

## МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МАГНИТОМЯГКОГО ФЕРРОМАГНЕТИКА

© 2022 г. А.В. Никитин<sup>1,\*</sup>, Ю.Л. Гобов<sup>1,\*\*</sup>, А.В. Михайлов<sup>1,\*\*\*</sup>, Л.В. Михайлов<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,  
Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

E-mail: \*an@imp.uran.ru; \*\*go@imp.uran.ru; \*\*\*mikhaylov@imp.uran.ru; \*\*\*\*mikhaylov\_lv@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022; после доработки 25.10.2022

Принята к публикации 25.10.2022

Представлено детальное описание методики, позволяющей решить обратную геометрическую задачу магнитостатики для поверхностных дефектов ферромагнитной пластины в трехмерном случае при любой конфигурации взаимного расположения магнитных преобразователей и дефектов и при условии учета нелинейности отклика ферромагнетика на внешнее стационарное магнитное поле. Впервые приведено применение методики для конфигурации, при которой дефекты расположены на ближайшей к магнитным преобразователям поверхности металла.

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

DOI: 10.31857/S013030822212003X, EDN: BUXHRH

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность контроля изделий из магнитомягких ферромагнетиков (сталей различных марок, сплавов) обусловлена широтой их применения на объектах промышленности и транспорта, а также в других важных областях человеческой жизнедеятельности. Для диагностики ферромагнитных объектов наиболее широко используется MFL-метод [1]. Аббревиатура MFL расшифровывается как Magnetic Flux Leakage — рассеяние магнитного потока, т.е. в зоне дефекта магнитный поток частично выходит из металла наружу, что фиксируют магнитные преобразователи, расположенные над поверхностью пластины. Популярность MFL-метода обусловлена портативностью первичных преобразователей, отсутствием особых требований к подготовке поверхности металла, высокой скоростью сканирования, простотой автоматизации процесса измерения [2—4]. Недостатком метода MFL является то, что в настоящее время он является индикаторным и может лишь указывать на проблемные участки объекта контроля. Для определения геометрических параметров формы дефектов необходим дополнительный анализ — например, сравнение топографии измеренных компонент магнитного поля с топографией поля эталонных дефектов [5, 6]. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для поверхностных дефектов [7] позволило бы существенно улучшить качество контроля методом MFL и сэкономить время и средства, направленные на исследование ферромагнитных объектов.

В [8] приведен метод приближенного решения обратной геометрической задачи магнитостатики на основе измеренного над поверхностью металла распределения магнитного поля, но этот метод применим лишь в двумерной конфигурации, при которой магнитные преобразователи расположены над поверхностью с дефектом и при постоянной величине магнитной проницаемости ферромагнетика.

В [9—11] был разработан теоретический подход к приближенному решению обратной геометрической задачи магнитостатики для трехмерных дефектов с учетом нелинейной зависимости  $\mu(\mathbf{H})$  для случая расположения магнитных преобразователей над бездефектной поверхностью ферромагнитной пластины.

В настоящей работе представлена методика, позволяющая приближенно решить обратную геометрическую задачу магнитостатики для ферромагнитной пластины, содержащей поверхностный дефект на одной из своих поверхностей, по измеренному магнитному полю над любой из поверхностей пластины (рис. 1, 2). Несмотря на то, что в данной работе методика применяется к двумерному случаю, при постоянном значении магнитной проницаемости  $\mu$  ( $\mu \gg 1$ ) материала пластины методика позволяет решать обратную геометрическую задачу магнитостатики и в трехмерном случае с учетом нелинейной зависимости  $\mu$  от вектора напряженности магнитного поля.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в трехмерном пространстве расположена ферромагнитная пластина с относительной магнитной проницаемостью  $\mu$  ( $\mu = \text{const}$ ,  $\mu \gg 1$ ), на одной из ее поверхностей находится бесконечно протяженный поверхностный дефект потери сплошности металла (см. рис. 1, 2). На рис. 1 и 2 изображены сечения пластины плоскостью, перпендикулярной прямой, вдоль которой вытянут дефект. Оси  $x$  и  $z$  лежат в плоскости рисунка, а ось  $y$  — перпендикулярна плоскости чертежа так, чтобы все три оси образовывали правую тройку. Величина внешнего намагничивающего поля постоянна:  $\mathbf{H}_0 = (H_{0x}, 0, 0)$ ;  $H_{0x} = \text{const}$ ;  $\mathbf{H}_0$  — вектор напряженности внешнего магнитного поля. Рис. 1 и 2 различаются лишь по взаимному расположению магнитных преобразователей и поверхности пластины, содержащей дефект. На рис. 1 показана конфигурация расположения магнитных преобразователей над бездефектной поверхностью металла. Назовем такое взаимное расположение Конфигурацией 1. На рис. 2 изображена Конфигурация 2. Отличить, имеем мы дело с Конфигурацией 1 или Конфигурацией 2, с помощью магнитного поля можно способом, описанным в [12], используя полюсное (перпендикулярное поверхности) намагничивание пластины. Магнитные преобразователи в этом случае фиксируют магнитное поле только от дефектов на ближайшей поверхности пластины.

