

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ДЕФЕКТА ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ И СЕРИИ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ

© 2024 г. А.В. Никитин^{1,*}, Л.В. Михайлов^{1,**}, А.В. Михайлов¹, Ю.Л. Гобов¹,
В.Н. Костин¹, Я.Г. Смородинский¹

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

Поступила в редакцию 17.05.2024; после доработки 28.06.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Представлена методика верификации решения обратной геометрической задачи магнитостатики в пластине из магнитомягкого ферромагнетика. Методика состоит из решения ряда прямых задач, в которых в качестве первого приближения используют форму дефекта, полученного в результате решения обратной геометрической задачи магнитостатики, а далее, увеличивая либо уменьшая глубину дефекта, не меняя при этом форму граничной поверхности, — сравнения топографий компонент магнитного поля, полученных в ходе измерений над поверхностью пластины и вычисленных (в результате решения прямой задачи) в тех же точках компонент магнитного поля рассеяния от реконструированного трехмерного дефекта. В результате применения методики также могут быть уточнены геометрические параметры исследуемого дефекта. Получение начальных условий для решения обратной задачи и решение прямых задач магнитостатики осуществляется с помощью метода конечных элементов в программе ELMER. Методика работает при одностороннем доступе к любой поверхности пластины (бездефектной поверхности, либо поверхности с дефектом).

Ключевые слова: метод регистрации магнитного потока рассеяния, обратная геометрическая задача магнитостатики, прямая задача магнитостатики, метод конечных элементов, дефектометрия.

RECONSTRUCTION OF THE SHAPE OF A FLAW IN FERROMAGNETIC PLATE BY SOLVING INVERSE PROBLEM OF MAGNETOSTATICS AND SERIES OF DIRECT PROBLEMS

© 2024 A.V. Nikitin^{1,*}, L.V. Mikhaylov^{1,**}, A.V. Mikhaylov¹, Yu.L. Gobov¹,
V.N. Kostin¹, Ya.G. Smorodinskii¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences
Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Str., 18
E-mail: *an@imp.uran.ru; **mikhaylov_lv@imp.uran.ru

The article presents a verification technique for solving the inverse geometric problem of magnetostatics in a soft magnetic ferromagnet plate. The technique involves solving a number of direct problems, in which the shape of the defect obtained by solving the inverse geometric problem of magnetostatics is used as a first approximation, and then increasing or decreasing the depth of the defect without changing the shape of the boundary surface — comparing the topographies of the magnetic field components obtained during measurements above the plate surface and calculated (as a result of solving the direct problem) at the same points of the components of the magnetic stray field from the reconstructed three-dimensional defect. As a result of applying the technique, the geometric parameters of the defect under study can also be refined. Obtaining the initial conditions for solving the inverse problem and solving direct problems of magnetostatics is carried out using the finite element method in the ELMER program. The technique works with one-sided access to any surface of the plate (a defect-free surface or a surface with a defect).

Keywords: magnetic leakage flux registration method, inverse geometric problem of magnetostatics, direct problem of magnetostatics, finite element method, defectometry.

DOI: 10.31857/S0130308224090086

На начальном этапе развития неразрушающего контроля методом регистрации магнитного потока рассеяния (MFL-метод) предполагалось, что при помощи различных подходов, путем сравнения топографии измеренного магнитного поля над поверхностью объекта контроля, содержащего дефект, с топографией поля эталонного дефекта удастся определить тип и геометрические параметры формы обнаруженного дефекта [1—6]. Однако большое разнообразие дефектов, а также нелинейный отклик ферромагнетика на внешнее намагничивающее поле, не позволяют устойчивым образом решать такие задачи. Области применения полученных аналитических формул для вычисления компонент магнитного поля эталонных дефектов в зависимости от конкретных параметров задачи ограничены и требуют большого числа поправочных коэффициентов [7], а численные расчеты прямых задач магнитостатики позволяют получать

