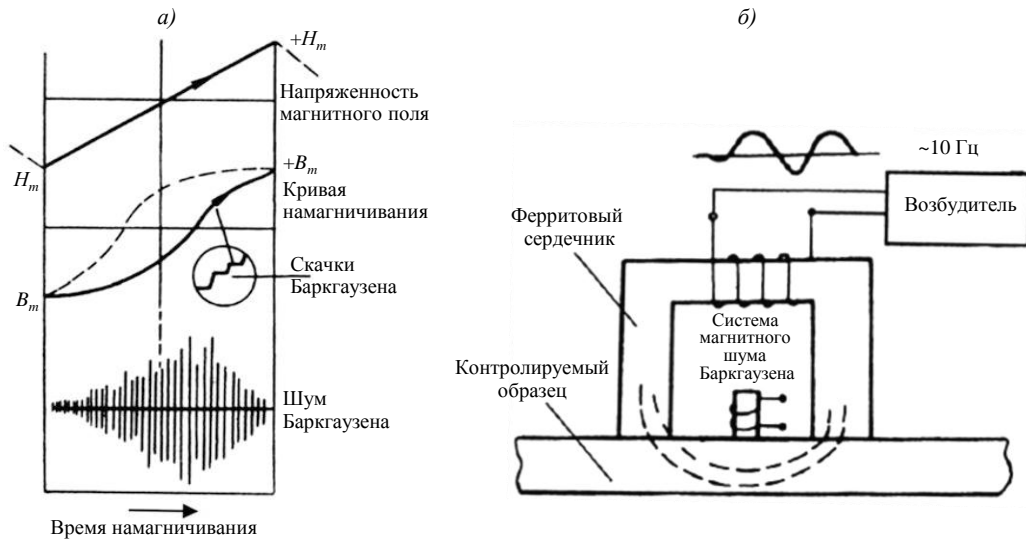


Рис. 4. Возникновение шума Баркгаузена во время намагничивания образца (а) и испытательная система магнитного шума Баркгаузена (МШБ) (б)

Сигналы МШБ очень чувствительны к микроструктуре ферромагнитных материалов [34] и измерительным системам [35]. В целом разработка эффективной модели для количественной оценки взаимодействия между особенностями микроструктуры и шумом Баркгаузена по-прежнему является сложной задачей в данной области.

Магнитная память металла

Как упоминалось ранее, и поле рассеяния дефекта, и МШБ являются методами активных магнитных испытаний, при которых для намагничивания исследуемого объекта используется сильное магнитное поле. Таким образом, эти два метода обычно требуют много времени и даже непрактичны для некоторых нестандартных конструкций. Для разработки более простого и эффективного неразрушающего магнитного контроля, отвечающего требованиям машиностроения, в последние годы большой интерес вызвал метод пассивного магнитного контроля. В конце 1990-х гг. российской группой ученых впервые предложен метод пассивного магнитного неразрушающего контроля, а именно метод магнитной памяти металла (МПМ) [36]. Преимущество метода МПМ заключается в том, что вместо искусственного сильного поля источником-раздражителем является магнитное поле Земли. Кроме того, метод МПМ обладает другими преимуществами:

- эффективен при оценке ранних повреждений и развивающихся дефектов;
- глубина детектирования составляет до нескольких миллиметров по сравнению с микронами при использовании метода рентгеновской дифракции;

– прост в эксплуатации и экономит время, а максимальная скорость измерения достигает нескольких метров в секунду.

Физический механизм метода МПМ описан в работе [36]. Под воздействием поля Земли и механической нагрузки в зонах концентрации напряжений генерируются сигналы собственного рассеяния магнитного потока (SMFL), где тангенциальная составляющая SMFL $H_p(x)$ достигает максимума, а нормальная составляющая $H_p(y)$ меняет полярность и принимает нулевое значение (рис. 5). Магнитное состояние сохраняется даже при снятии нагрузки. Таким образом, зоны концентрации напряжений могут быть обнаружены путем измерения сигналов SMFL на поверхности конструкции. С точки зрения микроструктуры это связано с необратимой ориентацией магнитных доменов, вызванной пластической деформацией в зоне максимальной концентрации напряжений.