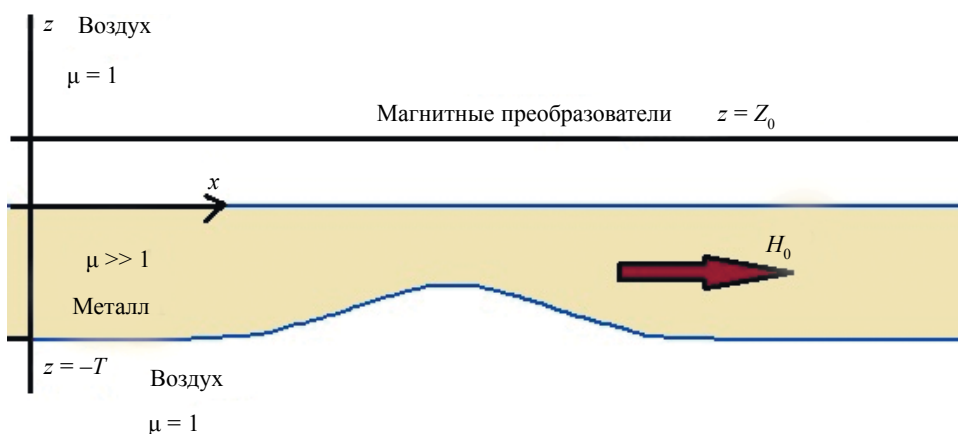


Рис. 1. Конфигурация 1. Магнитные преобразователи расположены над бездефектной поверхностью металла;  $T$  — толщина пластины.

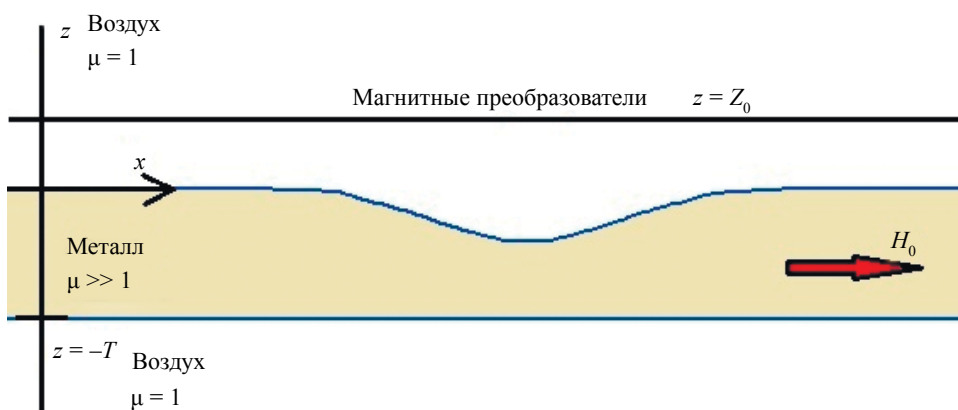


Рис. 2. Конфигурация 2. Магнитные преобразователи расположены над поверхностью пластины, содержащей дефект;  $T$  — толщина пластины.

Сформулируем задачу: по измеренному полю на уровне  $z = Z_0$  необходимо определить параметры формы поверхностного дефекта потери сплошности металла для Конфигурации 1 и для Конфигурации 2.

Поскольку понимание работы методики решения задачи для Конфигурации 1 принципиально важно для понимания работы методики решения задачи для Конфигурации 2, еще раз опишем как работает методика решения задачи для Конфигурации 1 в двумерном линейном случае.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ ДЕФЕКТА ПО ИЗМЕРЕННЫМ НАД БЕЗДЕФЕКТНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛА КОМПОНЕНТАМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Проведем мысленный эксперимент. Если поместить вытянутую вдоль оси  $x$  ферромагнитную пластину (при этом ферромагнетик имеет бесконечно большое значение  $\mu$ ), содержащую на одной поверхности дефект потери сплошности металла, во внешнее однородное намагничивающее поле, направленное также по оси  $x$  (как на рис. 1, 2), то из закона преломления силовой магнитной линии на границе двух сред следует, что силовые магнитные линии, построенные вблизи границ металл—воздух внутри такого образца, будут описывать форму поверхностей пластины. При этом считаем, что дефект и прилегающие к нему справа и слева области достаточно удалены от краев пластины.

В магнитомягких ферромагнетиках относительная магнитная проницаемость велика [13] и составляет величины от 100 до 100 000. Поэтому описанное выше свойство силовых магнитных линий можно использовать для приближенного решения обратной геометрической задачи магнитостатики.

На первом этапе, используя уравнения Максвелла для случая магнитостатики, можно восстановить магнитное поле в ферромагнетике, начиная с бездефектной границы металл—воздух, где значения компонент магнитного поля известны (начальные условия) до некоторой величины по оси  $z$  (величина  $z$  может превышать реальную толщину пластины — обозначим ее  $T$ ), при этом считая, что всюду ниже находится металл. Далее, используя величины вычисленных компонент магнитного поля, можно построить систему силовых магнитных линий. Силовые магнитные линии начинаются слева от дефекта в бездефектной области, где влияние магнитного поля, создаваемого дефектом пренебрежимо мало, и заканчиваются в такой же области справа от дефекта.

Выбрав силовую магнитную линию точки которой при удалении от дефекта образуют прямую с постоянной координатой  $z$ , соответствующей толщине пластины ( $z = -T$ , см. рис. 1), мы получим кривую, приближенно описывающую форму поверхностного дефекта. Предположение о том, что всюду ниже уровня с начальными условиями находится металл, означает, что поток вектора магнитной индукции между двумя силовыми линиями, построенными на границах металл—воздух, сверху и снизу пластины постоянен, т.е. получаем случай с  $\mu = \infty$ .

