

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ ДЕФЕКТОМЕТРИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

©2023г. А.В. Никитин^{1,*}, А.В. Михайлов^{1,**}, Л.В. Михайлов^{1,***},
Ю.Л. Гобов^{1,****}, В.Н.Костин^{1,*****}, Я.Г.Смородинский^{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; ***mikhaylov_lv@imp.uran.ru;
****go@imp.uran.ru; *****kostin@imp.uran.ru; *****sm@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 17.07.2023; после доработки 29.09.2023
Принята к публикации 03.10.2023

Представлена методика приближенного решения обратной геометрической задачи магнитостатики для пластины из магнитомягкого ферромагнетика в магнитном поле как для случая расположения магнитных преобразователей непосредственно над поверхностным дефектом потери сплошности металла, так и для случая, при котором магнитные преобразователи расположены над бездефектной поверхностью пластины. Предполагается, что к пластине имеется доступ только с одной стороны. Определены размеры дефектов, в которых предлагаемая методика работает надежно. Показано, что предложенная методика может быть использована в мобильных приборах для осуществления дефектометрии буровых труб с помощью MFL (Magnetic flux leakage) метода прямо на буровых площадках.

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

SCOPE OF APPLICABILITY OF THE TECHNIQUE FOR CONSTRUCTING MAGNETIC INDUCTION LINES FOR FLAW DEFECTOMETRY OF EXTENDED OBJECTS

A.V. Nikitin, A.V. Mikhaylov, L.V. Mikhaylov, Yu.L. Gobov, V.N. Kostin, Ya.G. Smorodinskiy

¹ Institute of Metal Physics named after M.N. Mikheev Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia
620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 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

A technique for approximate solution of the inverse geometric problem of magnetostatics for a plate made of a soft magnetic ferromagnet in a magnetic field is presented. The technique is presented both for the case of the location of magnetic transducers directly above the surface defect of loss of continuity of the metal, and for the case in which the magnetic transducers are located above the defect-free surface of the plate. It is assumed that the plate is accessible from one side only. The sizes of defects in which the proposed technique works reliably are determined. It is shown that the proposed technique can be used in mobile devices to carry out flaw detection of drill pipes using the MFL (Magnetic flux leakage) method directly at drilling sites.

Keywords: inverse geometric problem of magnetostatics, defectometry, metal loss of continuity defects, surface defects, magnetic field of defect scattering, MFL method.

DOI: 10.31857/S0130308223120060, EDN: XHIPS

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на широкое применение магнитного метода неразрушающего контроля, основанного на регистрации рассеяния магнитного потока (MFL-метод) для диагностики промышленных изделий из ферромагнетиков [1], его недостатком является то, что это индикаторный метод. Нелинейный отклик ферромагнетика на магнитное поле существенно осложняет решение обратной геометрической задачи. Этим объясняется отсутствие методик и устройств, позволяющих определять размеры и форму поверхностных дефектов с помощью MFL-метода.

Исторически решение обратной геометрической задачи магнитостатики началось с создания моделей дефектов, для которых решалась прямая задача магнитостатики [2—5]. Затем магнитостатические поля от таких эталонных дефектов сравнивались с полями, наблюдаемыми при исследовании реальных промышленных изделий. Однако вследствие множества форм дефектов и уже упомянутого нелинейного отклика ферромагнетика на намагничивающее поле, такой подход до

настоящего времени не решил задачу дефектометрии применительно к промышленным объектам, созданным из ферромагнитных материалов.

В 2004 г. впервые для двумерного линейного случая (линейная зависимость вектора магнитной индукции от вектора напряженности магнитного поля), для конфигурации, когда датчики расположены над дефектной поверхностью, обратная задача магнитостатики была решена в работе [6]. Но для практического применения необходимо продолжить это решение на трехмерный нелинейный случай, что не так просто для предлагаемой методики. В 2019 г. была опубликована работа [7], в которой для линейного случая «получены интегродифференциальные уравнения, решения которых определяют форму намагниченного до насыщения произвольного ферромагнитного тела или полости в нем без априорного предположения о принадлежности занимаемых ими областей какому-либо конкретному геометрическому классу». В указанной работе теоретически обоснована возможность решения задачи по определению границы намагниченного до насыщения тела, выведены уравнения для функции, описывающей форму границы магнетика. Однако для практического использования данной работы требуется разработка численного алгоритма для решения этих уравнений.

