

МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДВУХМЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА

© 2021 г. А.В. Никитин^{1,*}, А.В. Михайлов^{1,**}, А.С. Петров^{1,***}, С.Э. Попов^{1,****},
Ю.Л. Гобов^{1,*****}

¹Институт 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; ***alex.s.petrov@rambler.ru;
****sergeyeduardovichpopov@gmail.com; *****go@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 30.09.2021; после доработки 29.10.2021

Принята к публикации 29.10.2021

Представлена устойчивая к ошибкам входных данных методика определения значений глубины и раскрытия поверхностного двухмерного дефекта в ферромагнетике. Дефекты и магнитные преобразователи находятся на разных сторонах металлической пластины. Учтены нелинейные свойства ферромагнетика. Компоненты магнитного поля в металле восстанавливались по измеренным компонентам магнитного поля над бездефектной поверхностью металла. В результате проведения численных экспериментов были получены границы применимости методики. Результаты методики проверены на эксперименте.

Ключевые слова: обратная геометрическая задача магнитостатики, дефектометрия, потеря сплошности металла, магнитное поле рассеяния дефекта, внутритрубные снаряды, дефектометрия бурильных труб магнитным методом.

DOI: 10.31857/S0130308221120058

ВВЕДЕНИЕ

Конфигурация, при которой поверхностные дефекты потери сплошности металла и магнитные преобразователи расположены на противоположных сторонах металлической пластины, характерна для многих отраслей промышленности и транспорта, в частности для магнитного контроля труб магистральных трубопроводов, а также для контроля бурильных труб непосредственно на буровых. В первом случае, система магнитных преобразователей перемещается внутри трубы, а дефекты в таких трубах располагаются на внешней поверхности стенки трубы. Во втором случае, система преобразователей перемещается по внешней поверхности бурильной трубы, а дефекты, вызванные воздействием бурового раствора, располагаются на внутренней поверхности стенки трубы.

Из-за нелинейного отклика ферромагнетика на внешнее магнитное поле восстановление геометрии поверхностного дефекта по компонентам магнитного поля, измеренным на определенном уровне над бездефектной металлической поверхностью, является сложной задачей.

Так, с одной стороны, до сих пор не удается восстановить геометрию поверхностного дефекта потери сплошности металла произвольной формы в трехмерном случае, используя информацию, полученную путем решения прямой задачи: путем получения полей от множества различных дефектов (математическое моделирование, эксперимент) и их сравнения с исследуемым полем [1—4].

А с другой стороны, работы по решению обратной задачи магнитостатики ограничиваются линейным (т.е. предполагается, что магнитная индукция ферромагнетика линейно зависит от напряженности магнитного поля) и двухмерным случаем [5—8].

В работе [7] представлено решение обратной геометрической задачи магнитостатики без использования априорной информации. Однако задача была решена только для двухмерного случая и с учетом линейной зависимости индукции магнитного поля от напряженности магнитного поля, кроме того, магнитные преобразователи были расположены непосредственно над дефектной поверхностью металла.

В работах [9, 10] была приближенно решена задача восстановления геометрии поверхностного дефекта произвольной формы в магнитомягких ферромагнетиках в двухмерном линейном и трехмерном случае с учетом нелинейных свойств ферромагнетика. В обоих случаях поле было измерено (результат решения прямой задачи в пакетах FEMM, ELMER соответственно) над несодержащей дефект поверхностью металла. Используемое в [9, 10] приближение можно описать следующим образом. В магнитомягких материалах выход магнитного потока из ферромагнетика даже в зоне дефекта (плавного дефекта произвольной формы) составляет всего несколько процентов. Следовательно, восстанавливая стационарное магнитное поле с «верхней» бездефектной поверхности пластины ферромагнетика на «нижнюю» поверхность, которая содержит дефект, и даже ниже, предполагаем, что

всюду внизу находится металл. В результате, можно построить две силовые линии, одна проходит по «верхней» бездефектной поверхности металла, другая начинается в бездефектной зоне «слева» на «нижней» поверхности, проходит через дефект и заканчивается в бездефектной зоне «справа» на «нижней» поверхности металла. Поток магнитной индукции через поверхность между двумя силовыми линиями постоянен. Если пренебречь потерей нескольких процентов потока в зоне дефекта, то мы получим силовую линию, приближенно описывающую форму дефекта на нижней поверхности, поскольку она соответствует начальным условиям задачи — значениям компонент магнитного поля, измеренным в результате численного и реального экспериментов. Стоит отметить, что трубы для магистральных газопроводов и бурильные трубы изготавливаются из магнитомягких ферромагнетиков.