Предлагаемая схема расчета не учитывает реального скачка нормальной составляющей напряженности при переходе металл—воздух на поверхности дефекта (вся расчетная область считается металлом). Оценить аналитически величину возникающей по этой причине погрешности в расчете силовых линий поля внутри изделия практически невозможно. Поэтому судить о такой погрешности можно с помощью многократных тестовых расчетов по определению формы поверхностных дефектов для случаев, при которых такая форма заранее известна. Такие расчеты были проделаны путем решения прямой задачи в программе FEMM.

Для иллюстрации результатов расчетов приведем два примера, отражающих общие черты поведения силовых магнитных линий для поверхностных дефектов.

На рис. 3 для поверхностного дефекта «каверна» [7] изображены силовые линии, полученные в результате решения прямой (в программе FEMM) и обратной задачи. В качестве начальных условий для решения обратной задачи были взяты значения компонент магнитного поля на бездефектной границе металл—воздух, вычисленные в программе FEMM. Глубина дефекта «каверна» 3,5 мм, раскрытие 31 мм.

До уровня глубины дефекта силовые магнитные линии, полученные в результате решения прямой задачи, совпадают с магнитными линиями, полученными в результате решения обратной задачи. На рис. 3 эти линии обозначены номерами 1—3. Магнитные линии с номерами 4 и 5 получены в результате решения прямой задачи. До силовой магнитной линии, обозначенной на рис. 3 цифрой 4, магнитные линии, полученные в результате решения прямой задачи, выходят из металла наподобие магнитной линии с номером 5. Магнитная линия с номером 6 получена в результате решения обратной задачи. Как видно из рис. 3, она хорошо описывает глубину дефекта и несколько хуже его раскрытие. Однако локализовать дефект по оси  $x$  позволяет топография любой из рассчитанных компонент напряженности магнитного поля в металле.

На рис. 4 для поверхностного дефекта «общая коррозия» [7] изображены силовые линии, полученные в результате решения прямой (в программе FEMM) и обратной задачи. В качестве началь-

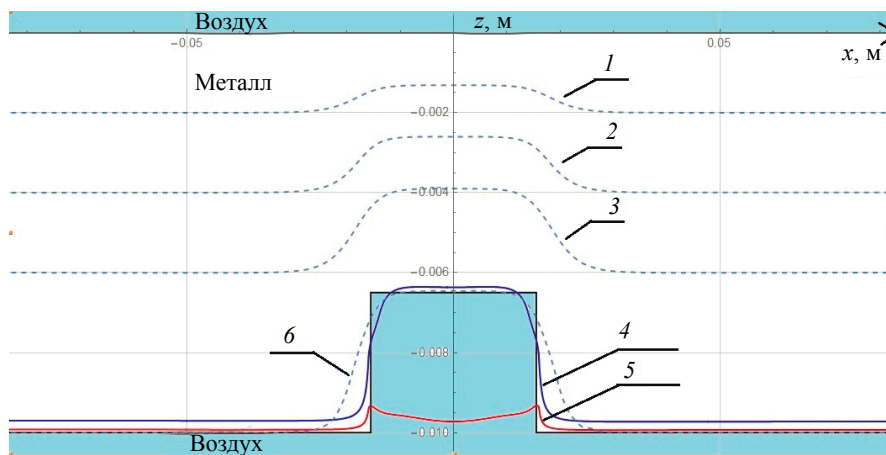


Рис. 3. Силовые магнитные линии для дефекта «каверна», построенные в результате решения прямой и обратной задачи. Значения магнитного поля в плоскости  $xz$  в прямой задаче рассчитаны в программе FEMM. В качестве начальных условий для решения обратной задачи также были взяты значения магнитного поля, рассчитанные в программе FEMM. До уровня глубины дефекта силовые магнитные линии, вычисленные в результате решения прямой и обратной задачи, совпадают (штриховые линии 1—3). Силовые магнитные линии 4 и 5 получены в результате решения прямой задачи. Силовая магнитная линия 6 (штриховая линия) получена в результате решения обратной задачи.

ных условий для решения обратной задачи были взяты значения компонент магнитного поля на бездефектной границе металл—воздух, вычисленные в программе FEMM. Глубина дефекта «общая коррозия» 3,5 мм, раскрытие 31 мм.

Как видно из рис. 4, силовые магнитные линии качественно ведут себя так же, как и на рис. 3. Но при более плавном росте глубины дефекта силовая магнитная линия, полученная в результате решения обратной задачи, лучше описывает его локальную форму.

Поскольку в трещинах и трещиноподобных дефектах [7] магнитный поток (вследствие малой величины раскрытия дефекта) проходит по воздуху, то представленная методика не может быть применена для получения параметров формы таких дефектов.

Итак, перейдем к численной реализации решения обратной задачи для Конфигурации 1 и для Конфигурации 2.

