ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ ДЕФЕКТОВ В МАГНИТОМЯГКИХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MFL-ДАННЫХ

© 2022 г. А.В. Никитин^{1,*}, А.В. Михайлов^{1,**}, Л.В. Михайлов^{1,***}, Ю.Л. Гобов^{1,****}, В.Н. Костин^{1,*****}, Я.Г. Смородинский^{1,*****}

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18 E-mail: *an@imp.uran.ru; **mikhaylov@imp.uran.ru; *****mikhaylov_lv@imp.uran.ru; *****go@imp.uran.ru; *****kostin@imp.uran.ru; ******sm@imp.uran.ru

> Поступила в редакцию 11.07.2022; после доработки 26.07.2022 Принята к публикации 02.08.2022

Создана экспериментальная установка, позволяющая измерять значения компонент магнитного поля над поверхностью исследуемой металлической пластины в автоматическом режиме. Экспериментальная установка считывает показания магнитных преобразователей Холла и отправляет обработанную информацию в компьютер, в виде текстовых и графических файлов. На основе экспериментальных данных — компонент измеренного магнитного поля, с помощью методики восстановления границы металл. воздух по силовым магнитным линиям определена форма поверхностных дефектов в пластине из стали 20. Магнитный преобразователь — трехосный цифровой датчик Холла ALS31300 производил измерения над бездефектной поверхностью металла. Учтены нелинейные свойства ферромагнетика.

Ключевые слова: обратная геометрическая задача магнитостатики, дефектометрия, дефекты потери сплошности металла, поверхностные дефекты, магнитное поле рассеяния дефекта, тангенциальное намагничивание, MFL-метод.

DOI: 10.31857/S0130308222110057, EDN: BUIIDN

введение

MFL-метод в настоящее время является самым широко используемым магнитным методом диагностики промышленных изделий [1—6]. Недостатком MFL-метода является то, что это индикаторный метод, т.е. с помощью MFL-метода можно лишь указать дефектные области металла [7]. Для анализа опасности дефектов необходимо использовать другие методы и проводить дополнительные исследования [8—10].

Несмотря на привлекательность идеи осуществлять дефектометрию [11] с помощью стандартного применения MFL-метода, такие устройства еще не созданы. Причиной тому является нелинейный отклик ферромагнетика на магнитное поле, что делает решение обратной геометрической задачи сложным. Впервые для двумерного линейного случая (линейная зависимость вектора магнитной индукции от вектора напряженности магнитного поля) и для конфигурации, когда датчики расположены над дефектной поверхностью, задача была решена в работе [12].

В [13—15] был разработан теоретический подход к решению обратной геометрической задачи магнитостатики для 3D-дефектов с учетом нелинейной зависимости $\mu(|\mathbf{H}|)$; в рамках численных экспериментов (начальные условия вычислялись путем решения прямой задачи при заданной геометрии дефекта в программах FEMM и ELMER, обратная задача решалась в программе Scilab) восстановлена форма двумерных и трехмерных дефектов в линейном случае ($\mu = \text{const} >>1$); по экспериментальным данным восстановлена форма центральной части реального поверхностного дефекта в металлической пластине с учетом нелинейной зависимости $\mu(|\mathbf{H}|)$ (материал пластины — сталь 20), вытянутого на поверхности пластины вдоль оси, перпендикулярной к направлению поля намагничивания.

Целью настоящей работы является доказательство принципиальной возможности восстановления формы поверхностных дефектов потери сплошности магнитомягкого ферромагнетика при помощи описанной в [13—15] методики. В данной работе исследуется конфигурация, когда магнитный преобразователь измеряет поле над бездефектной поверхностью металла (рис. 1). Исследуемые пластины изготовлены из стали 20. Используемая в расчетах зависимость величины магнитной индукции от величины напряженности магнитного поля была получена на гистерезисографе Remagraph C-500 [16].



Рис. 1. Схематическое изображение взаимного расположения магнитного преобразователя и дефекта (пластина с дефектом разрезана плоскостью *Y* = 0), *T* — толщина пластины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2 представлена фотография установки для построения топографии компонент магнитного поля. Площадь рабочей области установки (область, в которой можно проводить измерения) составляет 500×500 мм. В данной работе были исследованы две пластины с искуственно нанесенными поверхностными дефектами (рис. 3).