Поверхностный двухмерный дефект в настоящей работе — это дефект, у которого ширина уменьшается с глубиной, а форма дефекта описывается функцией, имеющей ограниченную производную по x в каждой точке (правый дефект на рис. 1). Либо это дефект-пропил, имеющий форму прямоугольника (рис. 8), но при этом глубина не превышает раскрытие.

Область применения данного метода исследована численными экспериментами в заключительной части статьи. Данным методом невозможно восстановить геометрическую форму трещин и трещиноподобных дефектов, у которых глубина как минимум в 10 раз превышает раскрытие. Определение дефектов потери сплошности, а также трещин и трещиноподобных дефектов дано в [12].

Настоящая статья по последовательности изложения состоит из четырех частей.

В первой части показан алгоритм повышения устойчивости построения силовой линии в двухмерном нелинейном случае при добавлении однородного шума во входные данные (добавлении ошибки во входные данные), что позволяет использовать настоящую методику при обработке экспериментальных данных. В первой части двухмерные электромагнитные поля, необходимые для получения данных измерений, рассчитываются в пакете программ FEMM, где в исследуемой области, содержащей ферромагнетик и «воздух», решается прямая задача. Магнитное поле задается разностью магнитных потенциалов на верхней и нижней границе исследуемой области. На правой и левой границах этой области тангенциальные составляющие компонент напряженности магнитного поля равны нулю. Форма исследованного дефекта показан на рис. 7.

Во второй части, в пакете программ ELMER, позволяющем решать прямую задачу — рассчитать трехмерные электромагнитные поля в исследуемом пространстве, содержащем «воздух», ферромагнетик и провода с током, моделируется эксперимент. Следует сказать, что выбор модели двухмерного дефекта определяется тем, что реальный трехмерный дефект сильно вытянут в поперечном направлении к направлению внешнего приложенного поля. В некоторой, достаточно удаленной от краев дефекта области в плоскости XY (рис. 4—6) получаются условия двухмерности ($H_y = \text{const}$), где можно применить алгоритм вычисления координат магнитной силовой линии, описанный в части 1.

В третьей части описывается экспериментальная установка и приводятся результаты эксперимента.

В четвертой части путем численных экспериментов в пакете программ FEMM исследована область применимости методики.

Часть 1

ГЕОМЕТРИЯ ЗАДАЧИ

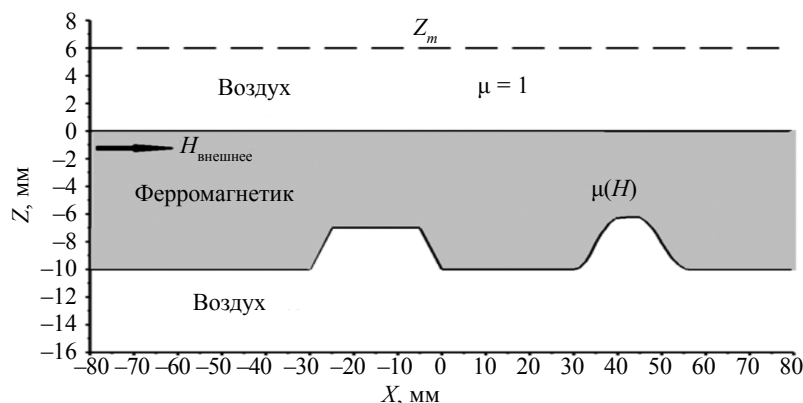


Рис. 1. Измерения проводятся на уровне Z_m над бездефектной поверхностью металлической пластины. Показано направление приложенного внешнего стационарного магнитного поля, μ — относительная магнитная проницаемость магнитомягкого ферромагнетика.

ПЕРЕСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УРОВНЯ ИЗМЕРЕНИЯ НА УРОВЕНЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛ—ВОЗДУХ СО СТОРОНЫ МЕТАЛЛА

По измеренным значениям компонент магнитного поля в воздухе можно восстановить магнитное поле до границы с металлом, например, следующим образом. Перепишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики в виде начальной задачи Коши и решим ее в конечных разностях (то же самое будем делать и в металле). Начальными условиями будут полученные значения компонент магнитного поля и их производных по оси абсцисс на уровне измерения Z_m . Эта процедура описана в [9, 10] и далее (для вычисления поля в металле) процедура будет подробно описана еще раз, поэтому мы опускаем здесь ее описание. В результате получаем значения компонент магнитного поля на уровне $z = +0$ (граница воздух—металл со стороны воздуха).