В силу нелинейного отклика ферромагнетика на внешнее магнитное поле и большого разнообразия геометрических параметров дефектов пока не создано устройств, использующих нейронные сети для определения формы дефектов по результатам измерений компонент магнитного поля при MFL-методе.

В [8, 9] была впервые разработана методика, позволяющая приближенно определять форму поверхностных дефектов ферромагнитной пластины в двумерном и трехмерном случае с учетом нелинейного отклика ферромагнетика по измеренным компонентам магнитного поля, полученным методом регистрации рассеяния магнитного потока. Методика позволяет восстанавливать форму дефектов при измерении компонент магнитного поля вблизи любой поверхности пластины, т.е. вблизи поверхности с дефектом (назовем такой случай конфигурацией 2), либо вблизи бездефектной поверхности (конфигурация 1), что показано на рис. 1. В работе [10] показано, как при одностороннем доступе к пластине отличить конфигурацию 1 от конфигурации 2. Методика неприменима для определения формы трещин и трещинообразных дефектов (определение трещин и трещинообразных дефектов согласно [11]). Такая ситуация, например, реализуется для бурильных труб, где характерными дефектами тела бурильной трубы являются: износ внутренней поверхности в виде сквозных каверн, раковины на внутренней поверхности, утонение стенок трубы [12].

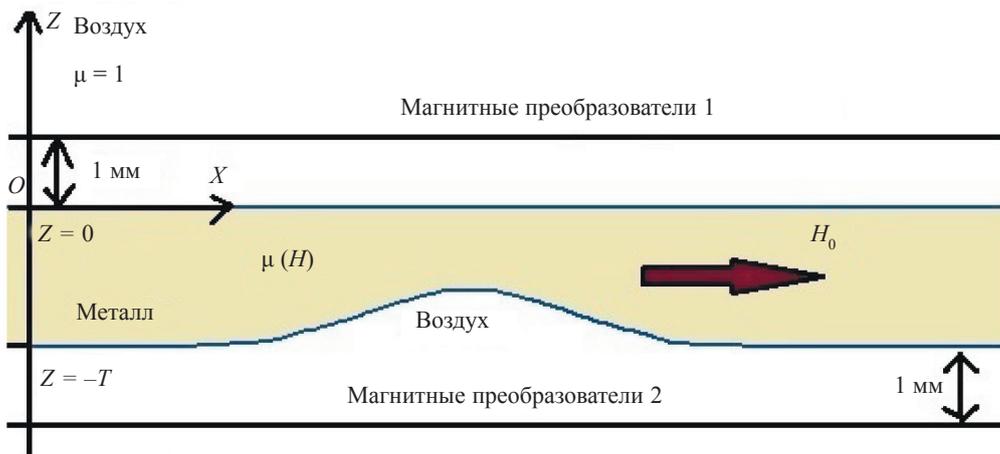


Рис. 1. Сечение пластины плоскостью, перпендикулярной прямой, вдоль которой вытянут дефект. Оси OX и OZ направлены так, как показано на рисунке, а ось OY — перпендикулярно плоскости чертежа так, чтобы все три оси образовывали правую тройку. Поле намагничивания направлено вдоль оси OX ; $\mu(H)$ — магнитная проницаемость ферромагнетика.