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки: 1 — расположение магнитного преобразователя Холла ALS31300; 2 — исследуемая стальная пластина; 3 — катушки намагничивания; 4 — источник постоянного тока QJ6010E (0-60 В, 10 А) [17]; 5 — шаговые двигатели каретки с магнитным преобразователем; 6 — микроконтроллер; 7 — компьютер с установленным оригинальным ПО.

Перемещение магнитного преобразователя Холла по рабочей области осуществляют шаговые двигатели. Шаговые двигатели обеспечивают точность позиционирования преобразователя в рабочей области: 0,1 мм. Размеры трехосного магнитного преобразователя Холла ALS31300 [17]: 3×3×0,8 мм. Расстояние от магнитного преобразователя до поверхности металла 1 мм. Шаговые двигатели находятся на достаточном удалении от рабочей области и не влияют на измерения.

Во время работы установки каретка с магнитным преобразователем автоматически перемещается над заданной областью. После каждого перемещения каретки (см. рис. 2, каретка с датчиком обозначена цифрой *1*) проводится 1000 измерений каждой компоненты магнитного поля, записывается усредненный результат. Управление установкой осуществляет плата микроконтроллера, который, в свою очередь, управляется разработанным оригинальным программным обеспечением. Программное обеспечение установки позволяет в реальном времени выводить числовую информацию на компьютер и строить топографию трех компонент магнитного поля в реальном времени.

Вывод графических данных осуществляется в растровом формате (рис. 4, 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3 (на поверхности с дефектом) показано направление осей X и Y (в бездефектной зоне z = -T). Ось Z направлена «внутрь» рисунка, перпендикулярно плоскости XY.





Рис. 3. Искуственно созданные дефекты: размеры 30×100×4 мм (*a*); размеры 30×40×5 мм (*б*). На рисунке указаны оси *X* и *Y*.

Измерения были проведены: над бездефектной поверхностью металла с шагом 1 мм по оси X и 1 мм по оси Y; в центре области 200×160 мм находится дефект. Размеры искусственных дефектов: $30 \times 100 \times 4$ мм; $30 \times 40 \times 5$ мм. Большие размеры дефектов были выбраны для того, чтобы показать принципиальную возможность восстановления формы дефекта по силовой линии. Кроме того, дефекты коррозии бывают и более крупными по размерам.

Топографии полученных компонент магнитного поля представлены на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Магнитограммы пластины с дефектом 30×40×5 мм; *а*, *б*, *в* — топографии *H_x*, *H_y* и *H_z* соответственно.



Рис. 5. Магнитограммы пластины с дефектом 30×100×4 мм; *a*, *б*, *в* — топографии H_x, H_y и H_z соответственно.

Стоит заметить, что трехмерные дефекты очень точно локализуются в плоскости *XY* топографией любой из компонент магнитного поля, что упрощает задачу определения раскрытия поверхностного дефекта потери сплошности металла.

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

В настоящей работе исследуется конфигурация, когда преобразователь магнитного поля находится над бездефектной поверхностью металлической пластины как на рис. 1.

После обработки начальных данных (значений компонент магнитного поля) для уменьшения эффектов, связанных с неоднородностью магнитного поля системы намагничивания [15], пересчитаем значения компонент магнитного поля с уровня измерений (1 мм над поверхностью металла) в металл на уровень z = 0 (см. рис. 1). Эти значения компонент магнитного поля, а также их производных [15], и будут начальными условиями для восстановления значений магнитного поля «вниз» от бездефектной поверхности.

Теоретическая часть восстановления магнитного поля была подробно рассмотрена в [13—15]. Поэтому сразу приведем формулы для восстановления поля в металле, написанные в конечных разностях для трехмерного случая, с учетом нелинейной зависимости μ(|**H**|) и направления оси *Z*. Используем следующие обозначения: *Z_m* — уровень начальных данных (*z* = 0); Δ_z — шаг по

