

Научная статья

УДК 620.79

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-102-115

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.С. Леднев¹, Е.А. Ходакова¹

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

Аннотация. Представлен обзор одного из перспективных методов неразрушающего контроля деталей из ферромагнитных материалов – метода магнитной памяти металла. Рассмотрены физические основы, возможности применения, преимущества и недостатки метода магнитной памяти металла. Приведены примеры математического моделирования сигналов метода магнитной памяти металла, оценки остаточных напряжений и сравнения результатов, полученных в реальных условиях и при моделировании сигналов от возможных дефектов.

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, ферромагнитный материал, дефект, моделирование, авиационное производство, оборудование для контроля

Для цитирования: Леднев И.С., Ходакова Е.А. Неразрушающий контроль деталей из ферромагнитных материалов // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-102-115.

Scientific article

NONDESTRUCTIVE TESTING OF PARTS MADE OF FERROMAGNETIC MATERIALS

I.S. Lednev¹, E.A. Khodakova¹

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 a review one of the promising methods of non-destructive testing of parts made of ferromagnetic materials – the method of magnetic memory of metal. The physical foundations application possibilities, advantages and disadvantages of the metal magnetic memory method are considered. Examples of mathematical modeling of signals of the metal magnetic memory method, evaluation of residual stresses and comparison of the results obtained by modeling signals from possible defects with the results obtained in practice are given.

Keywords: magnetic non-destructive testing, ferromagnetic material, defect, modeling, aviation production, testing equipment

For citation: Lednev I.S., Khodakova E.A. Nondestructive testing of parts made of ferromagnetic materials. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-102-115.

Введение

Неразрушающий контроль – это широкая междисциплинарная область знаний, имеющая решающее значение при проверке структурных компонентов и систем, которые должны надежно выполнять свои функции в течение длительного времени. В авиастроительной промышленности надежность применяемых материалов имеет существенное влияние на общую безопасность производимых изделий [1–3]. Для того чтобы повысить надежность проводимого контроля, необходимо внедрение актуализированных стандартов и методик для неразрушающих испытаний и предотвращения ошибок измерений, вызванных неисправностью используемого оборудования, неправильным применением методов измерений, отсутствием навыков и знаний у специалистов по неразрушающему контролю. Успешные неразрушающие испытания позволяют охарактеризовать состояние материалов и выявить дефекты, которые в некоторых случаях могли бы привести к аварийным ситуациям и множеству поломок ответственных деталей авиационной техники. Однако эти методы, как правило, требуют универсальных навыков при работе оператора, а точная интерпретация результатов тестирования может быть затруднена, поскольку они оказываются субъективными. В данной статье рассмотрен один из магнитных методов неразрушающего контроля, с помощью которого специалисты смогут минимизировать общую стоимость закупаемого оборудования, свести к минимуму ущерб и максимально повысить безопасность машин, конструкций и материалов в авиационной технике. Представлены также примеры математического моделирования метода магнитной памяти металла (МПМ).

Ферромагнитные материалы (в данном случае – сталь) обладают хорошими механическими свойствами, и изготовленные из них инженерные конструкции широко используются в аэрокосмической промышленности, а также на железных дорогах, в трубопроводах, сосудах высокого давления и нефтехимической промышленности. Однако либо из-за невысокого уровня подготовки специалистов, либо из-за усталостных повреждений, возникающих во время эксплуатации, образующиеся в ферромагнитных материалах дефекты оказывают существенное влияние на безопасность эксплуатации авиационной техники и могут даже привести к авариям. В изделиях авиационной отрасли местоположение и степень повреждения конструкций должны быть определены своевременно, после чего необходимо провести ремонт или замену поврежденных деталей и узлов, чтобы избежать несчастного случая из-за повреждения материала. С помощью неразрушающего контроля можно обнаружить повреждения без влияния на эксплуатационные характеристики конструкции или материала, а для многих отраслей промышленности неразрушающий контроль материалов очень важен как с теоретической, так и практической точки зрения [4–9].

Материалы и методы

Установлено, что существует взаимосвязь между напряженным состоянием и повреждениями изделия, выполненного из ферромагнитных материалов, и его магнитными свойствами. Так, в статье [10] приведено описание экспериментальных исследований и показано, что остаточная намагниченность сварных швов в ферромагнитных материалах тесно связана с величиной остаточного напряжения. Авторы работ [11, 12] утверждают, что изменения в магнитном поле вокруг заглубленного трубопровода могут отражать изменения в его напряженном состоянии. Это означает, что распределение магнитного сигнала связано с напряженным состоянием материала, что позволяет оценить напряженное состояние ферромагнитного материала по его магнитному сигналу [13]. В более ранних исследованиях [11, 12], упомянутых ранее, магнитный сигнал измеряли с относительно большого расстояния: 10 см и более от поверхности объекта.

Метод оценки напряжений и повреждений материала, основанный на измерении поля самонамагничивания вблизи поверхности, называется методом магнитной памяти металла (МПМ) [14]. Если магнитный сигнал измеряется вблизи поверхности материала на небольшом расстоянии в геомагнитной среде, то измеренный сигнал может быть использован для оценки состояния концентрации напряжений и степени повреждения образца вблизи места измерения. Например, магнитная область в зоне концентрации напряжений может быть правильно ориентирована из-за высокой нагрузки и геомагнитного поля (собственного магнитного поля Земли), а поле самонамагничивания, измеренное вблизи поверхности, может быть сохранено, даже если нагрузка снята. Самонамагничивание деталей и узлов может возникать благодаря магнитоупругому эффекту в ферромагнитных материалах. Сигнал МПМ вблизи дефекта или концентрации напряжений очевидно носит нелинейный характер (рис. 1) [15]. Тангенциальная составляющая магнитного поля дефекта H_x имеет максимальное значение вблизи положения концентрации напряжений или зоны дефекта, где нормальная составляющая магнитного поля дефекта H_y обычно равна 0. Следовательно, местоположение концентрации напряжений или зоны дефекта может быть идентифицировано с использованием положения максимального значения тангенциальной составляющей H_x и характеристики нулевого значения нормальной составляющей H_y . Кроме того, характеристики сигнала, такие как интервал от пика до впадины нормальной составляющей H_y и пиковое значение тангенциальной составляющей H_x , связаны с размером дефекта или концентрацией напряжений. Это означает, что измерение характеристик сигнала теоретически может количественно определить размер возможных повреждений.