На рис. 1 показаны две возможные взаимные конфигурации дефекта и магнитных преобразователей при одностороннем доступе магнитных преобразователей к пластине. Дефект может находиться на противоположной от магнитных преобразователей стороне пластины (конфигурация 1,

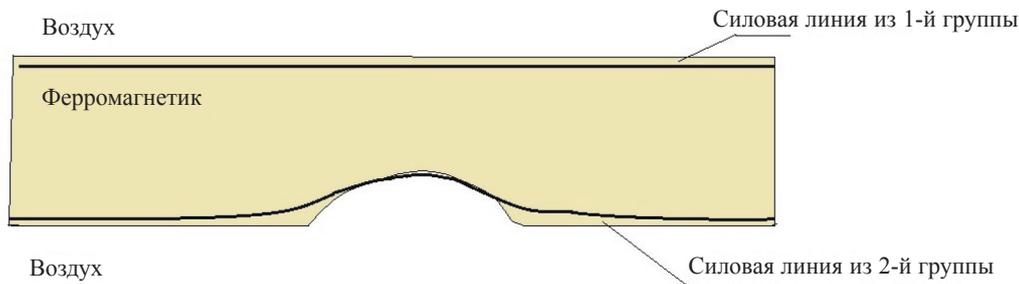


Рис. 2. Сечение пластины плоскостью, перпендикулярной прямой, вдоль которой вытянут дефект. На рисунке показана поверхность металлической пластины и рассчитанные силовые линии. Зазор между границами ферромагнетика и рассчитанными магнитными линиями выбран для наглядности. В расчетах силовая магнитная линия строится прямо по границе металл—воздух.

на рис. 1 обозначена как «магнитные преобразователи 1») и на близлежащей к магнитным преобразователям стороне пластины (конфигурация 2 на рис. 1 обозначена как «магнитные преобразователи 2»).

В случае, когда дефекты расположены на противоположной от магнитных преобразователей поверхности металлической пластины (конфигурация 1 на рис. 1), методика применяется следующим образом.

Первый этап методики. Разобьем плоскость измерений («магнитные преобразователи 1» на рис. 1) линиями, параллельными оси OX , с шагом по оси OY Δ_y , начиная от $y = -0,1$ м до $y = 0,1$ м, и линиями, параллельными оси OY с шагом по оси OX Δ_x , начиная от $x = -0,1$ м до $x = 0,1$ м. Для определенности примем $\Delta_x = \Delta_y$. В узлах получившейся сетки (i, j) измерим компоненты магнитного поля $H_x(i, j)$, $H_y(i, j)$ и $H_z(i, j)$. По этим компонентам в узлах сетки построим тангенциальные и нормальные векторы напряженности магнитного поля:

$$\mathbf{H}_{\tau,0}(i, j) = (H_x(i, j), H_y(i, j), 0)^T; \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{n,0}(i, j) = (0, 0, H_z(i, j))^T; \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_0(i, j) = \mathbf{H}_{\tau,0}(i, j) + \mathbf{H}_{n,0}(i, j), \quad (3)$$

за положительное направление вектора нормали \mathbf{n} к поверхности металла выберем положительное направление оси OZ (см. рис. 1).

С помощью выражений сопряжения компонент магнитного поля на границе двух сред перенесем тангенциальные векторы напряженности магнитного поля из точек в воздухе в соответствующие точки в металле на границе металл—воздух. При этом нормальные векторы напряженности магнитного поля внутри металла во всех точках на бездефектной поверхности принимаются равным нулевому вектору, поскольку в ферромагнетиках после пересчета из воздуха в металл они пренебрежимо малы по сравнению с тангенциальными векторами напряженности магнитного поля. Таким образом, на начальном уровне — в точках граничной бездефектной поверхности металл—воздух внутри металла определены нормальная и тангенциальная компоненты напряженности магнитного поля, а следовательно, и их производные по тангенциальному направлению. Используем эти компоненты магнитного поля, а также их производные в качестве начальных условий уравнения Коши для восстановления магнитного поля в металле.

На втором этапе магнитное поле в металле восстанавливается с помощью решения уравнений Максвелла для случая магнитостатики от уровня начальных условий в предположении, что всюду ниже упомянутой границы также находится металл.