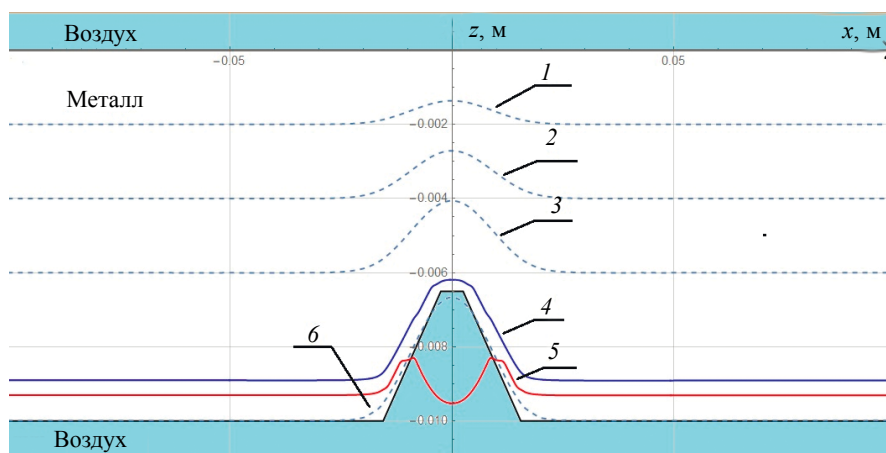


Рис. 4. Силовые магнитные линии для дефекта «общая коррозия», построенные в результате решения прямой и обратной задачи. Значения магнитного поля в плоскости  $xz$  в прямой задаче рассчитаны в программе FEMM. В качестве начальных условий для решения обратной задачи также были взяты значения магнитного поля, рассчитанные в программе FEMM. До уровня глубины дефекта силовые магнитные линии, вычисленные в результате решения прямой и обратной задачи, совпадают (штриховые линии 1—3). Силовые магнитные линии 4 и 5 получены в результате решения прямой задачи. Силовая магнитная линия 6 (штриховая линия) получена в результате решения обратной задачи.

### КОНФИГУРАЦИЯ 1

Впервые методика решения обратной задачи для такой конфигурации была предложена в работах [9, 10], в [11] методика была проверена в условиях реального эксперимента с сильно вытянутым дефектом (квазидвумерный случай), обсуждены границы применимости методики. В [10, 11] показана возможность применения методики в трехмерном нелинейном ( $\mu$  — нелинейная функция от  $|\mathbf{H}|$ ) случае.

Итак, допустим для простоты, что поле измерено прямо на границе воздух—металл со стороны воздуха (рис. 5). Для пересчета величин компонент магнитного поля в металл (на границе воздух—металл) используем выражения сопряжения на границе двух сред (1):

$$\begin{aligned} H_{\text{твоздух}} &= H_{\text{тметалл}}, \\ B_{\text{нвоздух}} &= B_{\text{нметалл}} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $H_{\text{твоздух}}$ ,  $H_{\text{тметалл}}$  — тангенциальные компоненты напряженности магнитного поля на границе воздух—металл;  $B_{\text{нвоздух}}$ ,  $B_{\text{нметалл}}$  — нормальные компоненты индукции магнитного поля на границе воздух—металл. Значения  $H_{\text{тметалл}}$ ,  $B_{\text{нметалл}}$  вместе со значениями их производных по оси  $x$  (которые можно вычислить) будут начальными данными для восстановления поля в направлении  $-z$ , вглубь металла.

Для восстановления поля в металле перепишем уравнения Максвелла для случая магнитостатики в виде начальной задачи Коши. А именно:

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= 0, \\ \text{div } \mathbf{B} &= \mu \cdot \text{div} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Откуда получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial z} &= \frac{\partial H_z}{\partial x}, \\ \frac{\partial H_z}{\partial z} &= -\frac{\partial H_x}{\partial x}. \end{aligned} \quad (3)$$

Решим систему уравнений (3) методом конечных разностей. Для этого разобьем плоскость сечения металлической пластины на рис. 5 прямоугольной сеткой с шагом сетки по оси  $x$  —  $\Delta_x$ ; по оси  $z$  —  $\Delta_z$ . По оси  $z$ : начиная с уровня  $Z_n = -0$  (с уровня границы воздух—металл со стороны металла) и заканчивая несколько ниже уровня  $z = -T$ . По оси  $x$ : от левого края (см. рис. 5), где влияние дефекта пренебрежимо мало, и заканчивая противоположным правым краем, на таком же удалении от дефекта. Начальные данные: компоненты магнитного поля ( $H_x$ ,  $H_z$ ) с помощью (1) определены в точках на границе воздух—металл со стороны металла, т.е. в узлах сетки  $(1, j)$ , где индекс  $j$  принимает значения от 1 до некоей величины  $N_j$ , характеризующей максимальное число столбцов сетки; производные по координате  $x$ :  $\frac{\partial H_x}{\partial x}$  и  $\frac{\partial H_z}{\partial x}$  вычислим с помощью конечно-разностных аппроксимаций:

$$\frac{\partial H_k}{\partial x}(1, j) = (H_k(1, j+1) - H_k(1, j-1)) / (2 \cdot \Delta_x), \quad (4)$$

где  $k = x, z$ . Для удобства будем считать  $H_k(i, 1) = H_k(i, N_j)$  и  $H_k(i, N_j + 1) = H_k(i, 2)$ , где индекс  $i$  принимает значения от 1 до величины  $N_i$ , характеризующей максимальное число строк сетки.

Таким образом начальные условия определены во всех узлах сетки по оси  $x$ .