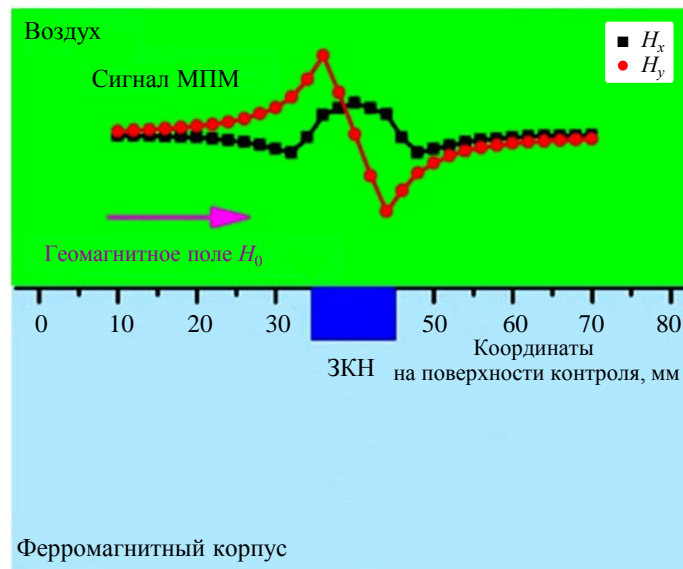


Рис. 1. Принципиальная схема сигнала магнитной памяти металла (МПМ), вызванного зоной концентрации напряжений (ЗКН)

Метод МПМ рассматривается как перспективная технология неразрушающего контроля и может считаться эффективным методом для обнаружения ранних повреждений ферромагнитных материалов. Проведенные исследования механизма и теории метода МПМ включали эффект магнитомеханической (магнитомеханические эффекты связывают магнитные, механические и электрические явления в твердых материалах) связи ферромагнитных материалов [15, 16], основные характеристики сигналов МПМ, индуцируемых концентрацией напряжений и дефектами, и другие вопросы, связанные

со слабым магнитным полем и внешними силами. Эти исследования помогли прояснить магнитомеханическое поведение ферромагнитных материалов и позволили на основе метода МПМ провести количественную оценку напряжений и повреждений в материале. Таким образом, можно эффективно отслеживать развитие усталостных повреждений в ферромагнитных материалах или конструкциях авиационной техники. Исследования, связанные с методом МПМ, важны как с научной точки зрения, так и в практике неразрушающего контроля. Такие исследования способствуют пониманию законов физики ферромагнетизма и вносят вклад в научное определение обнаружения повреждений материала. Связанные с этим исследования также помогут решить общие научные проблемы в смежных дисциплинах.

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

Результаты и обсуждения

В работах [17–20] предложен метод неразрушающего контроля, известный как метод магнитной памяти металла (МПМ), для обнаружения концентраций напряжений и дефектов в ферромагнитных конструкциях – например, в трубах. Метод МПМ в основном применим к магнитомягким ферромагнитным материалам, таким как среднеуглеродистая сталь, широко используемая в машиностроении. Основным принципом заключается в том, что ферромагнитный материал проявляет эффект силовой магнитной связи, при котором механическая и магнитная энергии взаимно преобразуются, как показано на рис. 2 [21]. Основная теория ферромагнетизма предполагает, что длина ферромагнитных материалов, помещенных во внешнее магнитное поле, меняется из-за колебаний состояния их намагниченности (рис. 2, а), т. е. ферромагнитные материалы обладают магнитострикционными свойствами, которые также известны как эффект Джоуля [22]. Как показано на рис. 2, б, приложенное напряжение изменяет ориентацию магнитных доменов внутри ферромагнитного материала, что изменяет его магнитные свойства. Таким образом, ферромагнитные материалы обладают обратным магнитострикционным эффектом, также известным как эффект Виллайи [23] или магнитомеханический эффект [16]. Магнитострикционный и обратный магнитострикционный эффекты отражают взаимное преобразование между напряжением и магнетизмом в ферромагнитных материалах [24].

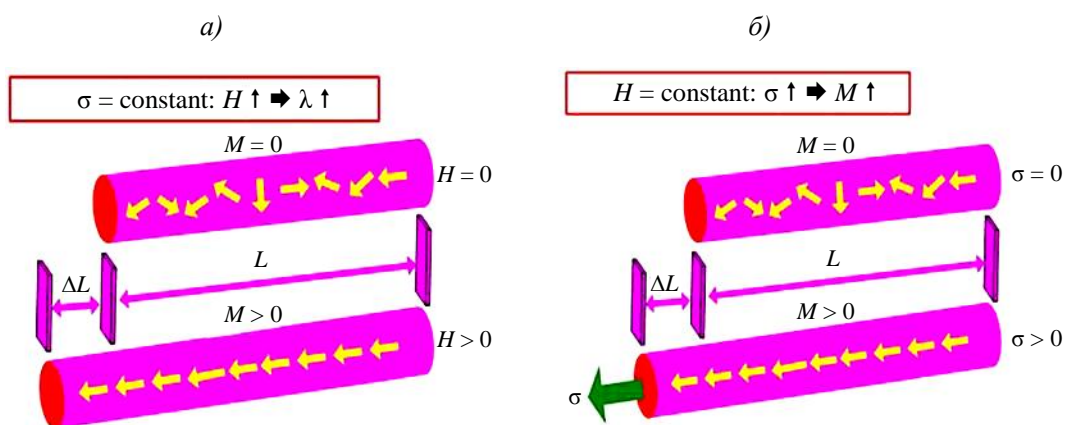


Рис. 2. Принципиальная схема явления силовой магнитной связи для ферромагнитных материалов: а – магнитострикционный эффект; б – обратный магнитострикционный эффект. M – магнитный момент; H – напряженность магнитного поля; λ – относительная деформация; σ – механическое напряжение

Принцип метода МПМ схематично показан на рис. 3 [25]. Этот метод позволяет оценить состояние остаточных напряжений внутри ферромагнитного образца. Когда ферромагнитный материал в геомагнитной среде подвергается воздействию внешней силы, его магнитные свойства изменяются из-за магнитомеханического эффекта материала. Любой дефект или концентрация напряжений влияют на магнитомеханический эффект, который, в свою очередь, генерирует сигнал МПМ, измеряемый вблизи поверхности. Измеряя сигнал МПМ вблизи поверхности образца, можно определить местоположение и степень зоны концентрации напряжений или дефекта, что позволяет проводить раннюю диагностику ферромагнитного материала и его структурных повреждений [26].