Используем следующие обозначения: Z_m — уровень начальных данных (z = 0); Δ_z — шаг по оси z; $|\mathbf{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$:

$$B_{z}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z}) = B_{z}(x, y, Z_{m}) + \left(\frac{\partial B_{x}}{\partial x}(x, y, Z_{m}) + \frac{\partial B_{y}}{\partial y}(x, y, Z_{m})\right) \cdot \Delta_{z};$$
(1)

$$H_{x}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z}) = H_{x}(x, y, Z_{m}) - \frac{\partial H_{z}}{\partial x}(x, y, Z_{m}) \cdot \Delta_{z};$$
⁽²⁾

$$H_{y}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z}) = H_{y}(x, y, Z_{m}) - \frac{\partial H_{z}}{\partial y}(x, y, Z_{m}) \cdot \Delta_{z};$$
(3)

$$B_{z}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z}) = \mu(|\mathbf{H}|(x, y, Z_{m} - \Delta_{z})) \cdot H_{z}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z});$$

$$(4)$$

$$B_{x}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z}) = \mu(|\mathbf{H}|(x, y, Z_{m} - \Delta_{z})) \cdot H_{x}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z});$$
(5)

$$B_{y}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z}) = \mu(|\mathbf{H}|(x, y, Z_{m} - \Delta_{z})) \cdot H_{y}(x, y, Z_{m} - \Delta_{z}).$$
(6)

Система уравнений (1)—(6) составлена из уравнений Максвелла для случая магнитостатики (1)—(3), а также материальных уравнений для компонент магнитного поля (4)—(6), отражающих реакцию металла на внешнее магнитное поле. Зависимость $\mu(|\mathbf{H}|)$ получена экспериментально на гистерезисографе Remagraph C-500.

С помощью системы уравнений (1)—(6) можно пересчитать значения компонент магнитного поля с начального уровня Z_m на уровень $Z_m^{-\Delta_z}$ и далее, вплоть до нижней поверхности пластины, уровень z = -T.

После восстановления магнитного поля всюду от уровня z = 0 до уровня z = -T для построения силовой магнитной линии воспользуемся методом Эйлера численного решения дифференциальных уравнений. Пусть $X_b(i)$, $Y_b(i)$, $Z_b(i)$ — координаты *i*-й точки силовой магнитной линии; l — выбранный шаг. Тогда, для получения координат следующей точки силовой магнитной линии можно использовать следующие выражения:

$$X_{b}(i+1) = X_{b}(i) + \Delta X_{b}(i); Y_{b}(i+1) = Y_{b}(i) + \Delta Y_{b}(i); Z_{b}(i+1) = Z_{b}(i) + \Delta Z_{b}(i).$$
(7)

Для $\Delta X_{b}(i)$, $\Delta Y_{b}(i)$, $\Delta Z_{b}(i)$ по определению силовой магнитной линии имеем:

$$X_{b}(i) = \frac{H_{x}(i)}{\sqrt{H_{x}(i)^{2} + H_{y}(i)^{2} + H_{z}(i)^{2}}} \cdot l;$$
(8)

$$Y_{b}(i) = \frac{H_{y}(i)}{\sqrt{H_{x}(i)^{2} + H_{y}(i)^{2} + H_{z}(i)^{2}}} \cdot l;$$
(9)

$$\Delta Z_{b}(i) = \frac{H_{z}(i)}{\sqrt{H_{x}(i)^{2} + H_{y}(i)^{2} + H_{z}(i)^{2}}} \cdot l.$$
(10)

Таким образом, используя начальные данные (пересчитанные от уровня измерений компоненты магнитного поля на границе металл—воздух со стороны металла), можно построить семейство силовых магнитных линий, начинающихся, например в бездефектной области слева от дефекта, и заканчивающихся в бездефектной области справа от дефекта на уровне z = -T.

Это семейство кривых будет описывать геометричекие параметры дефекта [13—15].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 и 7 приведены результаты применения описанной выше методики. По компонентам магнитного поля, полученным в результате эксперимента, построены кривые, описывающие геометрические параметры дефектов. С учетом того, что локализация дефектов в плоскости *XY* с высокой точностью определяется по топографии измеренного поля, можно сказать, что данная методика позволяет с достаточно хорошей точностью определять геометрические параметры дефектов.

Дефектоскопия № 11 2022



Рис. 6. Сечение металлической пластины с дефектом 30×100×4 мм: плоскостью Y = 0 мм (a); плоскостью X = 100 мм (б). Кривая I в (a) и (б) описывает границу металл—воздух на поверхности с дефектом; кривая 2 в (a) — силовая магнитная линия, начинающаяся из точки (0 мм, 0 мм, -10 мм); кривая 2 в (б) — совокупность точек, принадлежащих семейству силовых магнитных линий с координатой x = 100 мм и начинающихся в точках (0 мм, y мм, -10 мм), y ∈ [0, 160].