Итак, перепишем решение системы (3) в конечных разностях:

$$\begin{aligned} H_x(i+1, j) &= H_x(i, j) - \frac{\partial H_z}{\partial x}(i, j) \cdot \Delta_z; \\ H_z(i+1, j) &= H_z(i, j) - \frac{\partial H_x}{\partial x}(i, j) \cdot \Delta_z, \end{aligned} \quad (5)$$

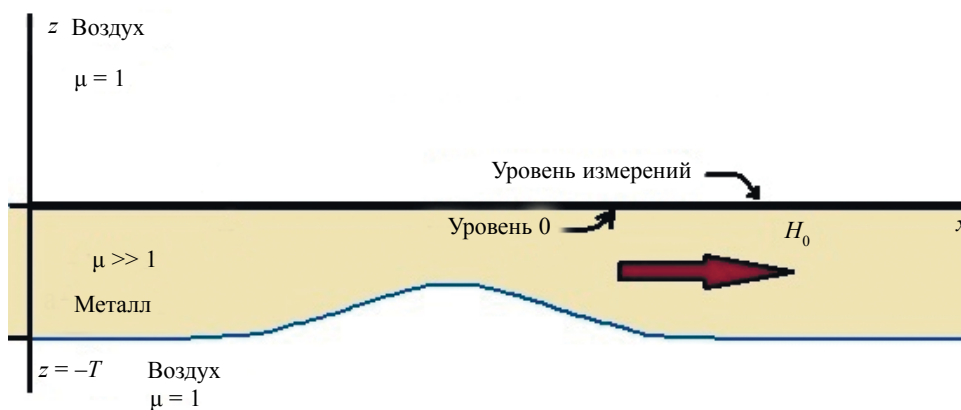


Рис. 5. Конфигурация 1. Магнитные преобразователи расположены на бездефектной поверхности металла. Магнитные преобразователи расположены на границе воздух—металл со стороны воздуха.

знаки в правой части системы уравнений (5) поставлены с учетом отрицательного направления по оси  $z$  при восстановлении поля в металле (см. рис. 5).

Используя систему (5), мы можем пересчитать значения компонент магнитного поля в узлах сетки от начального уровня до последней строки сетки, все время предполагая, что не покидаем область пространства, занятую ферромагнетиком. Значения компонент магнитного поля в любой точке между узлами сетки можно получить, используя, например, линейную интерполяцию.

Восстановив, таким образом, значения компонент магнитного поля во всем пространстве внутри сетки, мы можем строить силовые линии следующим способом:

$$Z_{B,i+1} = Z_{B,i} + \frac{H_{z,i}}{\sqrt{H_{x,i}^2 + H_{z,i}^2}} \cdot l;$$

$$X_{B,i+1} = X_{B,i} + \frac{H_{x,i}}{\sqrt{H_{x,i}^2 + H_{z,i}^2}} \cdot l, \tag{6}$$

где  $Z_{B,i}$  —  $z$ -координаты точек силовой линии;  $X_{B,i}$  —  $x$ -координаты точек силовой линии;  $l$  — длина малого отрезка (10—100 мкм) для построения силовой линии.

Построим силовую линию, начинающуюся из бездефектной области слева от дефекта (см. рис. 5), где влияние магнитного поля дефекта пренебрежимо мало, и заканчивающуюся в такой же области справа от дефекта на уровне  $z = -T$  ( $T$  — толщина пластины). Построенная таким образом кривая определяет геометрические параметры формы поверхностного дефекта.

Границы применимости метода, полученные в результате численного эксперимента, обсуждены в [11].

На рис. 6 приведена кривая, построенная описанным выше способом, форма дефекта задана гауссианой с высотой 4 мм и раскрытием 30 мм. Толщина пластины равна 10 мм. Стоит отметить,

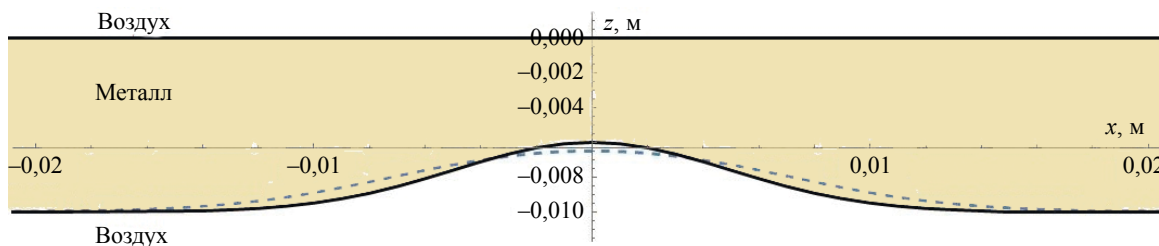


Рис. 6. Силовая магнитная линия (штриховая линия) точно повторяет форму дефекта (граница металл—воздух показана сплошной линией).

что такая толщина (10 мм) характерна как для стенок труб магистральных нефте- и газопроводов, так и для стенок бурильных и насосно-компрессорных труб. Начальные условия для решения обратной задачи были рассчитаны в результате решения прямой задачи с помощью программы FEMM.

Максимальная разница между рассчитанной кривой и кривой, описывающей форму дефекта, составляет величину около 7 %.

## КОНФИГУРАЦИЯ 2

В случае такого взаимного расположения магнитных преобразователей и поверхности с дефектом (см. рис. 2) уровень по оси  $z$ , на котором можно пересчитать поле с уровня измерений (воздух) в металл, неизвестен. Однако можно найти способ частично свести решение задачи для Конфигурации 2 к уже описанному решению задачи для Конфигурации 1.