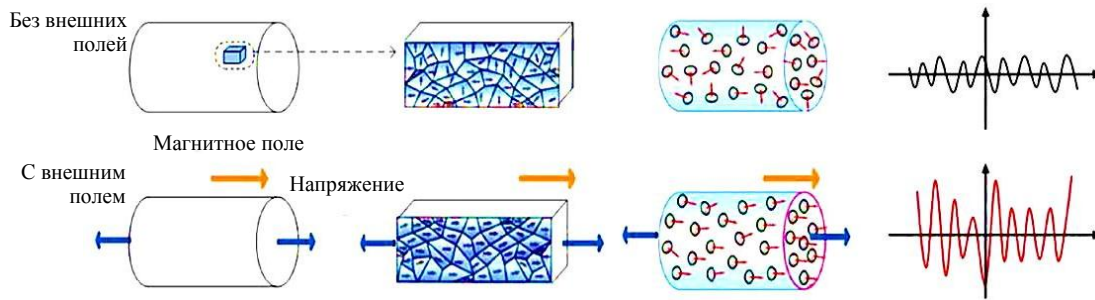


Рис. 3. Принципиальная схема метода магнитной памяти металла

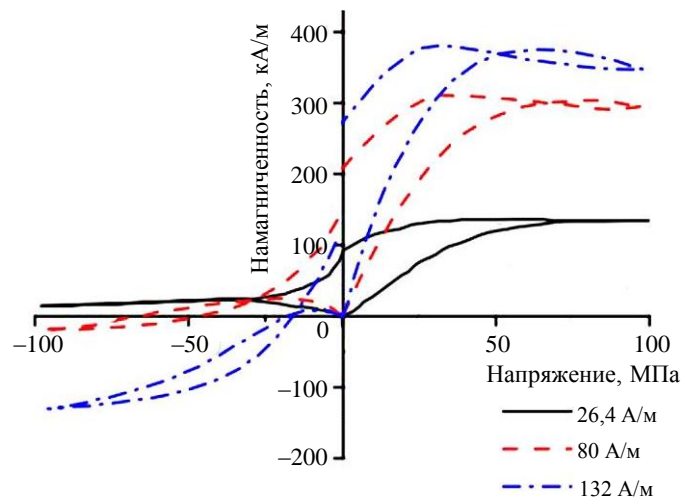


Рис. 4. Экспериментальные результаты магнитомеханического воздействия в условиях постоянных слабых внешних магнитных полей

В статье [27] приведено экспериментальное измерение магнитомеханических кривых с изменяющимся приложенным напряжением в постоянных слабых магнитных полях, которые для поликристаллических ферромагнитных материалов составляли 26,4; 80 и 132 А/м. На рис. 4 показаны экспериментальные результаты изменения намагниченности при изменении напряжения в условиях слабого постоянного магнитного поля. Из результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

- с увеличением напряжения намагниченность сначала увеличивается, затем снижается, причем гораздо медленнее при растяжении, чем при сжатии;
- при снятии растягивающего напряжения намагниченность первоначально не изменяется – сначала увеличивается, затем снижается;

– в случае сжатия намагниченность всегда увеличивается при снятии напряжения и достигает своего максимального значения при своевременном снятии давления.

Экспериментальные результаты доказывают, что в условиях слабого магнитного поля (такого как геомагнитное поле) изменение напряжения вызывает изменение намагниченности материала. Эффект магнитомеханической связи считается основным принципом формирования сигнала магнитной памяти.

Моделирование

На основе модели магнитного диполя [28] получены аналитические выражения сигналов МПМ, вызванных четырьмя различными поверхностными дефектами. Представлено также обсуждение влияния сложной формы дефектов на силу и распределение сигналов МПМ вблизи поверхности.

В статье [29] со ссылкой на метод обработки магнитного потока рассеяния изучены и проанализированы сигналы МПМ, индуцированные трещинами. Предполагая постоянное распределение плотности магнитного заряда, измеренной вблизи поверхности трещины, сигнал МПМ проанализирован с использованием дипольного метода.

В публикации [30] изучены характеристики сигнала МПМ от V-образной канавки с помощью экспериментов, как показано на рис. 5. Видно, что сигнал МПМ становится нелинейным вблизи канавки, и эта нелинейность возрастает с увеличением нагрузки. Сравнение графиков на рис. 5 показывает, что моделируемые и экспериментальные значения дают сигналы со схожей морфологией.

В работе [31] представлено аналитическое выражение, основанное на теории магнитного диполя, для объяснения резкого изменения сигнала МПМ при разрушении ферромагнитных материалов.