На третьем этапе для определения формы дефекта по границам поверхностей пластины в металле строятся 2 группы силовых магнитных линий. Силовые магнитные линии первой группы проходят вдоль границы металл—воздух на бездефектной поверхности металла. Силовые магнитные линии второй группы начинаются на противоположной поверхности металла в области, которая не содержит дефект, проходят через дефект и заканчиваются в бездефектной области (см. рис. 2). За силовые магнитные линии, по определению, магнитный поток не выходит. И в действительности, величина магнитного потока, выходящего за пределы этих рассчитанных сило-

вых линий (т.е. за пределы ферромагнетика), много меньше величины магнитного потока в металле, поэтому выходом магнитного потока даже в зоне дефекта можно пренебречь.

В случае, когда дефекты расположены на ближней к магнитным преобразователям поверхности пластины (см. конфигурация 2 на рис. 1), методика применяется как описано ниже.

Поскольку, в отличие от предыдущего случая, в зоне дефекта неизвестно расстояние от уровня измерений в воздухе до границы металла, будем считать, что построенные в точках плоскости измерений тангенциальные векторы напряженности магнитного поля являются нулевым приближением тангенциальных векторов в точках плоскости над бездефектной поверхностью металла. При этом нормальные векторы напряженности магнитного поля внутри металла в точках на бездефектной поверхности вновь принимаются равными нулевому вектору. Далее повторим три этапа, которые описаны выше.

В результате получим поверхность, которая приближенно описывает поверхность реального дефекта (силовые магнитные линии 2-й группы). В точках на получившейся поверхности сравним тангенциальные векторы, полученные в результате применения методики (обозначим их как $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)$ — тангенциальные векторы на поверхности, содержащей дефект со стороны металла), и тангенциальные векторы, полученные в результате восстановления поля в воздухе от уровня измерений (обозначим их как $\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)$ — тангенциальные векторы на этой же поверхности со стороны воздуха), т.е. проверим, выполняется ли в точках на получившейся поверхности выражение сопряжения для тангенциальных векторов напряженности магнитного поля со стороны металла и со стороны воздуха.

Поверхность, содержащая дефект, порождена семейством силовых магнитных линий, откуда следует, что в точках, лежащих на вычисленной поверхности внутри металла, тангенциальные векторы равны векторам напряженности магнитного поля. Для длин этих векторов можем записать:

$$|\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)| = \sqrt{H_{x,m}^2(i, j) + H_{y,m}^2(i, j) + H_{z,m}^2(i, j)}. \quad (4)$$

Скалярные проекции векторов напряженности магнитного поля, полученные в результате восстановления поля в воздухе — $\mathbf{H}_a(i, j)$ на $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)$, дадут длины векторов $\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)$:

$$|\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)| = \frac{(\mathbf{H}_a(i, j) \cdot \mathbf{H}_{\tau,m}(i, j))}{|\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)|}. \quad (5)$$

Точки вычисленной поверхности, где длины тангенциальных векторов напряженности магнитного поля $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)$ совпадают с $\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)$, определены верно. В точках поверхности $(x_p, y_p, Z_{\text{boundi},j})$, где они не совпадают, необходимо переопределить значения тангенциальных векторов на начальном уровне, т.е. в точках $(x_p, y_p, 0)$.

Для определения величин новых начальных тангенциальных векторов в узлах сетки на границе металл—воздух со стороны металла используем следующую процедуру. В узлах сетки (i, j) рассчитаем $\kappa(i, j) = |\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j, Z_{\text{boundi},j})| / |\mathbf{H}_{\tau,0}(i, j, 0)|$ — коэффициенты изменения величин тангенциальных векторов от значения на вычисленной поверхности $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j, Z_{\text{boundi},j})$ до начального значения $\mathbf{H}_{\tau,0}(i, j, 0)$. В узлах сетки на поверхности $(i, j, Z_{\text{boundi},j})$ вычислим разность $\Delta(i, j) = |\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)| - |\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)|$, переопределим начальные значения тангенциальных векторов следующим образом:

$$\mathbf{H}_{\tau,0}^{\text{new}}(i, j) = \mathbf{H}_{\tau,0}(i, j) + \kappa(i, j) \cdot \Delta(i, j) / 4, \quad (6)$$

где $\mathbf{H}_{\tau,0}^{\text{new}}(i, j)$ — новые значения тангенциальных векторов.