Действительно, при удалении от системы зарядов (в данном случае фиктивных магнитных зарядов) на расстояния большие, чем расстояния между зарядами в системе, топография поля от зарядов становится одинаковой, с какой бы стороны не производили измерения. В качестве иллюстрации приведем рис. 7 и 8, на которых показано полученное в результате численного экспери-

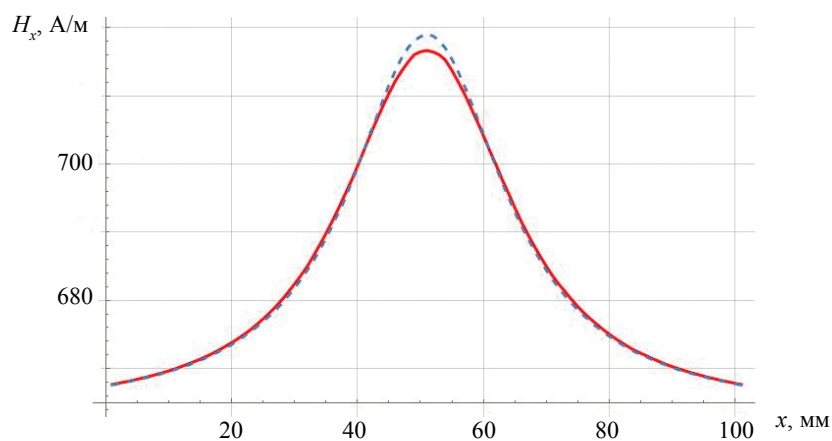


Рис. 7. Сплошная линия соответствует распределению  $H_x$ , измеренному на расстоянии  $3T$  (30 мм) от бездефектной поверхности; штриховая линия соответствует распределению  $H_x$ , измеренному на расстоянии  $3T$  от содержащей дефект поверхности.

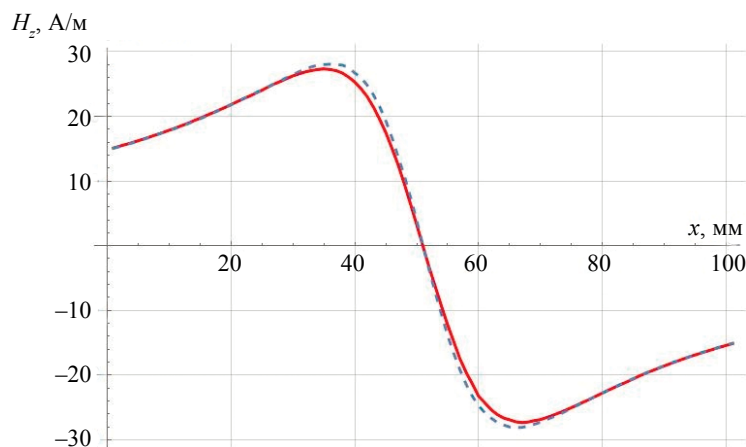


Рис. 8. Сплошная линия соответствует распределению  $H_z$ , измеренному на расстоянии  $3T$  (30 мм) от бездефектной поверхности; штриховая линия соответствует распределению  $H_z$ , измеренному на расстоянии  $3T$  от содержащей дефект поверхности.

мента (решение прямой задачи в программе FEMM) распределение компонент магнитного поля от пластины, содержащей уже описанный выше дефект: глубина 4 мм, величина раскрытия 30 мм, толщина пластины 10 мм. Компоненты поля измерены на расстоянии  $3T$  (30 мм) от поверхности пластины для обеих конфигураций.

С учетом картины распределения компонент магнитного поля на рис. 7 и 8 можно считать, что у нас имеются компоненты магнитного поля, измеренные над бездефектной поверхностью (Конфигурация 1) и, таким образом, полностью свести задачу нахождения формы дефекта к описанному выше методу.

Однако, увеличивая расстояние, мы увеличиваем область, в которой нужно восстанавливать компоненты магнитного поля, что ведет к накоплению ошибки при пересчете поля с одного уровня по оси  $z$  на другой. Полученная в результате кривая определит форму дефекта неточно.

Предлагается следующий метод для решения задачи по восстановлению формы поверхностного дефекта в случае Конфигурации 2.

Измерив компоненты магнитного поля на расстояниях, близких к величине  $T/2$ , от содержащей дефект поверхности, можно использовать их при вычислении начальных условий в геометрии задачи для Конфигурации 1. Очевидно, что получившаяся (в результате решения по вышеописанному методу) кривая определит форму дефекта с ошибкой. Далее нужно найти способ уточнения геометрических параметров получившейся кривой, определяющей форму поверхностного дефекта.

Хорошим естественным критерием для уточнения формы дефекта является равенство тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля в точках кривой на рассчитанной границе металл—воздух: а) полученное пересчетом компонент поля по воздуху, начиная от уровня измерений; б) полученное описанным в предыдущем абзаце способом от начальных условий в металле.

На рис. 9 показаны три кривые, полученные в результате решения прямой задачи при помощи программы FEMM, параметры формы дефекта те же как и ранее. Две кривые соответствуют распределению  $H_x$ , измеренному на расстоянии  $0,5T$  от поверхности пластины: для Конфигурации 1 (сплошная линия с номером 1) и Конфигурации 2 (штриховая линия). Третья кривая — сплошная линия с номером 2 представляет распределение  $H_x$  на границе воздух—металл со стороны металла (Конфигурация 1), т.е. с учетом того, что в случае Конфигурации 1 компоненты  $H_z$  на границе воздух—металл со стороны металла практически равны нулю (в соответствии с выражениями сопряжения компонент магнитного поля на границе двух сред  $H_z$  уменьшается в  $\mu$  раз при пересчете из воздуха в металл,  $\mu = 1000$ , при этом даже в зоне дефекта максимальное значение величины  $H_x$  больше максимального значения  $H_z$ ), кривая 2 — это начальные условия для получения силовой магнитной линии, определяющей форму дефекта.