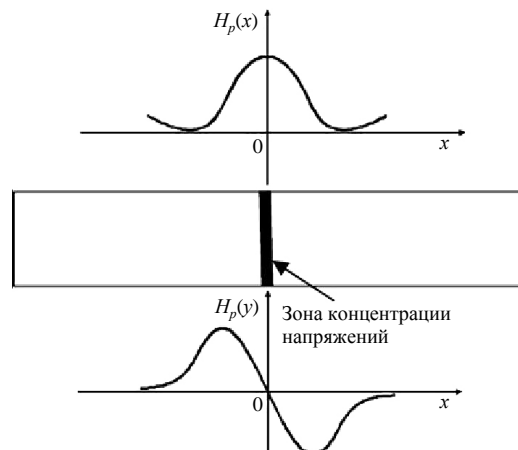


Рис. 5. Схематическое представление распределений собственного рассеяния магнитного потока (SMFL) в зоне концентрации напряжений, где $H_p(x)$ достигает максимума, а нормальная составляющая $H_p(y)$ равна нулю в зоне максимальной концентрации напряжений

Метод МПМ привлекает большое внимание инженеров благодаря преимуществам, заключающимся в простоте эксплуатации оборудования, экономии времени и простых критериях. Известно различное применение метода для диагностики газо- и нефтепроводов, рельсов, турбинных колес, сосудов высокого давления и др. На рис. 6 показаны результаты тестирования нормальной составляющей $H_p(y)$ для трех колец. Значительно меньшая амплитуда $H_p(y)$ на левом кольце означает, что оно находится в хорошем рабочем состоянии. Однако значительно бóльшая амплитуда $H_p(y)$ на правом кольце указывает на то, что оно серьезно повреждено. Кроме того, результаты также указывают на возможные местоположения зоны концентрации напряжений, как показано на рис. 6, в.

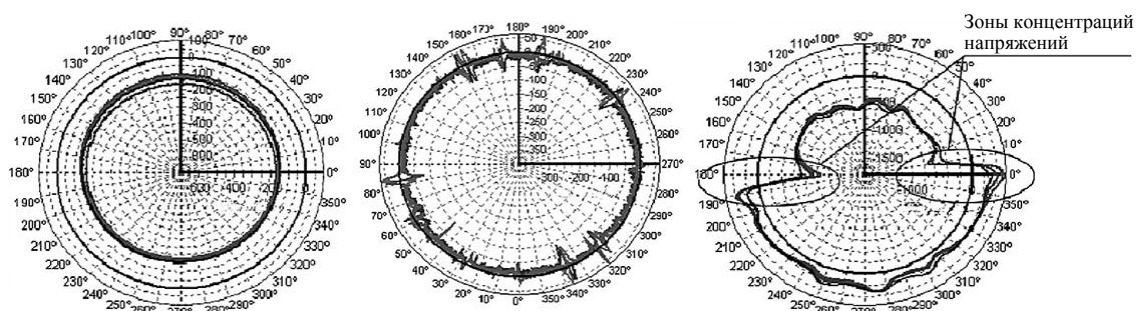


Рис. 6. Результаты тестирования нормальной составляющей $H_p(y)$ трех колец, которые показывают, что левое кольцо исправно (а), а правое серьезно повреждено (в)

Метод МПМ подходит для многих инженерных исследований. Однако, как сравнительно новый метод тестирования, он все еще обладает большими возможностями для совершенствования. Одним из важных моментов является то, что требуются более точные и количественные критерии. До сих пор этот метод использовался только как качественный метод испытаний для определения возможных опасных нарушений без получения количественных результатов – например, интенсивности концентрации напряжений и остаточного усталостного ресурса. Для того чтобы понять физический механизм и предоставить больше информации о взаимосвязях между сигналом SMFL и структурными признаками, недавно проведены дополнительные исследования.

В работе [37] измерили сигнал SMFL для серии образцов из стали марки 18ХНВА на растяжение. Магнитная кривая на измеренной линии показывает хорошую линейность после нагружения. Сигнал на поверхности образца вращается против часовой стрелки с увеличением растягивающего напряжения во время упругой деформации и собирается вместе на стадии пластической деформации.

Далее в работе [38] выполнили численное моделирование сигналов SMFL с использованием модели магнитного заряда, в которой учтены критические факторы (например, размер, расположение и плотность локальной зоны пластической деформации, а также значения силы отрыва датчика), влияющие на сигнал SMFL.