Далее, с помощью описанной ранее методики получим новую поверхность, приближенно описывающую форму дефекта. В точках получившейся поверхности сравним тангенциальные вектора, получающиеся при восстановлении поля в воздухе, и с помощью методики — в металле. В результате получим новые начальные условия для тангенциальных векторов в узлах сетки. Процесс можно повторять до тех пор, пока величины $\Delta(i, j)$ не станут достаточно малы и, следовательно, $\mathbf{H}_{\tau,0}^{\text{new}}(i, j) \approx \mathbf{H}_{\tau,0}(i, j)$, т.е. дальнейшие итерации практически перестанут изменять геометрические параметры формы дефекта. В результате получим поверхность, приближенно описывающую форму дефекта.

Для применения описанной выше методики на практике необходимо установить область размеров дефектов, в которой она надежно работает. Этой цели посвящена представленная работа. Для получения начальных условий при решении обратной геометрической задачи магнитостатики использовались решения прямой задачи с помощью программы ELMER, а также результаты натуральных экспериментов [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В численных трехмерных экспериментах начальные условия для решения обратной геометрической задачи магнитостатики были получены с помощью решения прямой задачи в программе ELMER. Толщина пластины была принята равной 10 мм ($T = 10$ мм). Величина T была выбрана такой, поскольку для магистральных труб наземных трубопроводов, бурильных и насосно-компрессорных труб значение T составляет около 10 мм. Уровень измерений 1 мм находился над поверхностью пластины как в случае конфигурации 1, так и в случае конфигурации 2 (см. рис.1). На этом уровне были получены значения компонент напряженности магнитного поля в точках, равноотстоящих на 1 мм, на площади 200×200 мм. Центр дефекта всегда находился в центре квадрата 200×200 мм.

Были получены поля для дефектов с глубинами от 2 до 5 мм с шагом 1 мм. Раскрытие дефекта составляло величины от 5×5 мм (5 мм по оси OX и 5 мм по оси OY соответственно) до 30×45 мм; с шагом по оси OX 5 мм (от 5 до 30 мм), по оси OY шаг 10 мм (от 5 до 45 мм).

В натуральных экспериментах начальные условия для обратной задачи были измерены в следующих искусственно созданных дефектах (рис. 3).