топографии магнитных полей только от конкретной геометрии границы металла. По этим причинам для решения практических задач по определению геометрических параметров формы исследуемого дефекта становится важной разработка методик решения обратной геометрической задачи магнитостатики для трехмерного случая с учетом нелинейного характера зависимости магнитной индукции в ферромагнетике от внешнего намагничивающего поля. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики не требует иной априорной информации кроме информации о характере нелинейной зависимости величины магнитной индукции ферромагнитного материала от величины внешнего намагничивающего поля. Впервые такая обратная геометрическая задача магнитостатики для двумерного линейного случая была решена в работе [8]. В работе [9] были получены расчетные формулы для определения граничных поверхностей дефекта потери сплошности металла для трехмерного линейного случая и при условии, что ферромагнетик намагничен до насыщения, а именно, вектор намагниченности во всем ферромагнетике постоянен по величине и направлению.

В работах [10—12] была разработана методика решения обратной геометрической задачи магнитостатики в трехмерном случае с учетом нелинейного отклика ферромагнетика на внешнее намагничивающее поле для класса дефектов, чьи граничные поверхности можно описать с заданной точностью отрезком двойного ряда Фурье (рис. 1). Из этого класса дефектов исключены трещины и трещиноподобные дефекты (определяем такие дефекты согласно [13]). В дальнейшем будем использовать результаты именно этой методики решения обратной геометрической задачи магнитостатики.

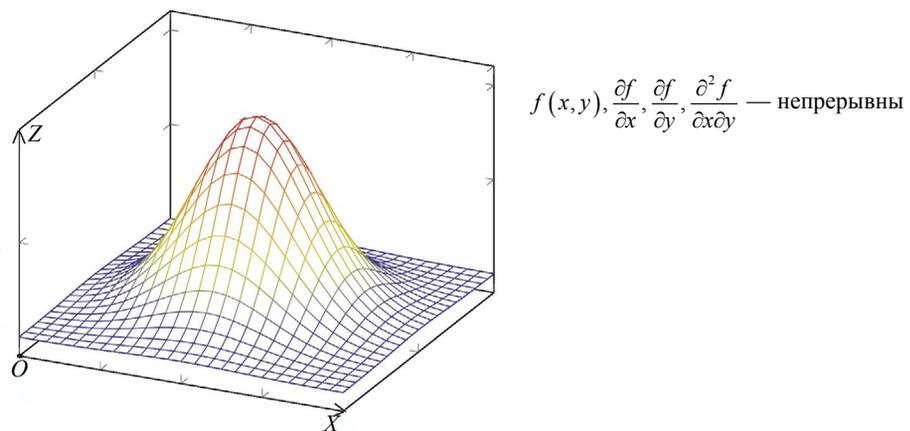


Рис. 1. Пример функции $f(x, y)$, представимой в виде отрезка двойного ряда Фурье в исследуемой области.

Целью данной работы является реализация алгоритма методики по проверке правильности решения обратной геометрической задачи магнитостатики и, возможно, последующего уточнения геометрических параметров формы дефекта на численном эксперименте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленная в работах [10—12] методика вне зависимости от взаимного расположения дефекта и магнитных преобразователей (рис. 2) позволяет решить обратную геометрическую задачу магнитостатики и найти приближенную форму дефекта без использования каких-либо поправочных коэффициентов.

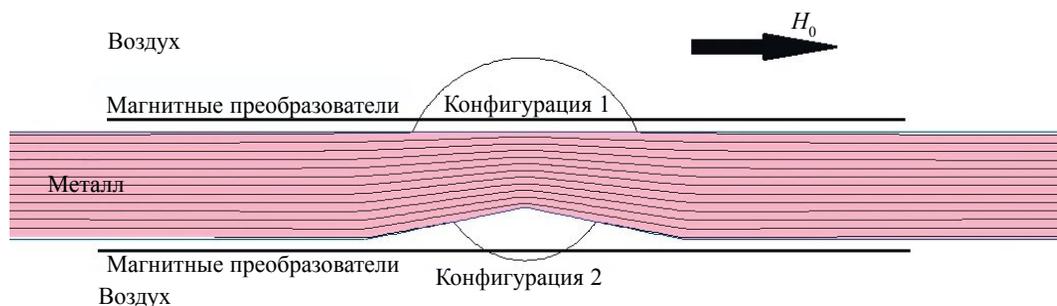


Рис. 2. Сечение исследуемой ферромагнитной пластины в поперечном направлении. Намагничивающее поле H_0 направлено вдоль оси Ox .