В работе [39] экспериментально подтверждено, что сигнал SMFL и его градиент существенно различаются в течение периода от упругой к пластической деформации образцов из стали при растяжении, но в течение всего периода сжимающего нагружения никаких заметных изменений не обнаружено.

В работе [40] протестировали сигнал SMFL от образцов из стали 18CrNi4A, вызванный циклическими изгибающими напряжениями. Результаты эксперимента качественно объяснены с помощью модели эффективного поля, разработанной в работе [41], в которой представлен новый трехосевой магнитный датчик. В работе [42] также представлен экспериментальный и численный анализ распределения сигнала SMFL в нагруженных образцах с концентраторами напряжений.

Метод МПМ, хотя и привлек к себе значительное внимание за последнее десятилетие, все еще нуждается в дальнейших исследованиях, основанных на следующих причинах.

Отсутствие физических моделей для количественной оценки взаимосвязи между сигналом SMFL и пластической деформацией. Как упоминалось ранее, метод МПМ разработан для определения начального повреждения или пластической деформации, вызванных локальной концентрацией напряжений. Естественно, традиционные магнитоупругие модели не могут описать такое явление [19–21]. Хотя с помощью недавно разработанной магнитопластической модели [29] дифференцировано влияние упругой и пластической деформаций на намагниченность ферромагнитных материалов, прямой зависимости между пластической деформацией и сигналом SMFL не установлено.

Из-за отсутствия количественных критериев дефектности метод МПМ в настоящее время может использоваться только как вспомогательный инструмент для диагностики возможной опасной зоны. Более точные результаты необходимо получать с помощью других методов, так как между сигналами SMFL и признаками дефектов в тестах МПМ должно быть количественное соотношение. Поэтому необходимо проводить систематические эксперименты, а также численное моделирование.

Заключения

Методы неразрушающего контроля широко применяются для исследований изделий авиационной техники [43–46]. Своевременный и качественный контроль таких изделий обеспечивает высокий уровень отечественного производства [47–50].

Одно из основных свойств ферромагнитных материалов – эффект магнитной связи между напряжениями. На основе этого эффекта были разработаны различные методы магнитного неразрушающего контроля для оценки напряженного состояния ферромагнитных структур, некоторые из которых успешно используются в авиастроении. Однако понимание эффекта взаимодействия магнитного поля и напряжения является неполным из-за сложности воздействия магнитного поля и высокой чувствительности к микроструктуре материала. Таким образом, применение методов неразрушающего контроля в промышленности по-прежнему сталкивается со значительными трудностями. Желательно провести дальнейшие исследования методов неразрушающего контроля.

В этой статье представлены современные физические модели взаимодействия магнитного поля и напряжения, а также рассмотрены три типичных метода неразрушающего контроля. Основные характеристики, преимущества, недостатки и перспективы использования этих методов неразрушающего контроля обобщены на основе обзора научно-технической литературы.

Список источников

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1034 с.
2. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М.: Мир, 1987. 419 с.
3. Новиков В.Ф. Магнитоупругие свойства пластически деформированных и сложнапряженных магнетиков. М.: Недра, 1997. 196 с.
4. Боков В.А. Физика магнетиков: учеб. пособие для вузов. СПб: Невский Диалект, 2002. 155 с.
5. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
6. Дубов А.А., Дубов А.А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учеб. пособие. М.: Спектр, 2012. 395 с.
7. Бида Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
8. Lindgren M., Lepistö T. Modeling of magnetomechanical effect behaviors in a giant magnetostrictive device under compressive stress X // *Sensors and Actuators A Physical*. 2008. Vol. 143 (2). P. 204–214. DOI: 10.1016/j.sna.2007.10.063.
9. Lindgren M., Lepistö T. Effect of prestraining on Barkhausen noise vs. stress relation // *NDT & E International*. 2001. Vol. 34 (5). P. 337–344. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00073-6.
10. Brown W.F. Irreversible Magnetic Effects of Stress // *Physical Review*. 1949. Vol. 75. P. 147–154.
11. Cullity B.D. *Introduction to Magnetic Materials*. N.-Y.: Addison-Wesley Publishing Company, 1972. 564 p.
12. Sablik M.J., Burkhardt G.L., Kwun H., Jiles D.C. A model for the effect of stress on the low-frequency harmonic content of the magnetic induction in ferromagnetic materials // *Journal of Applied Physics*. 1988. Vol. 63 (8). P. 3930–3932. DOI: 10.1063/1.340609.
13. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1986. Vol. 61 (1-2). P. 48–60. DOI: 10.1016/0304-8853(86)90066-1.
14. Wang Z.D., Yao K., Ding K.Q. Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals // *NDT & E International*. 2010. Vol. 43 (4). P. 354–359. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.12.006.
15. Carman G.P., Mitrovic M. Nonlinear Constitutive Relations for Magnetostrictive Materials with Applications to 1-D Problems // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1995. Vol. 6 (5). P. 673–683. DOI: 10.1177/1045389x9500600508.
16. Wan Y., Fang D., Hwang K.C. Non-linear constitutive relations for magnetostrictive materials // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2003. Vol. 38 (7). P. 1053–1065. DOI: 10.1016/s0020-7462(02)00052-5.