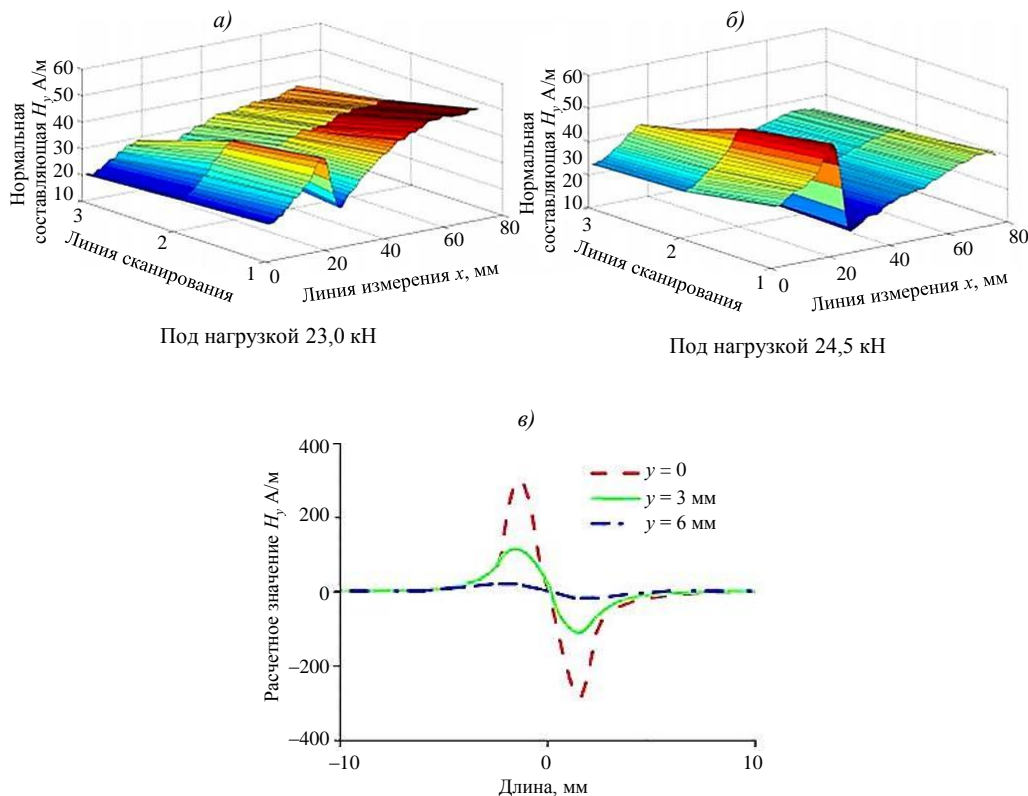


Рис. 5. Характеристики сигнала магнитной памяти металла, вызванного дефектами канавок: а, б – экспериментальные значения; в – моделируемые значения (y – расстояние от поверхности образца до измерительного датчика)

Предполагая линейно распределенную плотность магнитного заряда в области концентрации поверхностных напряжений материала, в публикациях [32, 33] использовали дипольный метод для создания теоретической модели сигнала МПМ вблизи области концентрации напряжений. Сначала, исходя из вышеупомянутого предположения, с использованием дипольного метода создали теоретическую модель одномерной линии концентрации напряжений, а далее расширили одномерную модель до двумерной модели концентрации напряжений, как показано на рис. 6.

На рис. 7 представлены результаты моделирования сигнала МПМ в двумерной зоне концентрации напряжений [33], которые качественно отражают нелинейные характеристики поверхностного сигнала МПМ вблизи области концентрации напряжений.

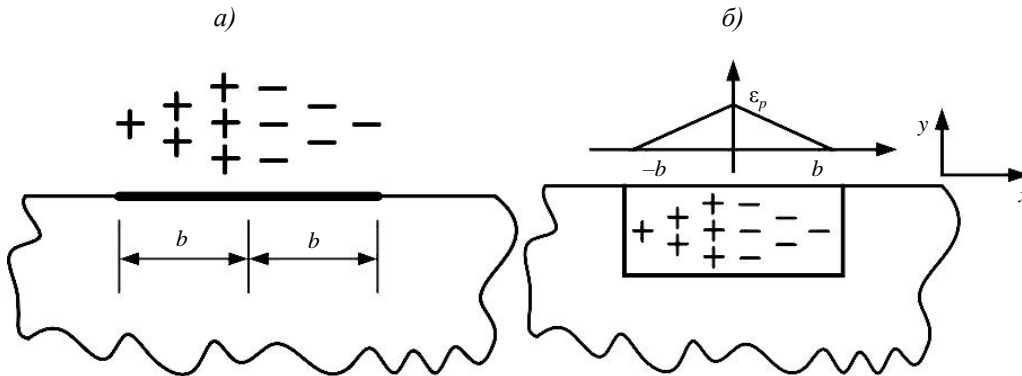


Рис. 6. Схема модели магнитного заряда в области концентрации напряжений по одномерной (а) и двумерной моделям (б); ϵ_p – пластическая деформация

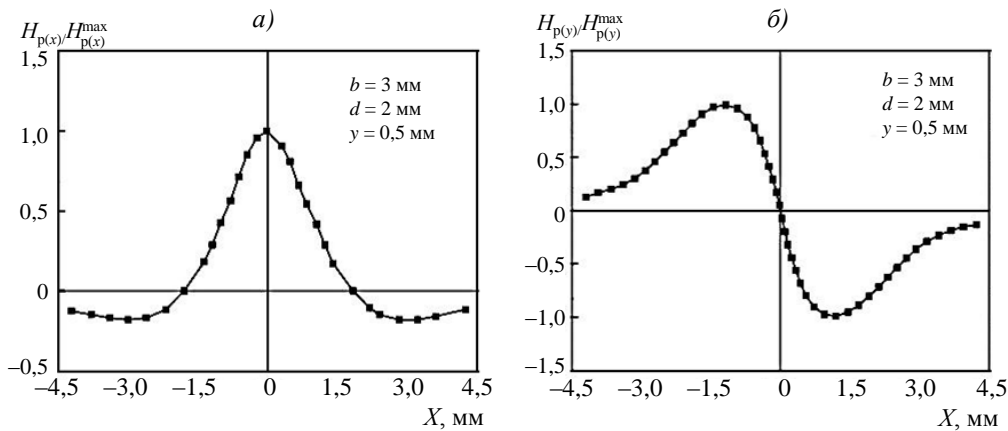


Рис. 7. Результаты моделирования для сигнала магнитной памяти металла на основе модели с двумерной областью концентрации напряжений: а – тангенциальная составляющая; б – нормальная составляющая (b – ширина зоны дефекта; d – глубина дефекта; y – расстояние от поверхности образца до измерительного датчика)

В инженерной практике фактическая геометрическая форма зоны концентрации напряжений обычно имеет ширину. Для того чтобы исправить недостатки существующих двумерных моделей концентрации напряжений, представленных на рис. 8 [15], предложили трехмерную 3D-модель концентрации напряжений магнитного заряда для исправления предыдущих 1D- и 2D-моделей. Предполагается, что пластическая деформация достигает максимума (соответственно, нуля) на оси зоны концентрации напряжений и линейно уменьшается (соответственно, увеличивается) до нуля (соответственно,

максимума). Предполагая линейную зависимость между плотностью магнитного заряда и напряжением или пластической деформацией, трехмерный сигнал МПМ (H_m) может быть выражен как:

$$H_m(r) = \frac{\rho_1}{4\pi} \int_{-a-d-b}^0 \int_{-d-b}^0 \int_0^b \left(\frac{m+a}{a} + \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) \frac{r}{|r|^3} dm \cdot dn \cdot dt + \frac{\rho_1}{4\pi} \int_0^a \int_{-d-b}^0 \int_0^b \left(\frac{m+a}{a} - \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) \frac{r}{|r|^3} dm \cdot dn \cdot dt,$$

где ρ_1 и ρ_0 – максимальная и минимальная объемная плотность магнитного заряда в области концентрации напряжений; a, d, b – геометрические размеры области концентрации напряжений; r, m, n – значения по осям;

$$\rho = -\Delta M,$$

где ρ – объемная плотность магнитного заряда, а намагниченность M при напряжении и магнитном поле может быть вычислена с помощью различных зависимостей, определяющих намагниченность.