Для определенности выберем конфигурацию 1 на рис. 2 и на ее примере покажем, как работает предлагаемая методика. В результате решения обратной геометрической задачи получим приближенную форму дефекта, как на рис. 3—4.



Рис. 3. Поперечное сечение пластины с реконструкцией границы металла в области дефекта, полученное в результате решения обратной геометрической задачи.

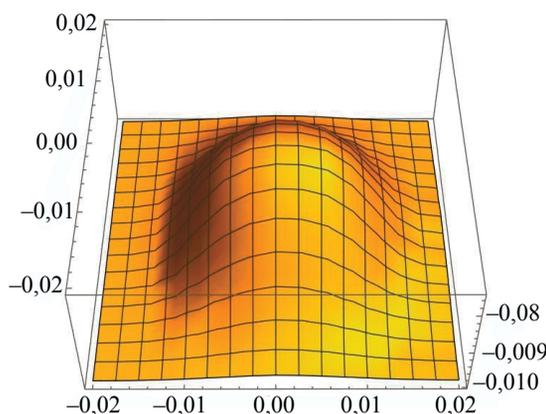


Рис. 4. Граница куполообразного дефекта с размерами $25 \times 25 \times 3$ мм, полученная в результате решения обратной геометрической задачи магнитостатики для пластины из стали 20 толщиной 10 мм.

Для получения начальных условий, т.е. «измеренных» значений компонент магнитного поля над бездефектной поверхностью, использовалось решение прямой задачи в программе ELMER.

Заметим, что размеры дефекта на поверхности пластины определяются по топографии измеренных компонент магнитного поля рассеяния. Поэтому реконструируем дефект с учетом полученной в результате измерений магнитного поля информации о краях дефекта на поверхности пластины (рис. 5). Затем сдвинем поверхность дефекта, целиком углубляя и уменьшая глубину дефекта.

Будем считать, что форма реконструированного дефекта наилучшим образом соответствует форме реального дефекта, если достигается минимум положительного среднего отклонения (1) x -компонент напряженности магнитных полей рассеяния упомянутых ранее дефектов в точках на уровне измерений, на линии, параллельной оси Ox и проходящей через центр дефекта

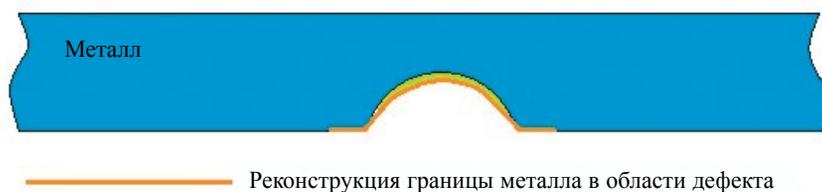


Рис. 5. Поперечное сечение пластины. Реконструкция формы дефекта выполнена с учетом его реальных размеров на поверхности пластины.

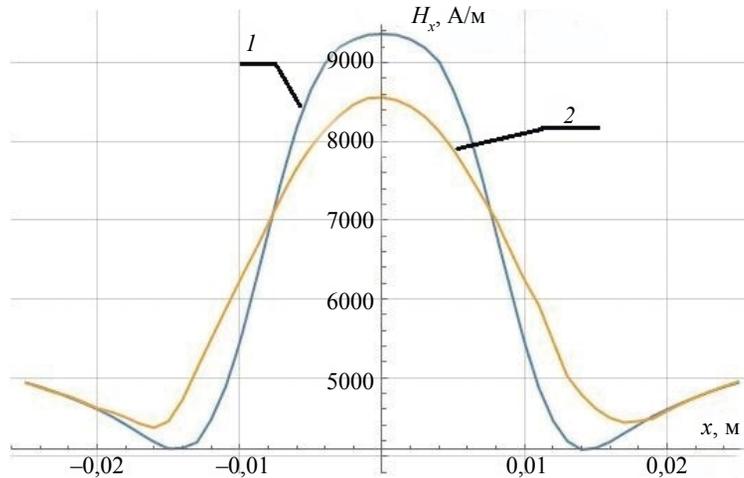


Рис. 6. График значений икс-компонент напряженности магнитного поля на поверхности измерений, на линии, проходящей через центр дефекта по оси OX . 1 — значения H_{x0} исследуемого дефекта; 2 — значения H_{xr} реконструированного дефекта.