17. Wang Z.D., Deng B., Yao K. Physical model of plastic deformation on magnetization in ferromagnetic materials // *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109. Art. 083928. DOI: 10.1063/1.3574923
18. Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. Ч. 1. Топография полей моделей дефектов // *Дефектоскопия*. 1966. № 5. С. 50–59.
19. Сапожников А.Б. Некоторые простейшие нелинейные расчеты в теории магнитной дефектоскопии // *Труды СФТИ при ТГУ*. 1950. Вып. 30. С. 81–105.
20. Щербинин В.Е., Пашагин А.И. Влияние протяженности дефекта на величину его магнитного поля // *Дефектоскопия*. 1972. № 4. С. 74–82.
21. Dobmann G. Magnetic leakage techniques in NDT. A state-of-the-art survey of the capabilities for defect detection and sizing // *Electromagnetic Methods of NDT*. 1985. Vol. 3. P. 71–95.
22. Li Y., Tian G.Y., Ward S. Numerical simulations on electromagnetic NDT at high speed // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2006. Vol. 48 (2). P. 103–108. DOI: 10.1784/insi.2006.48.2.103.
23. Al-Naemi F.I., Hall J.P., Moses A.J. FEM modeling techniques of magnetic flux leakage-type NDT for ferromagnetic plate inspections // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. Vol. 304 (2). P. 790–793. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.02.225.
24. Babbar V., Shiari B., Clapham L. Mechanical Damage Detection With Magnetic Flux Leakage Tools: Modeling the Effect of Localized Residual Stresses // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2004. Vol. 40 (1). P. 43–49. DOI: 10.1109/TMAG.2003.821121.
25. Ovanesova A.V., Suárez L.E. Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures // *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26 (1). P. 39–49. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.
26. Barkhausen H. Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen // *Physische Zeitschrift*. 1919. Jg. 20. No. 17. P. 401–403.
27. Clapham L., White S., Lee J., Atherton D.L. Stress measurement using magnetic Barkhausen noise and metal magnetic memory testing // *Journal of Applied Physics*. 2000. Vol. 88 (4). P. 2163–2168.
28. Stefanita C.-G., Atherton D.L., Clapham L. Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel // *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48 (13). P. 3545–3551. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00134-8.
29. Rautioaho R., Karjalainen P., Moilanen M. Improvement of the Barkhausen noise method for stress evaluation // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1988. Vol. 73 (1). P. 96–102. DOI: 10.1016/0304-8853(88)90174-6.
30. Krause T.W., Pulfer N., Weymann P., Atherton D.L. Magnetic Barkhausen noise: stress-dependent mechanisms in steel // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1996. Vol. 32. Is. 5. P. 4764–4766. DOI: 10.1109/20.539144.
31. Kleber X., Vincent A. On the Role of Residual Internal Stresses and Dislocations on Barkhausen Noise in Plastically Deformed Steel // *NDT & E International*. 2004. Vol. 37. P. 439–445. DOI: org/10.1016/j.ndteint.2003.11.008.
32. Vaidyanathan S., Moorthy V., Kalyanasundaram P. et al. Effect of different stages of tensile deformation on micromagnetic parameters in high-strength, low-alloy steel // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1999. Vol. 30 (8). P. 2067–2072. DOI: 10.1007/s11661-999-0017-9.
33. Dhar A., Clapham L., Atherton D.L. Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel // *NDT & E International*. 2001. Vol. 34. P. 507–514.
34. Saquet O., Chicois J., Vincent A. Barkhausen Noise from Plain Carbon Steel // *Analysis of the Influence of Microstructure. Materials Science and Engineering*. 1999. Vol. 269 (A). P. 73–82. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00155-0.
35. Bhattacharya D.K., Vaidyanathan S. Effect of the Demagnetisation Factor on the Barkhausen Noise Signal // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1997. Vol. 166. P. 111–116. DOI: 10.1016/S0304-8853(96)00444-1.
36. Dubov A.A. Detection of Metallurgical and Production Defects in Engineering Components Using Metal Magnetic Memory // *Metallurgist*. 2015. Vol. 59 (1-2). P. 164–167. DOI: 10.1007/s11015-015-0078-5.