Рис. 7. Сечение металлической пластины с дефектом 30×40×5 мм: плоскостью Y = 0 мм (a); плоскостью X = 100 мм (б). Кривая I в (a) и (б) описывает границу металл—воздух на поверхности с дефектом; кривая 2 в (a) — силовая магнитная линия, начинающаяся из точки (0 мм, 0 мм, -10 мм); кривая 2 в (б) — совокупность точек, принадлежащих семейству силовых магнитных линий с координатой x = 100 мм и начинающихся в точках (0 мм, y мм, -10 мм), y ∈ [0, 160].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждена возможность определения геометрических параметров формы поверхностного дефекта по силовым магнитным линиям. В дальнейшем предстоит экспериментально оценить ошибку методики, пределы ее применимости.

Методика может быть применена при обследовании промышленных объектов у которых практически отсутствуют трещины, например при обследовании стенок тела бурильных труб. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shi Yan, Zhang Chao, Li Rui, Cai Maolin, Jia Guanwei*. Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection // Sensors (Basel). 2015. Dec. V. 15 (12). P. 31036—31055. https://www.ncbi.nlm. nih.gov/pmc/articles/PMC4721765/

2. Внутритрубная диагностика с помощью магнитных дефектоскопов MFL/CDP и (или) TFI/AFD, в том числе HIGH RESOLUTION, НТЦ «НефтеГазДиагностика», 2013. https://ntcngd.com/uslugi/ article_post/vnutritrubnaya-diagnostika-spomoshchyu-magnitnykh-defektoskopov-vysokogo-razresheniya

3. Большакова В.В., Кукин Н.А., Дымкин Г.Я. О возможности применения магнитных методов неразрушающего контроля для оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. V. 38. С. 92—98. https://cyberleninka. ru/journal/n/izvestiya-peterburgskogo-universiteta-putey-soobscheniya?i=897018

4. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П., Шаранова Д.А. Анализ погрешности измерений остаточной толщины днищ цилиндрических вертикальных резервуаров по технологии MFL с использованием метода конечных элементов // Контроль. Диагностика. 2016. № 11. С. 10—15.

5. Марков А.А., Антипов А.Г., Карелин М.В. Оценка достоверности автоматического распознавания сигналов от конструктивных элементов рельсового пути магнитодинамическим методом // Контроль. Диагностика. 2018. № 3. С. 16—27.

6. Долгих С.А., Абакумов А.А., Кайдриков Р.А., Баженов В.В. Диагностика обсадных колонн с использованием технологии магнитной интроскопии // Вестник казанского технологического университета. 2011. № 9. С. 241—244.

7. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. https://pipelineoperators.org/

8. Слесарев Д.А., Абакумов А.А. Обработка и предоставление информации в MFL-методе неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 3—9. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21194503&

9. Канайкин В.А. Внутритрубная магнитная дефектоскопия магистральных трубопроводов / Под ред. А.Ф. Матвиенко. Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Ин-т физики металлов, ЗАО НПО «Спецнефтегаз». Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 307с.

10. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Поле рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном внешнем поле // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 23—31.

11. FOCT P 55612 2013. https://docs.cntd.ru/document/1200105201

12. *Кротов Л.Н.* Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 36 — 44.

13. *Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E.* Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 726—732. https://elibrary.ru/item.asp?id=38652516

14. Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E. Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects with Allowance for Nonlinear Properties of Ferromagnet // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 849—854. https://elibrary.ru/item.asp?id=38674783

15. Nikitin A.V., Mikhailov A.V., Petrov A.S., Popov S.E., Gobov Y.L. A Technique for Practical Reconstruction of The Form Parameters of Surface Two-Dimensional Defects Taking Into Account Nonlinear Properties of a Ferromagnet // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 12. P. 1103—1112. [Никитин А.В., Михайлов А.В., Петров А.С., Попов С.Э., Гобов Ю.Л. Методика практического восстановления параметров формы поверхностных двухмерных дефектов с учетом нелинейных свойств ферромагнетика // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 46—55.]

16. Гистерезисограф Remagraph C-500. https://www.magnet-physik.de/upload/18657995-Remagraph-C-e-3123.pdf

17. Источник питания, 0-60V-10A 1xLED (КНР). https://www.chipdip.ru/product/qj6010e

18. Трехосный цифровой датчик Холла, ALS31300. https://www.allegromicro.com/