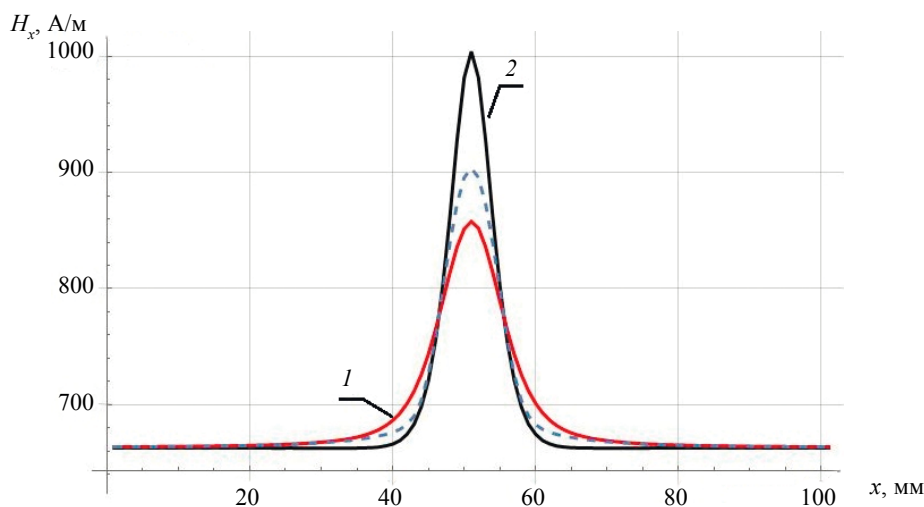


Рис. 9. Сплошная линия 1 соответствует распределению  $H_x$ , измеренному на расстоянии  $0,5T$  от бездефектной поверхности; штриховая линия соответствует распределению  $H_x$ , измеренному на расстоянии  $0,5T$  от содержащей дефект поверхности; сплошная линия 2 — это распределение  $H_x$  на границе воздух—металл со стороны металла на бездефектной поверхности пластины.



По геометрии кривых на рис. 9 видно, что штриховая линия может быть хорошим первым приближением для получения с помощью некоего алгоритма сплошной линии с номером 2. Очевидно, что измеренное над дефектом поле для любой формы поверхностного дефекта будет хорошим приближением для начальных условий на бездефектной поверхности. Это замечание относится только к объяснению логики построения метода, применяемого для решения задачи в случае Конфигурации 2. В действительности, в случае Конфигурации 2 мы не имеем возможности измерить распределение  $H_x$  на бездефектной поверхности металла.

Итак, в качестве первого шага используем результаты измерений, полученные на расстоянии  $0,5T$  от поверхности с дефектом (штриховая линия на рис. 9) в качестве начальных условий на границе металла, на бездефектной поверхности. Используем метод для решения обратной геометрической задачи магнитостатики для Конфигурации 1. Результат показан на рис. 10.

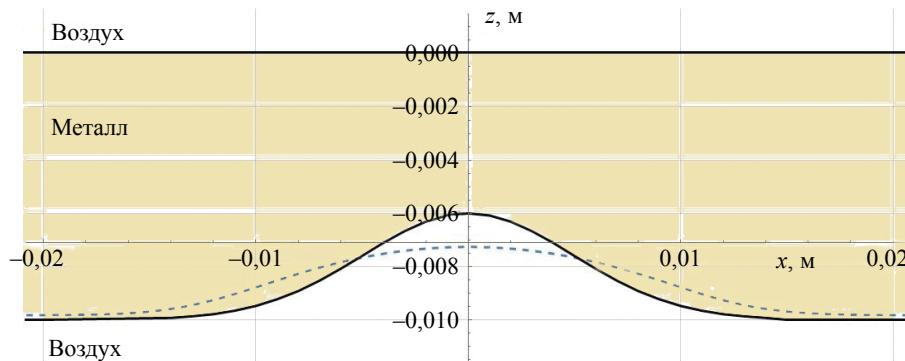


Рис. 10. Вычисленная магнитная силовая линия (штриховая кривая). В качестве начальных данных взяты результаты измерений  $H_x$ , полученные на расстоянии  $0,5T$  от поверхности с дефектом.

Как и ожидалось, получившаяся линия описывает форму дефекта неточно. Максимальная разница между рассчитанной кривой и кривой, описывающей форму дефекта, составляет величину немного более 20 %. На рис. 11 показана разница ( $\Delta H_\tau$ ) в точках вычисленной кривой между тангенциальными составляющими напряженности магнитного поля, вычисленными от уровня измерений в воздухе и от уровня начальных данных в металле.

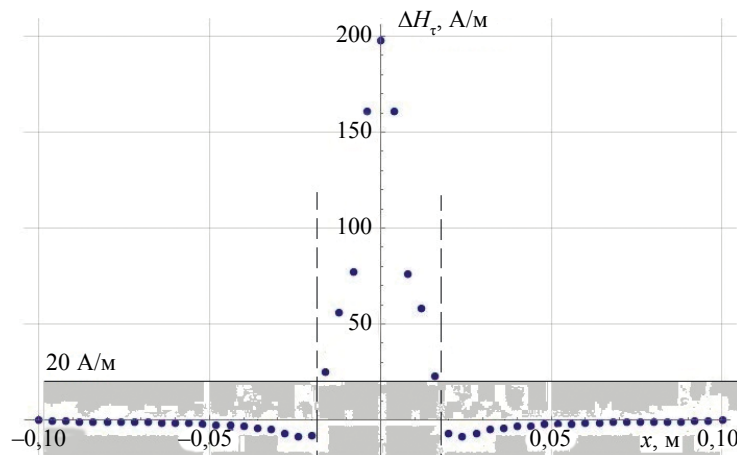


Рис. 11.  $\Delta H_\tau$  в точках вычисленной кривой — штриховой линии на рис. 10.