(рис. 6). В нашем случае центр дефекта также легко определить по топографии компонент «измеренного» магнитного поля:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{x0,i} - H_{xr,i}), \quad (1)$$

где N — общее число точек на указанной в тексте линии; i — номер точки на линии; $H_{x0,i}$, $H_{xr,i}$ — икс-компоненты напряженности магнитного поля в точках на линии исследуемого и реконструированного дефектов соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 7 приведен график изменения среднего отклонения D в зависимости от смещения поверхности дефекта на величину S ; $S = 0$ соответствует форме дефекта, полученной в результате решения обратной геометрической задачи.

В результате решения обратной геометрической задачи магнитостатики был реконструирован куполообразный дефект со следующими параметрами формы $25 \times 25 \times 2,5$ мм. Глубина реконструированного дефекта отличается от глубины реального дефекта на 16,7 %. При этом величина среднего отклонения D составила 150 А/м. Уменьшение глубины дефекта на 0,25 мм

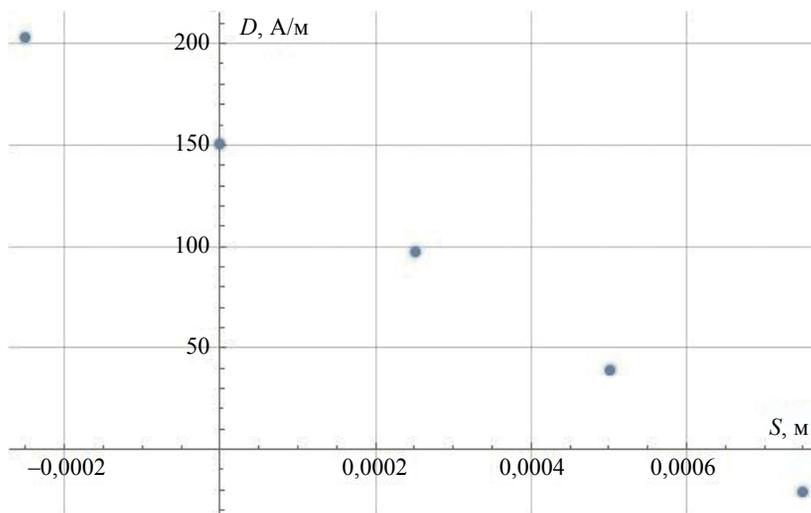


Рис. 7. Зависимость среднего отклонения D от смещения по вертикали поверхности дефекта. Положительный знак S соответствует увеличению глубины дефекта.

приводит к росту D . Минимальное положительное значение D достигается при увеличении глубины дефекта на 0,5 мм, что соответствует геометрическим параметрам реального дефекта.

ВЫВОДЫ

С помощью предложенной методики верифицируется решение обратной геометрической задачи магнитостатики и возможно уточнение значений геометрических параметров формы исследуемого дефекта.