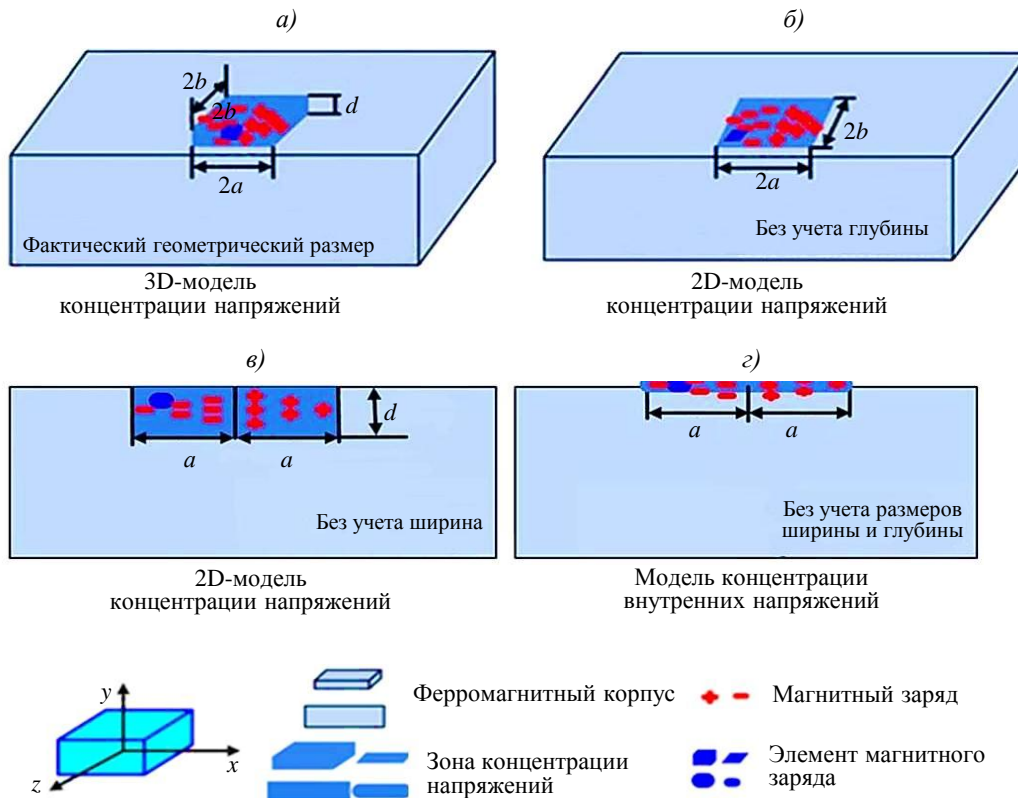


Рис. 8. Схемы моделей магнитного заряда для анализа магнитных сигналов

Как показано на рис. 9, а, модель магнитного заряда в области концентрации напряжений сравнивается с экспериментальными результатами [15]. Результаты моделирования, полученные с использованием модели магнитного заряда, согласуются с экспериментальными данными, тем самым подтверждая эффективность модели магнитного заряда для моделирования концентрации напряжений и других повреждений. На рис. 9, б дано сравнение нового [15] и предыдущего аналитических решений [32] и результаты численного решения для тангенциальной составляющей магнитного поля, что указывает на наличие проблем с аналитическими выражениями в существующей научно-технической литературе [32].

Кроме того, теоретические результаты для сигналов МПМ, измеренных вблизи поверхностей материалов с длинными эллиптическими дефектами, получены с использованием модели магнитного заряда. На рис. 10 показано, что теоретические результаты для сигнала МПМ, полученные с помощью модели магнитного заряда, хорошо согласуются с экспериментальными результатами [34].

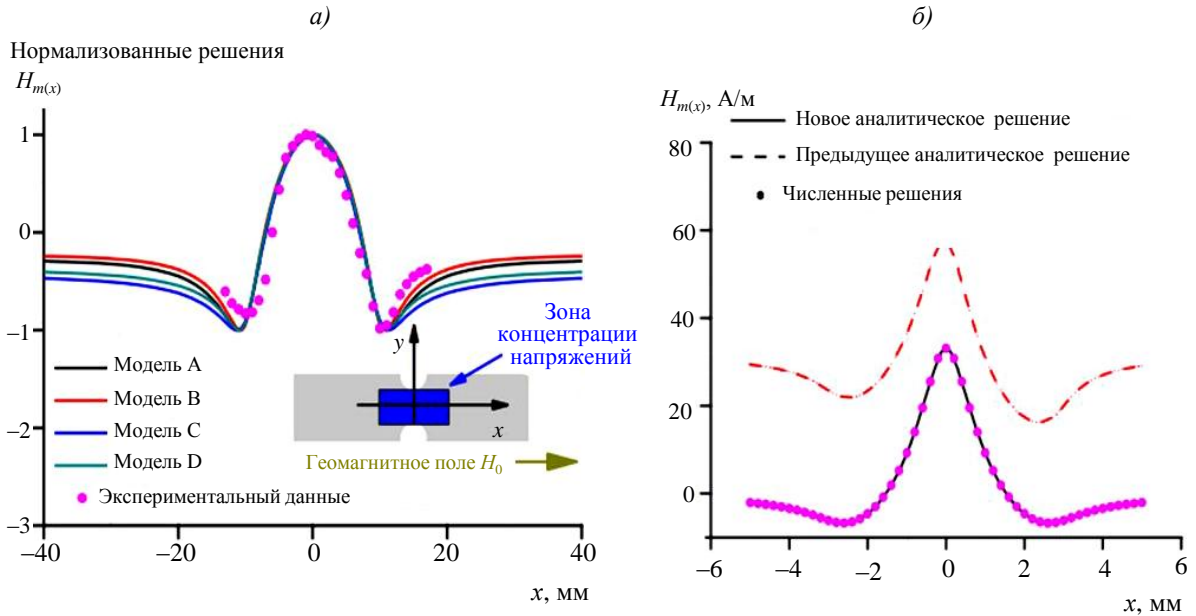


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования и эксперимента для сигнала магнитной памяти металла