37. Dong L., Xu B., Dong S. et al. Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel // *NDT & E International*. 2009. Vol. 42 (4). P. 323–327. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.12.005.
38. Yao K., Wang Z.D., Deng B., Shen K. Experimental Research on Metal Magnetic Memory Method // *Experimental Mechanics*. 2011. Vol. 52 (3). P. 305–314. DOI: 10.1007/s11340-011-9490-3.
39. Changliang S., Shiyun D., Binshi X., Peng H. Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferromagnetic steel under dynamic tension load // *NDT & E International*. 2010. Vol. 43 (1). P. 8–12. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.08.002.
40. Leng J., Xu M., Xu M., Zhang J. Magnetic field variation induced by cyclic bending stress // *NDT & E International*. 2009. Vol. 42 (5). P. 410–414. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.01.008.
41. Wilson J.W., Tian G.Y., Barrans S. Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed // *Sensors and Actuators: Physical A*. 2007. Vol. 135 (2). P. 381–387. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.10.006.
42. Roskosz M., Gawrilenko P. Analysis of changes in residual magnetic field in loaded notched samples // *NDT & E International*. 2008. Vol. 41 (7). P. 570–576. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.04.002.
43. Леднев И.С. Магнитные методы неразрушающего контроля деталей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
44. Скоробогатько Д.С., Головков А.Н., Кудинов И.И., Князев А.В. Сравнение свободной поверхностной энергии сплавов, наиболее часто используемых в авиационной промышленности, методом межфазного взаимодействия Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьельбле (ОВПК) // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-169-179.
45. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В. Автоматизированный неразрушающий контроль образцов трехслойных сотовых конструкций ультразвуковым теневым методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-74-80.
46. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
47. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // *Вестник Российской академии наук*. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
48. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // *Электротехнология*. 2022. № 5. С. 8–19.
49. Каблов Е.Н., Бабашов В.Г., Балинова Ю.А., Максимов В.Г. Фазовые превращения в композиционном материале с органической матрицей, наполненной волокнами диоксида циркония // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59. № 1. С. 62–68.
50. Каблов Е.Н., Чайникова А.С., Щеголева Н.Е., Гращенков Д.В., Ковалева В.С., Белянчиков И.О. Синтез, структура и свойства алюмосиликатной стеклокерамики, модифицированной оксидом циркония // *Неорганические материалы*. 2020. Т. 56. № 10. С. 1123–1129.

References

1. Vonsovsky S.V. *Magnetism*. Moscow: Nauka, 1971, 1034 p.
2. Tikazumi S. *Physics of Ferromagnetism. Magnetic Characteristics and Practical Applications*. Moscow: Mir, 1987, 419 p.