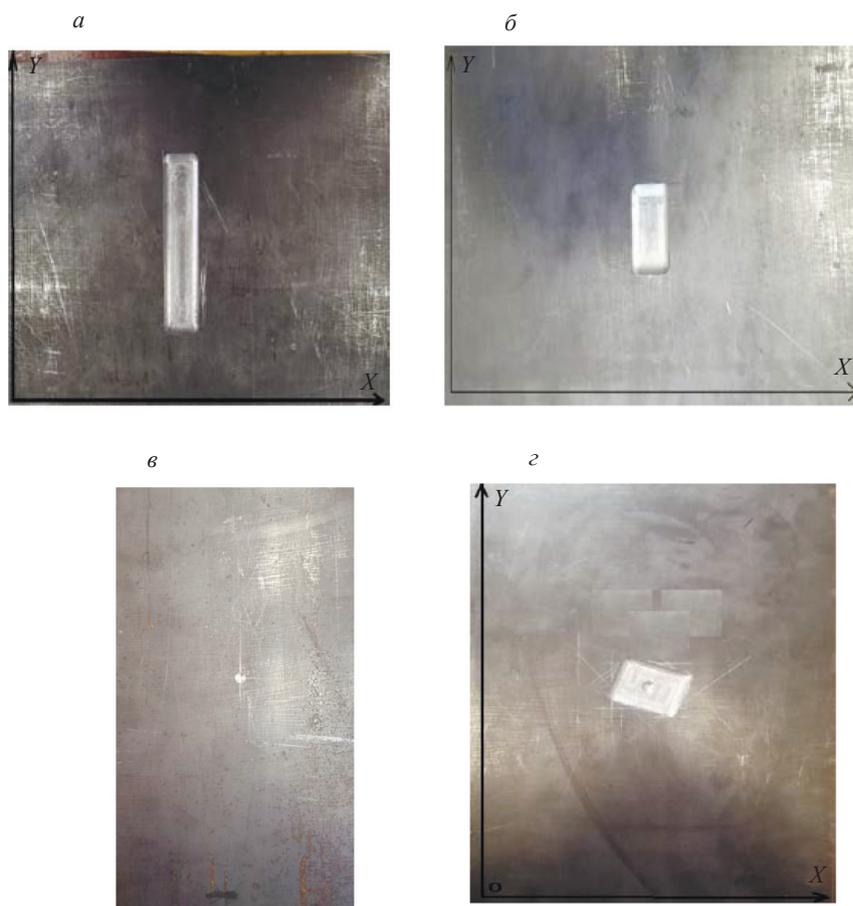


Рис. 3. Искусственные дефекты, созданные в металлических пластинах из стали 20. Размеры пластин 200×400 мм, толщина пластины $T = 10$ мм. Прямоугольные дефекты имеют сглаженные верхние края. Размеры дефектов описываются следующим образом: [размер вдоль оси OX , мм] \times [размер вдоль оси OY , мм] \times [размер вдоль оси OZ , мм]. Дефект с размерами $30 \times 100 \times 4$ мм (а); дефект с размерами $30 \times 40 \times 5$ мм (б); дефект с размерами $10 \times 10 \times 2$ мм и дефект $10 \times 10 \times 5$ мм (в); дефект расположен под углом к осям OX и OY , большая сторона дефекта 40 мм, меньшая 30 мм, площадка основной части дефекта имеет глубину 2 мм, в центре дефекта находится лунка диаметром 7 мм и глубиной 2 мм (г).

Поскольку раскрытие дефекта с хорошей точностью можно определить по измеренной топографии магнитного поля в воздухе, вблизи поверхности металла (рис. 4—7), то рассмотрим точность определения глубины дефектов с помощью предложенной методики.

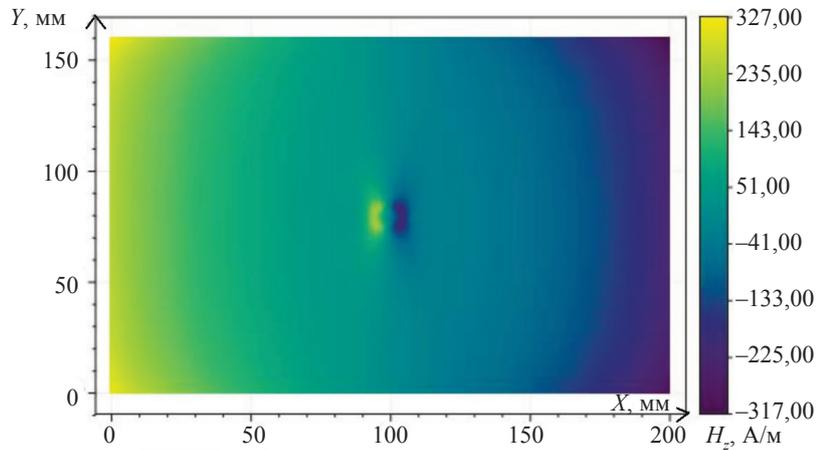


Рис. 4. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над поверхностью с дефектом (конфигурация 2). Дефект в виде лунки, диаметр 10 мм, глубина 2 мм.