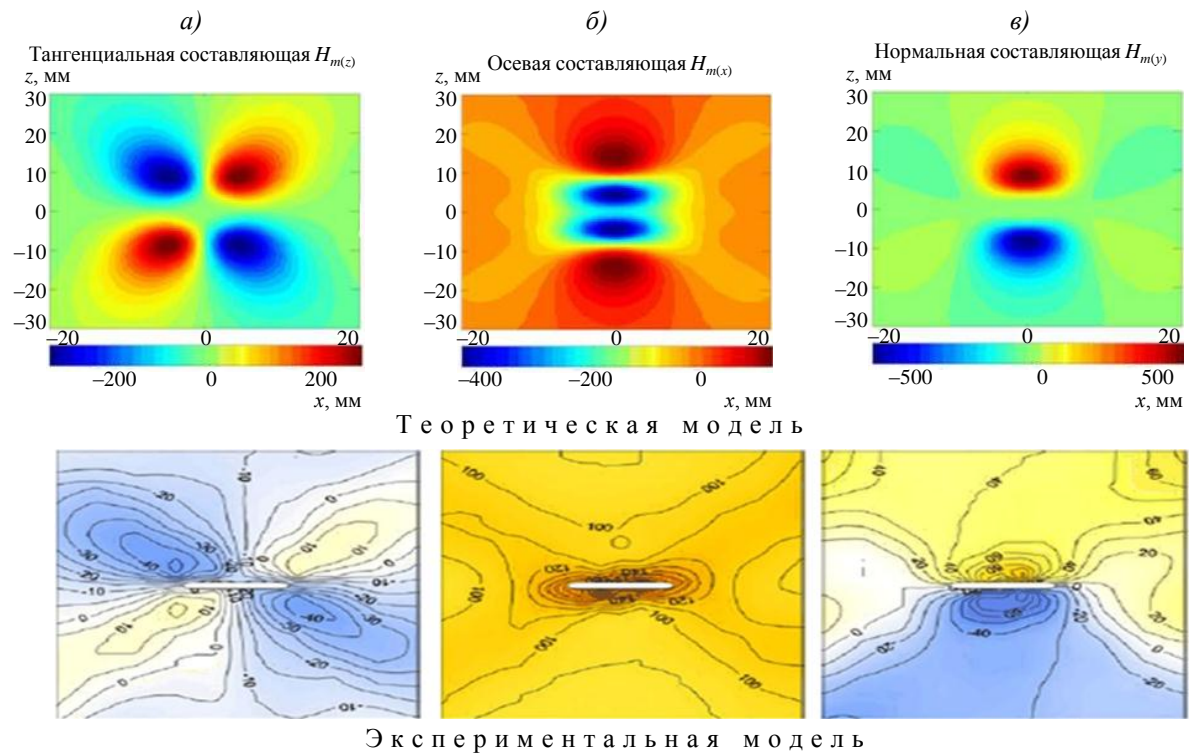


Рис. 10. Результаты моделирования распределения сигнала магнитной памяти металла, вызванного трещиной

В публикации [35] использовали модель магнитного заряда, предложенную в работе [15], чтобы выявить влияние напряжения на сигналы МПМ вокруг дефекта с помощью испытаний стальной проволоки на растяжение.

Заключения

В качестве технологии неразрушающего контроля метод МПМ может быть перспективным инструментом для ранней диагностики и прогнозирования срока службы ферромагнитных компонентов. Продолжаются также теоретические и практические исследования метода. Разработка приборов и оборудования на основе экспериментальных исследований, локализация возможных дефектных зон и инженерный контроль – основные перспективные направления развития для применения метода МПМ.

В отечественной практике метод МПМ получил распространение для контроля оборудования и конструкций, работающих под высоким давлением, а также для контроля сварных соединений [36–38].

Основные проблемы, с которыми сталкиваются на практике, – это внешние и внутренние влияющие факторы, повторяемость результатов и надежность обнаружения возможных дефектов, а также количественная оценка результата. По-прежнему необходимы систематические исследования теоретических моделей метода МПМ, а также соответствующей количественной зависимости между сигналом МПМ и геометрической формой дефекта для использования при детектировании.

Теоретические модели сигналов МПМ при математическом моделировании еще не могут полностью учитывать совокупное влияние температуры, влажности и магнитного поля окружающей среды, формы нагрузки и других факторов на сигнал МПМ. Существующие критерии определения повреждений часто не находят практического применения. Поскольку испытываемая в реальных условиях конструкция часто подвергается длительной циклической нагрузке, то ожидается, что сигнал МПМ и его характерная величина изменятся в процессе исследований. Это приводит к большому прогрессу в области механизма обнаружения дефектов методом МПМ и изучению характеристик сигнала МПМ. Такие достижения позволят при применении метода МПМ в полной мере способствовать предварительной диагностике повреждений ферромагнитных материалов.

Для повышения достоверности получаемых результатов при контроле методом МПМ в последующем необходимы как теоретические, так и практические исследования.

Список источников

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. The influence of internal stresses on the aging of polymer composite materials: a review // *Mechanics of Composite Materials*. 2021. Vol. 57. No. 5. P. 565–576. DOI: 10/1007/s11029-021-09979-6.
3. Каблов Е.Н. Материалы на все времена // Наука и жизнь. 2010. № 10. С. 12–19.
4. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
5. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Повышение чувствительности и разрешающей способности ультразвукового неразрушающего контроля монолитных образцов из ПКМ с использованием фазированных решеток // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 83–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88.