3. Novikov V.F. *Magnetoelastic Properties of Plastically Deformed and Complex-Stressed Magnets*. Moscow: Nedra, 1997, 196 p.
4. Bokov V.A. *Physics of Magnets: textbook for Universities*. St. Petersburg: Nevsky Dialect, 2002, 155 p.
5. Spitsyn V.I., Troitsky O.A. *Electroplastic Deformation of Metals*. Moscow: Nauka, 1985, 160 p.
6. Dubov A.A., Dubov A.A., Kolokolnikov S.M. *Method of magnetic memory of metal and control devices: tutorial*. Moscow: Spektr, 2012, 395 p.
7. Bida G.V. *Magnetic properties of heat-treated steels*. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 2005, 218 p.
8. Lindgren M., Lepistö T. Modeling of magnetomechanical effect behaviors in a giant magnetostrictive device under compressive stress X. *Sensors and Actuators A Physical*, 2008, vol. 143 (2), pp. 204–214. DOI: 10.1016/j.sna.2007.10.063.
9. Lindgren M., Lepistö T. Effect of prestraining on Barkhausen noise vs. stress relation. *NDT & E International*, 2001, vol. 34 (5), pp. 337–344. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00073-6.
10. Brown W.F. Irreversible Magnetic Effects of Stress. *Physical Review*, 1949, vol. 75, pp. 147–154.
11. Cullity B.D. *Introduction to Magnetic Materials*. N.-Y.: Addison-Wesley Publishing Company, 1972, 564 p.
12. Sablik M.J., Burkhardt G.L., Kwun H., Jiles D.C. A model for the effect of stress on the low-frequency harmonic content of the magnetic induction in ferromagnetic materials. *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 63 (8), pp. 3930–3932. DOI: 10.1063/1.340609.
13. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, vol. 61 (1-2), pp. 48–60. DOI: 10.1016/0304-8853(86)90066-1.
14. Wang Z.D., Yao K., Ding K.Q. Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals. *NDT & E International*, 2010, vol. 43 (4), pp. 354–359. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.12.006.
15. Carman G.P., Mitrovic M. Nonlinear Constitutive Relations for Magnetostrictive Materials with Applications to 1-D Problems. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, vol. 6 (5), pp. 673–683. DOI: 10.1177/1045389x9500600508.
16. Wan Y., Fang D., Hwang K.C. Non-linear constitutive relations for magnetostrictive materials. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2003, vol. 38 (7), pp. 1053–1065. DOI: 10.1016/s0020-7462(02)00052-5.
17. Wang Z.D., Deng B., Yao K. Physical model of plastic deformation on magnetization in ferromagnetic materials. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, art. 083928. DOI: 10.1063/1.3574923.
18. Zatsepin H.N., Shcherbinin V.E. On the calculation of the magnetostatic field of surface defects. Part 1. Topography of the fields of defect models. *Defektoskopiya*, 1966, no. 5, pp. 50–59.
19. Sapozhnikov A.B. Some simple nonlinear calculations in the theory of magnetic flaw detection. *Trudy SFTI pri TGU*, 1950, is. 30, pp. 81–105.
20. Shcherbinin V.E., Pashagin A.I. The influence of the length of a defect on the magnitude of its magnetic field. *Defektoskopiya*, 1972, no. 4, pp. 74–82.
21. Dobmann G. Magnetic leakage techniques in NDT. A state-of-the-art survey of the capabilities for defect detection and sizing. *Electromagnetic Methods of NDT*, 1985, vol. 3, pp. 71–95.
22. Li Y., Tian G.Y., Ward S. Numerical simulations on electromagnetic NDT at high speed. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, vol. 48 (2), pp. 103–108. DOI: 10.1784/insi.2006.48.2.103.
23. Al-Naemi F.I., Hall J.P., Moses A.J. FEM modeling techniques of magnetic flux leakage-type NDT for ferromagnetic plate inspections. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 304 (2), pp. 790–793. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.02.225.
24. Babbar V., Shiari B., Clapham L. Mechanical Damage Detection With Magnetic Flux Leakage Tools: Modeling the Effect of Localized Residual Stresses. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, vol. 40 (1), pp. 43–49. DOI: 10.1109/TMAG.2003.821121.
25. Ovanesoza A.V., Suárez L.E. Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Engineering Structures*, 2004, vol. 26 (1), pp. 39–49. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.