Далее, используя выражения для сопряжения на границе раздела двух сред (непрерывность тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля и нормальной составляющей магнитной индукции), мы пересчитываем значения составляющих магнитного поля с уровня $z = +0$ на уровень $z = -0$ (граница раздела воздух—металл со стороны металла). Эти значения будут начальными условиями задачи Коши в металле. Зная значения составляющих напряженности магнитного поля и магнитной индукции, можно вычислить значения их производных по оси абсцисс на уровне $z = -0$.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕТАЛЛЕ

Запишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики вместе с материальным уравнением:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0; \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= 0; \\ \mathbf{B} &= \mu(|\mathbf{H}|) \times \mathbf{H}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{B}$ и $\mathbf{H}$ — векторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля соответственно, а

$$|\mathbf{H}| = \sqrt{(H_x)^2 + (H_z)^2}.$$

В качестве зависимости $\mu(H)$ возьмем известную зависимость $\mu(H)$ для стали 20.

Перепишем систему уравнений (1) в векторных компонентах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_z}{\partial z} &= -\frac{\partial B_x}{\partial x}; \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} &= \frac{\partial H_z}{\partial x}; \\ B_z &= \mu \left(\sqrt{(H_x)^2 + (H_z)^2} \right) \cdot H_z, \\ B_x &= \mu \left(\sqrt{(H_x)^2 + (H_z)^2} \right) \cdot H_x. \end{aligned} \quad (2)$$

Система (2) состоит из 4-х уравнений и содержит 4 неизвестных: H_x , H_z , B_x , B_z . Перепишем систему уравнений (2) в конечных разностях в форме начальной задачи Коши. Учтем отрицательный знак перед Δ_z — ось OZ направлена «вверх», а пересчитываем мы поле «вниз» (см. рис.1):

$$B_z(x, Z_0 - \Delta_z) = B_z(x, Z_0) + \frac{\Delta_z \cdot dB_x}{dx}; \quad (3)$$

$$H_x(x, Z_0 - \Delta_z) = H_x(x, Z_0) - \frac{\Delta_z \cdot dH_z}{dx}; \quad (4)$$

$$B_z(x, Z_0 - \Delta_z) = \mu \left(\sqrt{H_x(x, Z_0 - \Delta_z)^2 + H_z(x, Z_0 - \Delta_z)^2} \right) \cdot H_z(x, Z_0 - \Delta_z), \quad (5)$$

$$B_x(x, Z_0 - \Delta z) = \mu \left(\sqrt{H_x(x, Z_0 - \Delta z)^2 + H_z(x, Z_0 - \Delta z)^2} \right) \cdot H_x(x, Z_0 - \Delta z), \quad (6)$$

Z_0 — указывает уровень границы раздела металл—воздух со стороны металла.

Рассмотрим систему уравнений (3)—(6). Уравнения (3) и (4) позволяют пересчитать значения H_x и B_z на уровне $Z_0 - \Delta z$. Из уравнения (5) можем определить значение функции $H_z(x, Z_0 - \Delta z)$, после получения которого можно вычислить $B_x(x, Z_0 - \Delta z)$, используя (6). Повторяя эту процедуру, можно шаг за шагом восстанавливать составляющие магнитного поля на «нижнюю» поверхность пластины, которая содержит дефект. Каждый раз мы предполагаем, что всюду ниже у нас металл.

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЛИНИИ

Восстановив компоненты магнитного поля в металлической пластине, для построения силовой линии магнитного поля в [9, 10] решалось следующее дифференциальное уравнение $\frac{dx}{H_x} = \frac{dz}{H_z}$. Полученная таким образом магнитная линия хорошо описывает форму плавного поверхностного дефекта [9, 10], но неустойчива к шумам во входных данных, и уже 1-2 % однородного шума в начальных значениях компонент магнитного поля делают невозможным построение магнитной линии на нижней поверхности пластины.

Силовую линию магнитного поля можно построить и другим способом. Используем метод наименьших квадратов (МНК). Разобьем область металла линиями, параллельными осям OX и OZ . Пересечения линий будут узлами такой сетки. Запишем для узлов сетки:

$$\left(\frac{H_z}{H_x} - \frac{dZ}{dx} \right)^2 \rightarrow \min,$$

где Z — это z -координаты точек силовой магнитной линии в металле.

В конечных разностях можно заменить производную $\frac{dZ}{dx}$ произведением двух матриц: $A_{k,l} \times Z_l$, где матрица $\hat{A}$ — ленточная матрица. Матрица $\hat{A}$ имеет следующий вид:

$$\begin{array}{cccccccccccc} \frac{-1}{\Delta} & \frac{1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \text{ первая строка;} \\ 0 & \frac{-1}{\Delta} & \frac{1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \text{ вторая строка;} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\Delta} & \frac{1}{\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \text{ третья строка, } \Delta \text{ — шаг по оси } x. \end{array}$$

.....