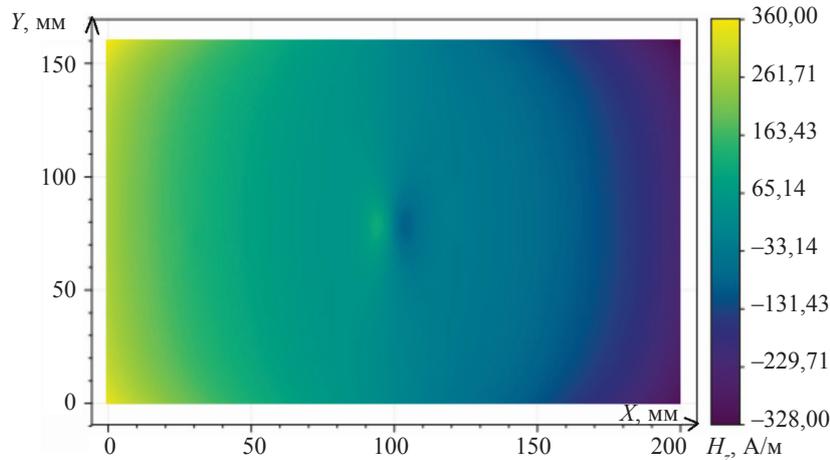


Рис. 5. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над бездефектной поверхностью (конфигурация 1). Дефект в виде лунки, диаметр 10 мм, глубина 2 мм.

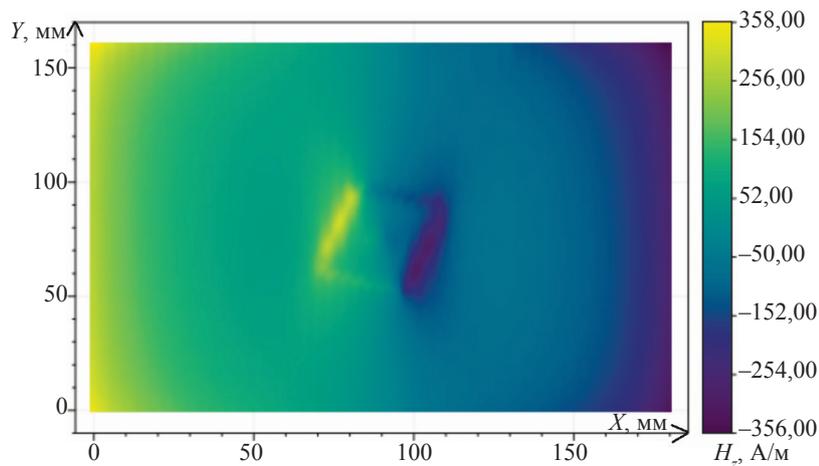


Рис. 6. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над поверхностью с дефектом (конфигурация 2). Дефект расположен под углом к осям OX и OY , большая сторона дефекта 40 мм, меньшая 30 мм, площадка основной части дефекта имеет глубину 2 мм, в центре дефекта находится лунка диаметром 7 мм и глубиной 2 мм.

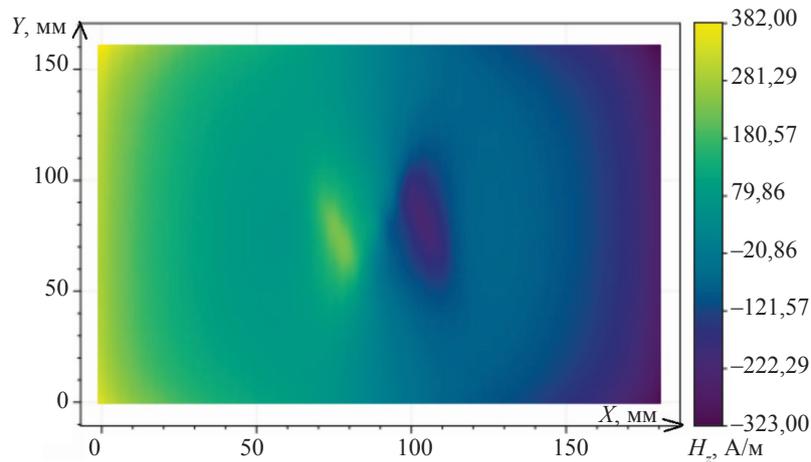


Рис. 7. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над бездефектной поверхностью (конфигурация 1). Дефект расположен под углом к осям OX и OY , большая сторона дефекта 40 мм, меньшая 30 мм, площадка основной части дефекта имеет глубину 2 мм, в центре дефекта находится лунка диаметром 7 мм и глубиной 2 мм.