26. Barkhausen H. Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen. *Physische Zeitschrift*, 1919, jg. 20, no. 17, pp. 401–403.
27. Clapham L., White S., Lee J., Atherton D.L. Stress measurement using magnetic Barkhausen noise and metal magnetic memory testing. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88 (4), pp. 2163–2168.
28. Stefanita C.-G., Atherton D.L., Clapham L. Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48 (13), pp. 3545–3551. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00134-8.
29. Rautioaho R., Karjalainen P., Moilanen M. Improvement of the Barkhausen noise method for stress evaluation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1988, vol. 73 (1), pp. 96–102. DOI: 10.1016/0304-8853(88)90174-6.
30. Krause T.W., Pulfer N., Weymann P., Atherton D.L. Magnetic Barkhausen noise: stress-dependent mechanisms in steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, vol. 32, is. 5, pp. 4764–4766. DOI: 10.1109/20.539144.
31. Kleber X., Vincent A. On the Role of Residual Internal Stresses and Dislocations on Barkhausen Noise in Plastically Deformed Steel. *NDT & E International*, 2004, vol. 37, pp. 439–445. DOI: org/10.1016/j.ndteint.2003.11.008.
32. Vaidyanathan S., Moorthy V., Kalyanasundaram P. et al. Effect of different stages of tensile deformation on micromagnetic parameters in high-strength, low-alloy steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, vol. 30 (8), pp. 2067–2072. DOI: 10.1007/s11661-999-0017-9.
33. Dhar A., Clapham L., Atherton D.L. Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel. *NDT & E International*, 2001, vol. 34, pp. 507–514.
34. Saquet O., Chicois J., Vincent A. Barkhausen Noise from Plain Carbon Steel. *Analysis of the Influence of Microstructure. Materials Science and Engineering*, 1999, vol. 269 (A), pp. 73–82. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00155-0.
35. Bhattacharya D.K., Vaidyanathan S. Effect of the Demagnetisation Factor on the Barkhausen Noise Signal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1997, vol. 166, pp. 111–116. DOI: 10.1016/S0304-8853(96)00444-1.
36. Dubov A.A. Detection of Metallurgical and Production Defects in Engineering Components Using Metal Magnetic Memory. *Metallurgist*, 2015, vol. 59 (1-2), pp. 164–167. DOI: 10.1007/s11015-015-0078-5.
37. Dong L., Xu B., Dong S. et al. Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel. *NDT & E International*, 2009, vol. 42 (4), pp. 323–327. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.12.005.
38. Yao K., Wang Z.D., Deng B., Shen K. Experimental Research on Metal Magnetic Memory Method. *Experimental Mechanics*, 2011, vol. 52 (3), pp. 305–314. DOI: 10.1007/s11340-011-9490-3.
39. Changliang S., Shiyun D., Binshi X., Peng H. Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferromagnetic steel under dynamic tension load. *NDT & E International*, 2010, vol. 43 (1), pp. 8–12. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.08.002.
40. Leng J., Xu M., Xu M., Zhang J. Magnetic field variation induced by cyclic bending stress. *NDT & E International*, 2009, vol. 42 (5), pp. 410–414. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.01.008.
41. Wilson J.W., Tian G.Y., Barrans S. Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed. *Sensors and Actuators: Physical A*, 2007, vol. 135 (2), pp. 381–387. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.10.006.
42. Roskosz M., Gawrilenko P. Analysis of changes in residual magnetic field in loaded notched samples. *NDT & E International*, 2008, vol. 41 (7), pp. 570–576. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.04.002.
43. Lednev I.S. Magnetic methods of non-destructive testing of aircraft parts. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.

44. Skorobogatko D.S., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Knyazev A.V. Comparison of the surface free energy of alloys most commonly used in the aviation industry, using the interaction method Owens–Wendt–Rabel–Kaelble (OWRK). *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-169-179.
45. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S., Slavin A.V. Automated non-destructive inspection of three-layer honeycomb structures' samples by ultrasonic through-transmission technique. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-74-80.
46. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 12. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: December 11, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
47. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
48. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 4. Development of heat-resistant materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19.
49. Kablov E.N., Babashov V.G., Balinova Yu.A., Maksimov V.G. Phase transformations in a composite material with an organic matrix filled with zirconium dioxide fibers. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2021, vol. 59, no. 1, pp. 62–68.
50. Kablov E.N., Chainikova A.S., Schegoleva N.E., Grashchenkov D.V., Kovaleva V.S., Belyanchikov I.O. Synthesis, structure, and properties of aluminosilicate glass ceramics modified with zirconium oxide. *Neorganicheskie materialy*, 2020, vol. 56, no. 10, pp. 1123–1129.

Информация об авторах

Леднев Игорь Сергеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Igor S. Lednev, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.02.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 25.02.2025.