Л.В. Михайлов благодарит Институт физики металлов имени М.Н. Михеева за поддержку его работы по государственному заданию Минобрнауки России по теме «Диагностика», которая выполнялась в рамках молодежного проекта ИФМ УрО РАН № М8-23.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика» №122021000030–1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янус Р.И. Некоторые вопросы теории магнитной дефектоскопии // Труды ИФМ УФАН СССР. 1948. Вып. 7. С. 23—37.
2. Вонсовский С.В. Простейшие расчеты для задач магнитной дефектоскопии // Журнал технической физики. 1938. Т. 8. № 16. С. 1453—1467.
3. Аркадьев В.К. О развитии теоретических основ дефектоскопии // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1937. № 2. С. 233—239.
4. Зацепин Н. Н., Щербинин В.Е. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. I. Топография полей моделей дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—58.
5. Ферстер Ф. Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины // Дефектоскопия. 1982. № 11. С. 3—25.
6. Загидулин Р.В., Мужичский В.Ф., Курозаев В.И. Расчет магнитостатического поля внутреннего дефекта и дефекта внутренней поверхности в ферромагнитной пластине. II Магнитное поле дефекта в воздухе. Нелинейная среда // Дефектоскопия. 1997. № 1. С. 55—62.
7. Халилеев П.А., Патраманский Б.В., Лоскутов В.Е., Корзунин Г.С., Щербинин В.Е.. Выявляемость дефектов в трубопроводах из различных марок стали в зависимости от их конфигурации // Дефектоскопия. 2000. № 8. С. 22—33.
8. 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.
9. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Обратная задача магнитостатики в полях насыщения // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 35—44.
10. Гобов Ю.Л., Никитин А.В., Попов С.Э. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии с учетом нелинейных свойств ферромагнетика // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 31—37.
11. Никитин А.В., Гобов Ю.Л., Михайлов А.В., Михайлов Л.В. Методика решения обратной геометрической задачи магнитостатики для поверхностных дефектов магнитомягкого ферромагнетика // Дефектоскопия. 2022. № 58. С. 24—34.
12. Никитин А.В., Михайлов А.В., Михайлов Л.В., Гобов Ю.Л., Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Область применимости методики построения линий магнитной индукции для дефектометрии протяженных объектов // Дефектоскопия. 2023. № 59. С. 51—59.
13. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. <https://pipelineoperators.org/>

REFERENCES

1. Janus R.I. Some issues of the theory of magnetic flaw detection // Proceedings of the Institute of Metallurgy of the Ufa Academy of Sciences of the USSR. 1948. Is. 7. P. 23—37.
2. Vonsovsky S.V. The simplest calculations for magnetic flaw detection problems // Journal of Technical Physics. 1938. V. 8. No. 16. P. 1453—1467.
3. Arkadyev V.K. On the development of theoretical foundations of flaw detection // Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Branch of Technical Sciences. 1937. No. 2. P. 233—239.
4. Zatsepin N.N., Shcherbinin V.E. On the calculation of the magnetostatic field of surface defects. I. Topography of the fields of defect models // Defectoscopy. 1966. No. 5. P. 50—58.
5. Forster F. Non-destructive testing by magnetic stray fields. Theoretical and experimental principles of detection of surface defects of finite and infinite depth // Defectoscopy. 1982. No. 11. P. 3—25.
6. Zagidulin R.V., Muzhitsky V.F., Kurozaev V.I. Calculation of magnetostatic field of internal defect and internal surface defect in ferromagnetic plate. II Magnetic field of defect in air. Nonlinear medium // Defectoscopy. 1997. No. 1. P. 55—62.

7. *Khaleev P.A., Patramansky B.V., Loskutov V.E., Korzunin G.S., Shcherbinin V.E.* Detectability of defects in pipelines made of different steel grades depending on their configuration // *Defectoscopya*. 2000. No. 8. P. 22—33.

8. *Krotov L.N.* Reconstruction of the interface between media based on the spatial distribution of the leakage magnetic field. II. Statement and solution method for the inverse geometric problem of magnetostatics // *Defectoscopya*. 2004. No. 6. P. 36—44.

9. *Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevsky V.Ya.* Inverse problem of magnetostatics in saturation fields // *Defectoscopya*. 2019. No. 10. P. 35—44.

10. *Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E.* Solution of the inverse geometric problem of magnetostatics for corrosion defects taking into account the nonlinear properties of a ferromagnet // *Defectoscopya*. 2018. No. 12. P. 31—37.

11. *Nikitin A.V., Gobov Yu.L., Mikhailov A.V., Mikhailov L.V.* Methodology for solving the inverse geometric problem of magnetostatics for surface defects of a soft magnetic ferromagnet // *Defectoscopya*. 2022. No. 58. P. 24—34.

12. *Nikitin A.V., Mikhailov A.V., Mikhailov L.V., Gobov Yu.L., Kostin V.N., Smorodinskii Ya.G.* Scope of applicability of the technique for constructing magnetic induction lines for flaw detection of extended objects // *Defectoscopya*. 2023. No. 59. P. 51—59.

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