6. 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.
7. Скоробогатько Д.С., Головков А.Н., Кудинов И.И., Куличкова С.И. К вопросу об экотоксичности и эффективности различных классов промышленных неионогенных ПАВ, используемых при очистке металлических поверхностей в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106.
8. Скоробогатько Д.С., Головков А.Н., Кудинов И.И., Куличкова С.И. Оценка эффективности использования водных моющих растворов на основе различных классов ПАВ для очистки металлических поверхностей перед проведением капиллярного люминесцентного контроля // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-137-147.
9. 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: 29.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
10. Suzuki M., Komura I., Takahashi H. Nondestructive estimation of residual stress in welded pressure vessel steel by means of remanent magnetization measurement // *The International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1978. Vol. 6. No. 2. P. 87–112.
11. Atherton D., Coathup L., Jiles D. et al. Stress induced magnetization changes of steel pipes: laboratory tests // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1983. Vol. 19. No. 4. P. 1564–1568. DOI: 10.1109/TMAG.1983.1062576.
12. Atherton D., Welbourn C., Jiles D. et al. Stress induced magnetization changes of steel pipes: laboratory tests. Part II // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1984. Vol. 20. No. 6. P. 2129–2136. DOI: 10.1109/TMAG.1984.1063572.
13. Atherton D., Jiles D. Effects of stress on magnetization // *NDT International*. 1986. Vol. 19. No. 1. P. 15–19. DOI: 10.1016/0308-9126(86)90135-5.
14. Dubov A. A study of metal properties using the method of magnetic memory // *Metal Science and Heat Treatment*. 1997. Vol. 39. No. 9. P. 401–405. DOI: 10.1007/bf02469065.
15. Shi P., Zheng X. Magnetic charge model for 3D MMM signals // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016. Vol. 1. No. 1. P. 45–60. DOI: 10.1080/10589759.2015.1064121.
16. Jiles D.C. Theory of the magnetomechanical effect // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1995. Vol. 8. No. 8. P. 1537–1546. DOI: 10.1088/0022-3727/28/8/001.
17. Dubov A. Development of a metal magnetic memory method // *Safety, Diagnosis, and Repair*. 2012. Vol. 47. P. 837–839. DOI: 10.1007/s10556-012-9559-6.
18. Tanasienko A.G., Suntsov S.I., Dubov A.A. Monitoring chemical plant by a metal magnetic memory method // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2002. Vol. 38. P. 624–629. DOI: 10.1023/A:1022089310320.
19. Kuleev V.G., Dubov A.A., Lopatin V.V. Zero-level lines of scattered field on surfaces of ferromagnetic steel pipes with flaws // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2002. Vol. 38. No. 5. P. 343–356. DOI: 10.1023/A:1020965019074.
20. Dubov A.A. Detection of metallurgical and production defects in engineering components using metal magnetic memory // *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. P. 164–167. DOI: 10.1007/s11015-015-0078-5.
21. Кузнецов И.С., Ивашов Е.Н., Васин В.А., Баранов А.М. Информационные технологии проектирования в микро- и наноинженерии: учеб. пособие в 3 т. Ивантеевка: Изд-во НИИ предельных технологий, 2014. Т. 3. 234 с.
22. Плетнев С.В. Магнитное поле, свойства, применение: науч. и учеб.-метод. справ. пособие. СПб.: Гуманистика, 2004. 624 с.

23. Боков В.А. Физика магнетиков: учеб. пособие. М.: Невский Диалект; БХВ-Петербург, 2002. 272 с.
24. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы: учебник для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.
25. Zhang P., Liu L., Chen W. Analysis of characteristics and key influencing factors in magnetomechanical behavior for cable stress monitoring // *Acta Physica Sinica*. 2013. Vol. 62. No. 17. DOI: 10.7498/aps.62.177501.
26. Shi P., Jin K., Zhang P., Shejuan X. Quantitative inversion of stress and crack in ferromagnetic materials based on metal magnetic memory method // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018. Vol. 99. P. 1–11. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2856894.
27. Craik D., Wood M. Magnetization changes induced by stress in a constant applied field // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002. Vol. 3. No. 7. P. 1009–1016. DOI: 10.1088/0022-3727/3/7/303.
28. Pengpeng S. Analytical solutions of magnetic dipole model for defect leakage magnetic fields // *Nondestructive Testing*. 2015. Vol. 37. P. 1–7.
29. Huang H., Jiang S., Yang C. et al. Stress concentration impact on the magnetic memory signal of ferromagnetic structural steel // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2014. Vol. 29. No. 4. P. 377–390. DOI: 10.1080/10589759.2014.949710.
30. Leng J., Xu M., Li J. et al. Characterization of the elastic-plastic region based on magnetic memory effect // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 23. No. 4. P. 532–536. DOI: 10.3901/CJME.2010.04.532.
31. Shi P., Bai P., Chen H. et al. The magneto-elastoplastic coupling effect on the magnetic flux leakage signal // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Art. 166669. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166669.
32. Wang Z., Yao K., Deng B. et al. Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals // *NDT&E International*. 2010. Vol. 43. No. 4. P. 354–359. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.12.006.
33. Wang Z., Yao K., Deng B. et al. Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration // *NDT&E International*. 2010. Vol. 43. No. 6. P. 513–518. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.007.
34. Roskosz M., Rusin A., Bieniek M. Analysis of relationships between residual magnetic field and residual stress // *Meccanica*. 2013. Vol. 48. No. 1. P. 45–55. DOI: 10.1007/s11012-012-9582-x.
35. Su S., Ma X., Wang W., Yang Y. Stress-dependent magnetic charge model for micro-defects of steel wire based on the magnetic memory method // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2020. Vol. 31. No. 1. P. 24–47. DOI: 10.1080/09349847.2019.1617914.
36. ГОСТ Р ИСО 24497-1–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 1. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 5 с.
37. ГОСТ Р ИСО 24497-2–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 2. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2010. 6 с.
38. ГОСТ Р ИСО 24497-3–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 3. Контроль сварных соединений. М.: Стандартинформ, 2010. 9 с.

References

1. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. The influence of internal stresses on the aging of polymer composite materials: a review. *Mechanics of Composite Materials*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 565–576. DOI: 10/1007/s11029-021-09979-6.
3. Kablov E.N. Materials for all times. *Nauka i zhizn*, 2010, no. 10, pp. 12–19.
4. Kosarina E.I., Krupnina O.A., Demidov A.A., Mikhaylova N.A. Digital optical pattern and its dependence on the radiation image at non-destructive testing by method of digital radiography. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
5. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. The increase of sensitivity and resolution of FRP solid samples nondestructive ultrasonic testing using the ultrasonic phased array. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 83–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88.