Условимся, что если в любой точке вычисленной кривой  $|\Delta H_\tau| < 20$  А/м, то такая точка является решением обратной геометрической задачи. Таким образом, на рис. 11 множество точек, расположенных до левой штриховой линии и после правой штриховой линии, является решением обратной задачи.

Для получения точек пространства между штриховыми линиями, удовлетворяющих описанному выше критерию и, значит, определяющих форму дефекта, повторим процедуру решения обратной задачи для Конфигурации 1. В качестве новых начальных условий в узлах сетки на границе металл—воздух со стороны металла положим следующие значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля:

$$H_{x,1,i}^{\text{мет}} = k_i \cdot (H_{\tau,i}^{\text{возд}} + H_{\tau,i}^{\text{мет}}) / 2, \quad (7)$$

где  $k_i = H_{x,i}^{\text{мет нач}} / H_{\tau,i}^{\text{мет}}$  — коэффициент уменьшения. Он показывает, насколько уменьшается тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в точках по оси  $x$  при переходе с уровня границы поверхности металла с дефектом на уровень начальных условий;  $H_{x,i}^{\text{мет нач}}$  — начальное значение в  $i$ -й точке по оси  $x$  тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля, на границе в металле, на бездефектной поверхности;  $H_{\tau,i}^{\text{мет}}$  — значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в  $i$ -й точке по оси  $x$  в металле, на границе поверхности металла с дефектом, рассчитанное от начальных условий в металле;  $H_{\tau,i}^{\text{возд}}$  — значение в  $i$ -й точке по оси  $x$  тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в воздухе, на границе поверхности металла с дефектом, рассчитанное от уровня измерений в воздухе.

После двух итераций с использованием формулы (7) для задания начальных условий, получаем множество точек, определяющих форму дефекта, как показано на рис. 12. Во всех точках выполнено условие  $|\Delta H_i| < 20$  А/м.

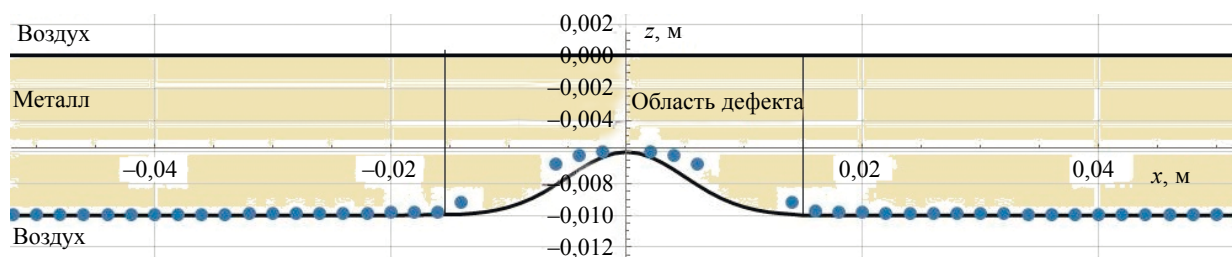


Рис. 12. Полученное после двух итераций множество точек, в которых  $|\Delta H_i| < 20$  А/м, определяет параметры формы дефекта. Точность определения глубины дефекта превышает 97 %.

Заметим, что в начале каждой «итерации» мы задаем новые начальные условия, которые используются для вычисления производных. Численное дифференцирование приближенно заданных функций (результаты измерений) является некорректной задачей, поэтому спустя три-четыре «итерации» получившаяся кривая перестает быть непрерывной функцией аргумента: малые изменения аргумента приводят к значительным изменениям значений функции. Отсюда следует, что предложенным методом можно определить лишь фрагменты формы дефекта, а также его раскрытие (как и в случае Конфигурации 1 [11]) и глубину.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод показывает возможность определения параметров формы дефекта, находящегося на любой поверхности исследуемой металлической пластины, при использовании стандартного MFL-метода.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика», Г.р. № 122021000030-1.

## 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. No. 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-diaagnostika-spomoshchyu-magnitnykh-defektoskopov-vysokogo-razresheniya](https://ntcngd.com/uslugi/article_post/vnutritrubnaya-diaagnostika-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. № 38. С. 92—98. <https://cyberleninka.ru/journal/n/izvestiya-peterburgskogo-universiteta-putey-soobscheniya?i=897018>
4. *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&>
5. *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. 307 с.
6. *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.
7. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines, 2016. <https://pipelineoperators.org/>
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. *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. No. 10. P. 726—732. <https://elibrary.ru/item.asp?id=38652516>
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. No. 12. P. 849—854; <https://elibrary.ru/item.asp?id=38674783>
11. *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 двумерных дефектов с учетом нелинейных свойств ферромагнетика // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 46—55.]
12. *Nikitin A.V., Mikhaylov A.V., Gobov Yu.L., Popov S.E.* Determination of the Surface of Defect Location and Restoration of Its Geometric Parameters by the Mfl Method with One-Sided Access to the Ferromagnetic Plate // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2021. Is. 6. P. 45—53. [http://dream-journal.org/issues/2021-6/2021-6\\_348.html](http://dream-journal.org/issues/2021-6/2021-6_348.html)
13. *Преображенский А.А., Бишард Е.Г.* Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1986. 349 с.