Запишем для узлов сетки (i, j) : $R_{i,j} = H_{z_{i,j}} / H_{x_{i,j}}$. Тогда задачу МНК в матричной форме можно переписать как

$$(\hat{R} - \hat{A} \times \hat{Z})^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

стандартным решением для (4) будет

$$\hat{Z} = \hat{R} \times \hat{A} \times (A^T \times \hat{A})^{-1},$$

где A^T — транспонированная матрица.

Такой способ построения магнитной линии значительно экономит компьютерное время и более устойчив к шумам во входных данных задачи. В дальнейшем, для восстановления геометрии поверхностного дефекта мы будем использовать магнитную линию, полученную этим методом.

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДНЫХ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ОСИ АБСЦИСС

В процессе численного пересчета компонент магнитного поля с одного уровня на другой в сторону источника, вследствие ошибок во входных данных, производные компонент магнитного поля могут перестать быть непрерывными функциями от ординаты. Чтобы справиться с этим, предложен следующий метод. В уравнениях (3) и (4) можно образы Фурье производных dB_x/dx и dH_z/dx умножить на коэффициент регуляризации, равный, например, $1/(1 + \alpha \cdot \omega^2)$, где параметр α выбирается численным экспериментом, а ω — переменная образа Фурье [11].

На рис. 2 показана построенная таким образом магнитная линия, описывающая дефект в виде гауссианы глубиной 4 мм и раскрытием 24 мм. Силовая линия магнитного поля получена с учетом нелинейности ферромагнетика (сталь 20) с 10 % однородным шумом во входных значениях магнитного поля. Внешнее магнитное поле было направлено по оси абсцисс, его величина составляла 8089 А/м. Уровень измерений находился в воздухе на высоте 2 мм над бездефектной поверхностью ферромагнетика. При решении обратной задачи использовались исходные данные (значения компонент магнитного поля на уровне «измерений»), полученные в результате решения прямой задачи в пакете FEMM.

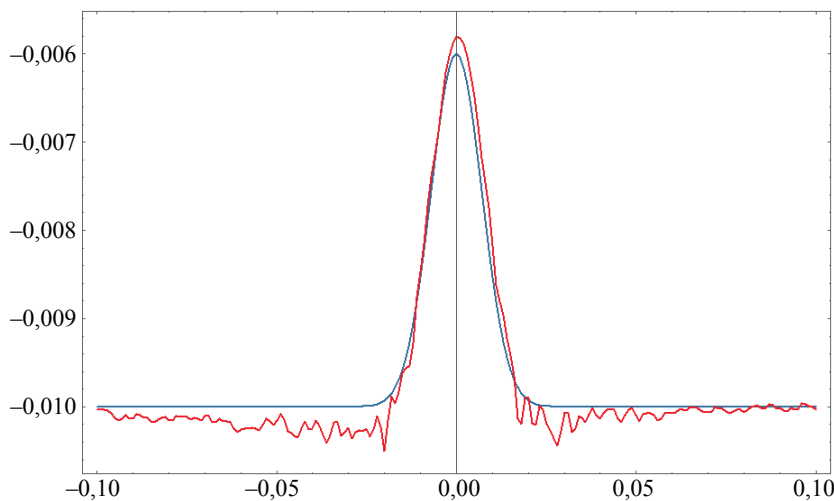


Рис. 2. Плоскость $Y = 0$. Линия магнитного поля хорошо описывает дефект глубиной 4 мм, раскрытием 24 мм, $\alpha = 2,5$. Добавлен 10 % однородный шум во входных данных. По осям (вертикальная ось OZ , горизонтальная ось OX) отложена длина в метрах. Метка минус 0,01 м соответствует нижней поверхности металла в бездефектной области. На рисунке более плавная кривая соответствует форме дефекта.

Часть 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ПАКЕТЕ ELMER

На практике двумерный дефект потери сплошности металла на металлической пластине можно смоделировать на «центральной», равноудаленной от краев дефекта линии трехмерного дефекта. Для конфигурации, рассматриваемой в настоящей работе, дефект вытянут в направлении оси OY (см. рис.1). Условием двумерности дефекта удовлетворяет область, где значения H_y слабо меняются и, к тому же, пренебрежимо малы по сравнению с другими компонентами магнитостатического поля, поэтому можно считать, что всюду в этой области H_y постоянна, данная область показана на рис. 3. В этой области компоненты H_x и H_z имеют значения порядка 10^4 А/м, H_y принимает значения порядка 10^2 А/м, на «центральной» линии H_y не превышает нескольких А/м.

Контуры дефекта можно определить по топографии компонент напряженности магнитного поля, как показано на рис. 4—6.