6. 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.
7. Skorobogatko D.S., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Kulichkova S.I. Revisiting the ecotoxicity and efficiency of different classes of industrial nonionic surfaces used for cleaning metal surfaces in the process of capillary control of details of the aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 29, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106.
8. Skorobogatko D.S., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Kulichkova S.I. Evaluation of efficiency of using water washing solutions based on different classes of surfactants for cleaning metal surfaces before carrying out capillary fluorescent penetrant testing. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 29, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-137-147.
9. 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: November 29, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
10. Suzuki M., Komura I., Takahashi H. Nondestructive estimation of residual stress in welded pressure vessel steel by means of remanent magnetization measurement. *The International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1978, vol. 6, no. 2, pp. 87–112.
11. Atherton D., Coathup L., Jiles D. et al. Stress induced magnetization changes of steel pipes: laboratory tests. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1983, vol. 19, no. 4, pp. 1564–1568. DOI: 10.1109/TMAG.1983.1062576.
12. Atherton D., Welbourn C., Jiles D. et al. Stress induced magnetization changes of steel pipes: laboratory tests. Part II. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, vol. 20, no. 6, pp. 2129–2136. DOI: 10.1109/TMAG.1984.1063572.
13. Atherton D., Jiles D. Effects of stress on magnetization. *NDT International*, 1986, vol. 19, no. 1, pp. 15–19. DOI: 10.1016/0308-9126(86)90135-5.
14. Dubov A. A study of metal properties using the method of magnetic memory. *Metal Science and Heat Treatment*, 1997, vol. 39, no. 9, pp. 401–405. DOI: 10.1007/bf02469065.
15. Shi P., Zheng X. Magnetic charge model for 3D MMM signals. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 45–60. DOI: 10.1080/10589759.2015.1064121.
16. Jiles D.C. Theory of the magnetomechanical effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, vol. 8, no. 8, pp. 1537–1546. DOI: 10.1088/0022-3727/28/8/001.
17. Dubov A. Development of a metal magnetic memory method. *Safety, Diagnosis, and Repair*, 2012, vol. 47, pp. 837–839. DOI: 10.1007/s10556-012-9559-6.
18. Tanasienko A.G., Suntsov S.I., Dubov A.A. Monitoring chemical plant by a metal magnetic memory method. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2002, vol. 38, pp. 624–629. DOI: 10.1023/A:1022089310320.
19. Kuleev V.G., Dubov A.A., Lopatin V.V. Zero-level lines of scattered field on surfaces of ferromagnetic steel pipes with flaws. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 343–356. DOI: 10.1023/A:1020965019074.
20. Dubov A.A. Detection of metallurgical and production defects in engineering components using metal magnetic memory. *Metallurgist*, 2015, vol. 59, pp. 164–167. DOI: 10.1007/s11015-015-0078-5.
21. Kuznetsov I.S., Ivashov E.N., Vasin V.A., Baranov A.M. *Information technology design in micro- and nanoengineering*: textbook in 3 vols. Ivanteevka: Publ. house of the Scientific Research Institute of Limit Technologies, 2014, vol. 3, 234 p.
22. Pletnev S.V. *Magnetic field, properties, application*: scientific and educational reference manual. St. Petersburg: Humanistics, 2004, 624 p.
23. Bokov V.A. *Physics of magnets*: textbook. Moscow: Nevsky Dialect; BHV-Petersburg, 2002. 272 p.

24. Preobrazhensky A.A., Bishard E.G. *Magnetic materials and elements: a textbook for univ.* 3rd ed., rev. and add. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 352 p.
25. Zhang P., Liu L., Chen W. Analysis of characteristics and key influencing factors in magnetomechanical behavior for cable stress monitoring. *Acta Physica Sinica*, 2013, vol. 62, no. 17. DOI: 10.7498/aps.62.177501.
26. Shi P., Jin K., Zhang P., Shejuan X. Quantitative inversion of stress and crack in ferromagnetic materials based on metal magnetic memory method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 99, pp. 1–11. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2856894.
27. Craik D., Wood M. Magnetization changes induced by stress in a constant applied field. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, vol. 3, no. 7, pp. 1009–1016. DOI: 10.1088/0022-3727/3/7/303.
28. Pengpeng S. Analytical solutions of magnetic dipole model for defect leakage magnetic fields. *Nondestructive Testing*, 2015, vol. 37, pp. 1–7.
29. Huang H., Jiang S., Yang C. et al. Stress concentration impact on the magnetic memory signal of ferromagnetic structural steel. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2014, vol. 29, no. 4, pp. 377–390. DOI: 10.1080/10589759.2014.949710.
30. Leng J., Xu M., Li J. et al. Characterization of the elastic-plastic region based on magnetic memory effect. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, vol. 23, no. 4, pp. 532–536. DOI: 10.3901/CJME.2010.04.532.
31. Shi P., Bai P., Chen H. et al. The magneto-elastoplastic coupling effect on the magnetic flux leakage signal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, art. 166669. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166669.
32. Wang Z., Yao K., Deng B. et al. Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals. *NDT&E International*, 2010, vol. 43, no. 4, pp. 354–359. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.12.006.
33. Wang Z., Yao K., Deng B. et al. Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration. *NDT&E International*, 2010, vol. 43, no. 6, pp. 513–518. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.007.
34. Roskosz M., Rusin A., Bieniek M. Analysis of relationships between residual magnetic field and residual stress. *Meccanica*, 2013, vol. 48, no. 1, pp. 45–55. DOI: 10.1007/s11012-012-9582-x.
35. Su S., Ma X., Wang W., Yang Y. Stress-dependent magnetic charge model for micro-defects of steel wire based on the magnetic memory method. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2020, vol. 31, no. 1, pp. 24–47. DOI: 10.1080/09349847.2019.1617914.
36. State Standard R ISO 24497-1–2009. *Non-destructive testing. Metal magnetic memory method. Part 1. Terms and definitions*. Moscow: Standartinform, 2010, 5 p.
37. State Standard R ISO 24497-2–2009. *Non-destructive testing. Metal magnetic memory method. Part 2. General requirements*. Moscow: Standartinform, 2010, 6 p.
38. State Standard R ISO 24497-3–2009. *Non-destructive testing. Metal magnetic memory method. Part 3. Inspection of welded joints*. Moscow: Standartinform, 2010, 9 p.

Информация об авторах

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

Ходакова Елизавета Александровна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Igor S. Lednev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elizaveta A. Khodakova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.01.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.01.2024.
The article was submitted 23.01.2024; approved and accepted for publication after reviewing 30.01.2024.