Форма дефекта на «центральной» линии в плоскости XZ восстанавливается по алгоритму описанному ранее.

На рис. 7, 8 показаны дефекты, для которых была решена прямая задача в пакете ELMER по получению компонент магнитостатического поля на уровне 2 мм над бездефектной поверхностью металлической пластины, по которым впоследствии и рассчитывалась геометрия дефектов.

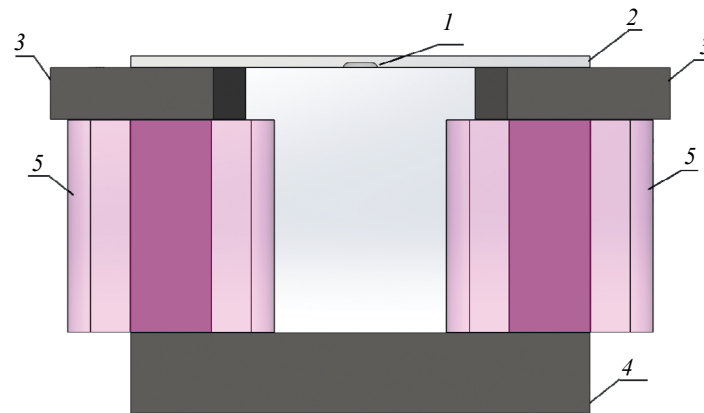


Рис. 3. Экспериментальная установка, смоделированная в пакете ELMER: 1 — поверхностный дефект; 2 — исследуемая стальная пластина (сталь 20, размеры 200 мм — 400 мм, толщина 10 мм); 3 — полюса электромагнита; 4 — магнитопровод. Материал полюсов магнита и магнитопровода — железо АРМКО; 5 — медная намотка катушек электромагнита. Магнитодвижущая сила катушек электромагнита — 1200 Ампер-витков. Размеры установки соответствуют размерам реальной экспериментальной установки.

В пакете ELMER была смоделирована реальная экспериментальная установка (см. рис. 3).

Результаты численного эксперимента показали, что для исключения искажений в графиках H_x , H_y и H_z , связанных со способом намагничивания пластины, необходимо из компонент напряженности магнитного поля H_y и H_z , полученных в результате решения прямой задачи с учетом дефекта в пластине, вычесть соответствующие компоненты, полученные в результате решения прямой задачи от пластины, не содержащей дефекта. Из H_x также была вычтена соответствующая компонента, однако к результату было добавлено среднее значение H_x в бездефектной пластине на отрезке, где поле менялось незначительно (результатирующие компоненты поля показаны на рис. 11). Вышеупомянутый отрезок имеет общую длину 129 мм, включая отрезок под дефектом и отрезки по 50 мм от краев от границы дефекта вдоль «центральной» линии (рис. 4).

В результате проведения численного эксперимента были подобраны величины шагов дискретизации по осям OX и OZ (обозначим их Δ и Δ_z соответственно), позволяющим решать задачу для плавных дефектов произвольной формы. Величины шагов дискретизации составили: для Δ — 1 мм, для Δ_z — 2 мм.

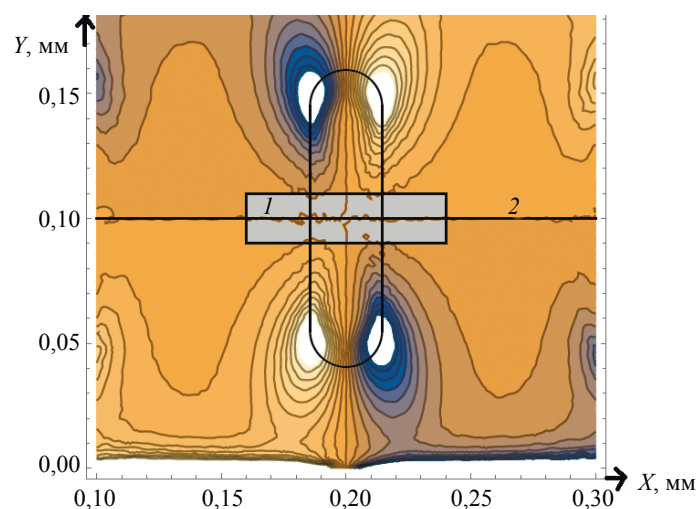


Рис. 4. Топография магнитного поля в плоскости $z = Z_m$ получена в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Показана взаимная конфигурация изолиний H_y и дефекта. Четыре полюса H_y показывают края дефекта. Цифрой 1 обозначена область, в которой реальный трехмерный дефект обладает свойствами двухмерности. Цифра 2 обозначает сечение плоскости XY плоскостью XZ , на которой восстанавливаем геометрию дефекта.

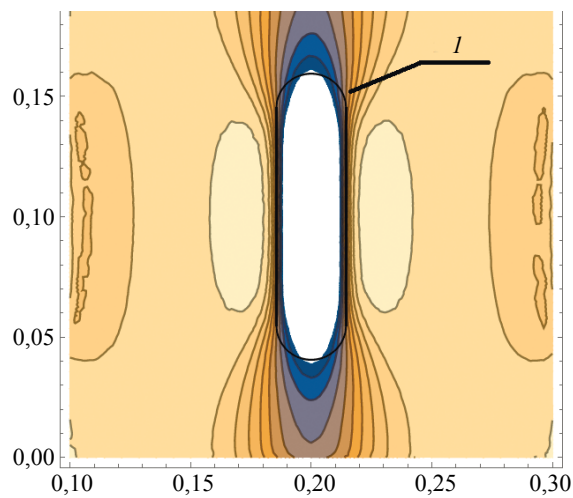


Рис. 5. Топография магнитного поля в плоскости $z = Z_m$ получена в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Показана взаимная конфигурация изолиний H_x и дефекта. Цифрой 1 обозначен край дефекта.

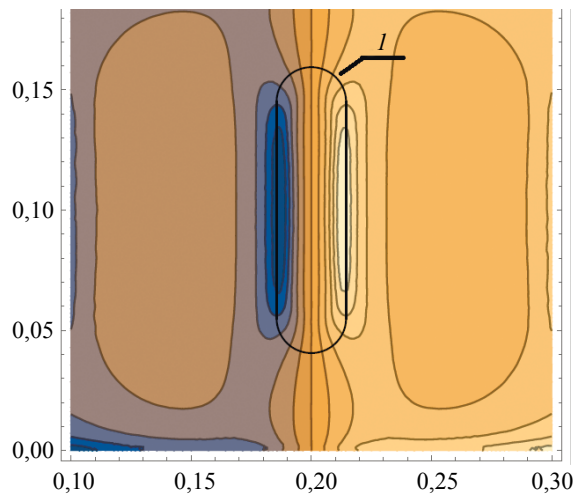


Рис. 6. Топография магнитного поля в плоскости $z = Z_m$ получена в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Показана взаимная конфигурация изолиний H_z и дефекта. Цифрой 1 обозначен край дефекта.

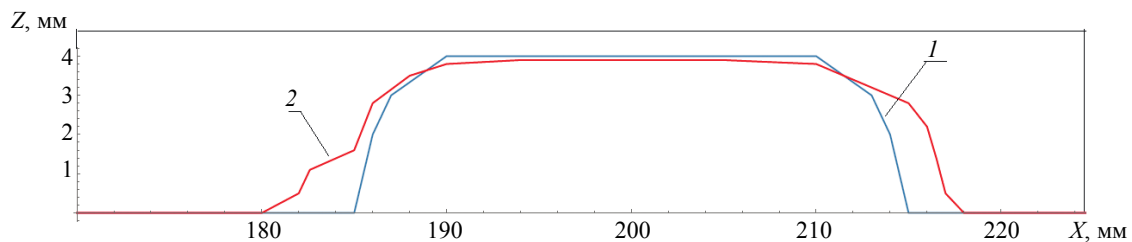


Рис. 7. Силовая магнитная линия описывает локальную геометрию дефекта вдоль «центральной» линии. Глубина дефекта 4 мм, раскрытие дефекта 29 мм. Компоненты магнитного поля были получены над бездефектной поверхностью металла (сталь 20), на высоте 2 мм, в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Кривая 1 показывает форму дефекта; кривая 2 представляет силовую магнитную линию.

В результате, были получены магнитные силовые линии, хорошо описывающие глубину дефекта (см. рис. 7, 8). Величину раскрытия дефекта можно легко определить по топографии магнитного поля (см. рис. 4—6).

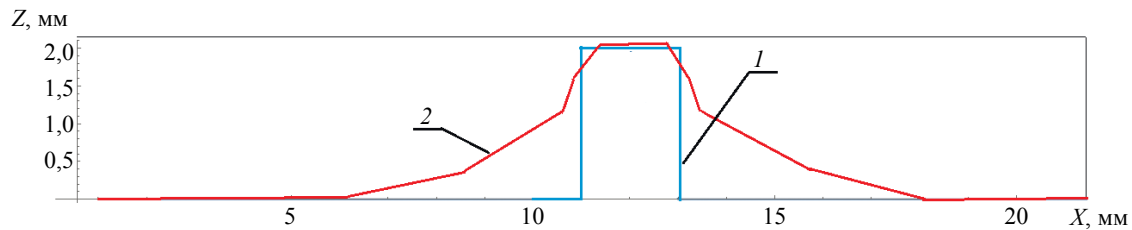


Рис. 8. Силовая магнитная линия описывает локальную геометрию дефекта вдоль «центральной» линии. Глубина дефекта 2 мм, раскрытие дефекта 2 мм. Компоненты магнитного поля были получены над бездефектной поверхностью металла (сталь 20) на высоте 2 мм, в результате решения прямой задачи в пакете ELMER. Кривая 1 показывает форму дефекта; кривая 2 представляет силовую магнитную линию.

Часть 3

ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ НА ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Для экспериментальной проверки приведенной выше методики была собрана экспериментальная установка, показанная на рис. 8. Измерения компонент магнитного поля проводились с помощью интегральной микросхемы, содержащей твердотельный трехосный датчик Холла ALS31300EEJASR-1000 [13]. Микросхема была установлена в корзинку и двигалась над бездефектной поверхностью пластины на расстоянии 2 мм.

В целях уменьшения шума во входных данных, каждое значение измерения представляет собой среднеарифметическую величину от 1000 измерений в данной точке.

Искусственный дефект показан на рис. 9. Металлические пластины с дефектом и без дефекта сделаны из стали 20.

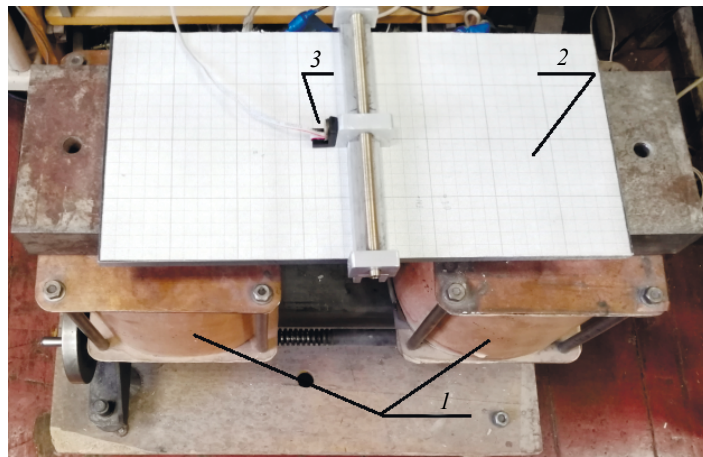


Рис. 9. Экспериментальная установка:

1 — система намагничивания стальной пластины; 2 — пластина из стали 20, размером 400 мм на 200 мм; 3 — «корзинка» для перемещения интегральной микросхемы с датчиком ALS31300EEJASR-1000.

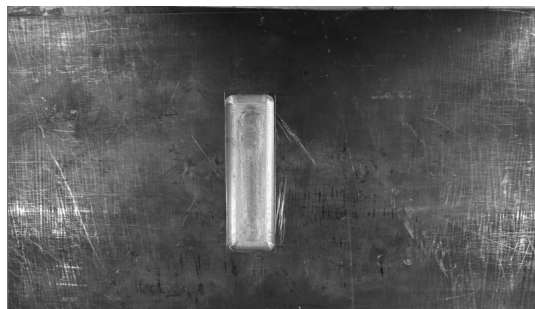


Рис. 10. Внешний вид искусственного дефекта. Глубина дефекта 4 мм, раскрытие — 29 мм.

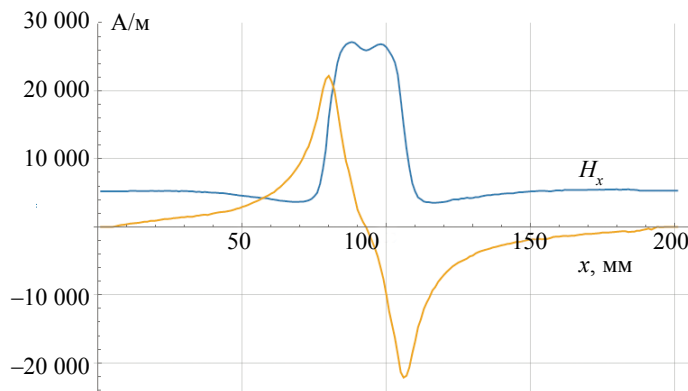


Рис. 11. После обработки экспериментальных данных устранены искажения, вносимые источником магнитного поля, и теперь значения компонент напряженности магнитного поля не отличаются от соответствующих значений, получаемых в результате решения прямой задачи в пакетах FEMM и ELMER.

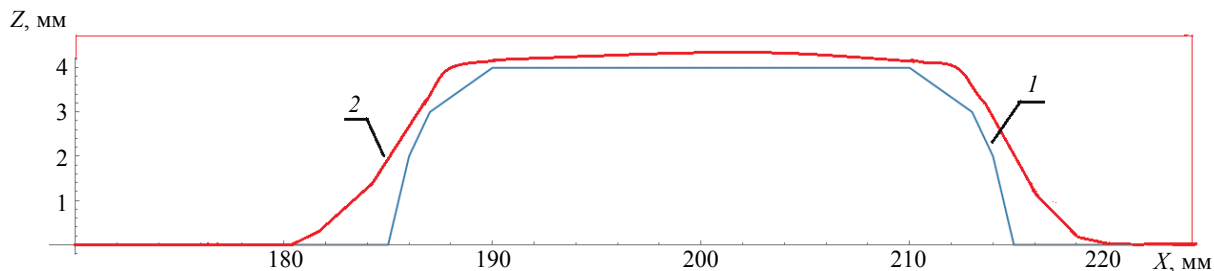


Рис. 12. Силовая магнитная линия описывает локальную геометрию дефекта вдоль «центральной» линии. Глубина дефекта 4 мм, раскрытие дефекта 29 мм. Компоненты магнитного поля были получены экспериментально, над бездефектной поверхностью металла (сталь 20), на высоте 2 мм. Кривая 1 показывает форму дефекта; кривая 2 представляет силовую магнитную линию.

Датчик двигался вдоль «центральной» линии (см. рис. 3). После процедур вычитания, описанных в предыдущей части, получили графики для H_x и H_z , соответствующие аналогичным, при расчете начальных значений в пакете FEMM, где поле задается значениями потенциалов на границах расчетной области «сверху» и «снизу» и отсутствием тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на боковых ребрах этой области (см. рис. 10).

В результате экспериментально была получена магнитная линия, хорошо описывающая локальную геометрию реального дефекта вдоль «центральной» линии (рис. 12).

Часть 4

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИКИ

В результате проведения эксперимента и последующей обработки его результатов получено подтверждение успешности работы методики, а также подтверждение того, что рассчитанные в пакетах FEMM и ELMER начальные условия не отличаются (после проведения соответствующих процедур обработки) от начальных условий, полученных экспериментально. Таким образом, появилась возможность путем проведения численных экспериментов определить границы размеров дефектов, определяемых методикой.

Исследовались толщины пластин 9, 10 и 12 мм. Выбор этих величин продиктован тем, что стенки большинства размеров бурильных труб имеют такие толщины. Максимальная глубина дефекта не превышала половины толщины стенки пластины, что опять же выбрано из практических соображений.

Очевидно что дефект с большими размерами (раскрытие), чем дефект, исследованный в ходе эксперимента, будет проще описать магнитной линией. Поэтому были исследованы границы

применения методики в сторону уменьшения величины глубины дефекта и величины его раскрытия. Из-за подобию рисунков, на которых магнитные линии описывают дефекты, мы не будем их приводить здесь. В результате численных экспериментов был получен результат — методика с большой точностью описывает поверхностные дефекты глубиной до 2 мм (см. рис. 8), раскрытие дефекта до величины 2 мм можно определить по топографии компонент восстановленного магнитного поля в металле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые представлена практическая методика восстановления геометрии двумерного дефекта в пластине из магнитомягкого ферромагнетика по данным магнитных преобразователей, расположенных на противоположной (бездефектной) стороне пластины. При этом были учтены нелинейные свойства ферромагнетика. Методика подтверждена экспериментально.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Дякин В.В. Математические основы классической магнитостатики. РИО УрО РАН, 2016, 404 с.
3. Chadebec O., Coulomb J.-L., Janet F. A review of magnetostatic moment method // IEEE Transactiona on magnetics. 2006. V. 42. No. 4. P. 515—520.
4. Шур М.Л., Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Магнитное поле дефекта произвольной формы в плоскопараллельной пластине // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 14—27.
5. Шур М.Л., Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Об обратной задаче магнитостатики // Дефектоскопия. 2013. № 8. С. 43—53.
6. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. I. Исследование свойств решения вспомогательной прямой задачи // Дефектоскопия. 2004. № 2. С. 76—82.
7. 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.
8. Vuillermet Y., Chadebec O., Coulomb J.-L., Rouve L.-L., Cauffet G., Bonjiraud J.L., Demilier L. Scalar potential formulation and inverse problem applied to thin magnetic sheets // IEEE Transactiona on magnetics. 2008. V. 44. No. 6. P. 1054—1057.
9. 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.
10. 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.
11. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: Методы, алгоритмы, программы. Справочное пособие. Киев: Наукова думка. 1986.
12. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines, 2016. <https://pipelineoperators.org/>
13. ALS31300, 2021. <https://www.allegromicro.com/>