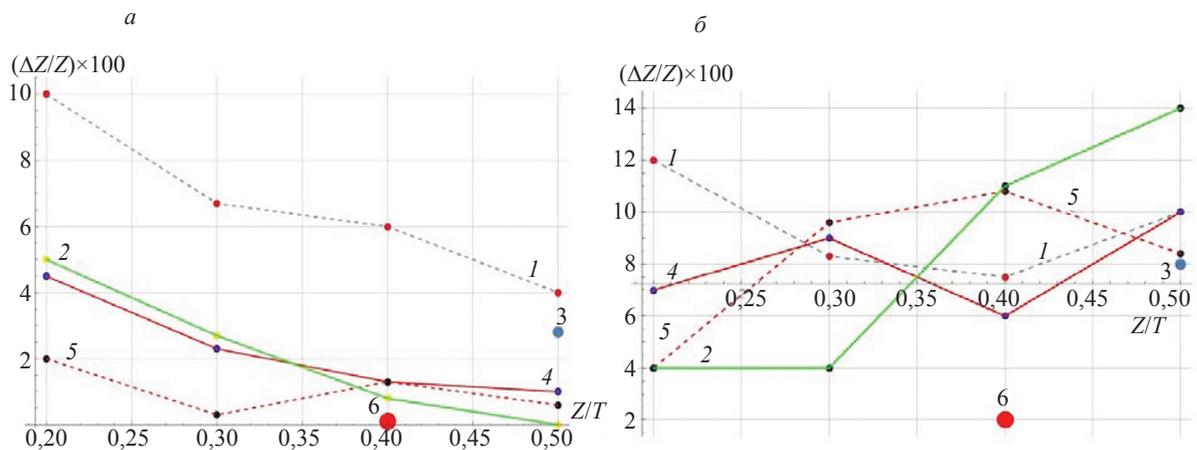


Рис. 8. Ошибка в процентах при определении глубины дефекта в зависимости от глубины дефекта для разных величин раскрытия: график для конфигурации 1 (а); для конфигурации 2 (б). Пунктирная кривая с номером 1 — соответствует дефекту с раскрытием $3T-3,5T$; сплошная кривая с номером 2 — дефекту $2T-3,5T$; точка с номером 3 — соответствует реальному дефекту $3T-4T$; сплошная кривая с номером 4 — дефекту $3T-4,5T$; пунктирная линия с номером 5 — дефекту $2T-4,5T$; точка с номером 6 — соответствует реальному дефекту $3T-10T$.

На рис. 8—10 показана ошибка определения глубин дефектов по предложенной методике в зависимости от их размеров. Ошибка рассчитанной глубины дефекта в процентах от реальной глубины дефекта определена по следующей формуле: $(|Z - Z_{\text{calc}}|/Z) \times 100$, где Z — реальный размер дефекта вдоль оси OZ , Z_{calc} — рассчитанная согласно методике глубина дефекта. Ошибка в процентах отложена по оси ординат. По оси абсцисс отложена глубина дефекта в единицах толщины пластины (Z/T). Раскрытие дефекта описывается как $L_x - L_y$, где L_x — длина дефекта вдоль оси OX в единицах T ; L_y — длина дефекта вдоль оси OY в единицах T . Начальные условия в численных и натуральных экспериментах получены для прямоугольных дефектов со сторонами вдоль OX и OY . Так же как в натуральных экспериментах, прямоугольные дефекты в численных экспериментах имеют сглаженные верхние края. Для всех дефектов справедливо неравенство $L_y \geq L_x$, т.е. рассматриваем только поперечные поверхностные дефекты потери сплошности металла.

Рис. 8 иллюстрирует тот факт, что для дефектов с раскрытием сторон $2T$ и более ошибка определения глубины по предложенной методике составляет менее 15%. Можно отметить, что ошибка определения глубины дефекта уменьшается с ростом L_y по сравнению с L_x в случае конфигурации 1.

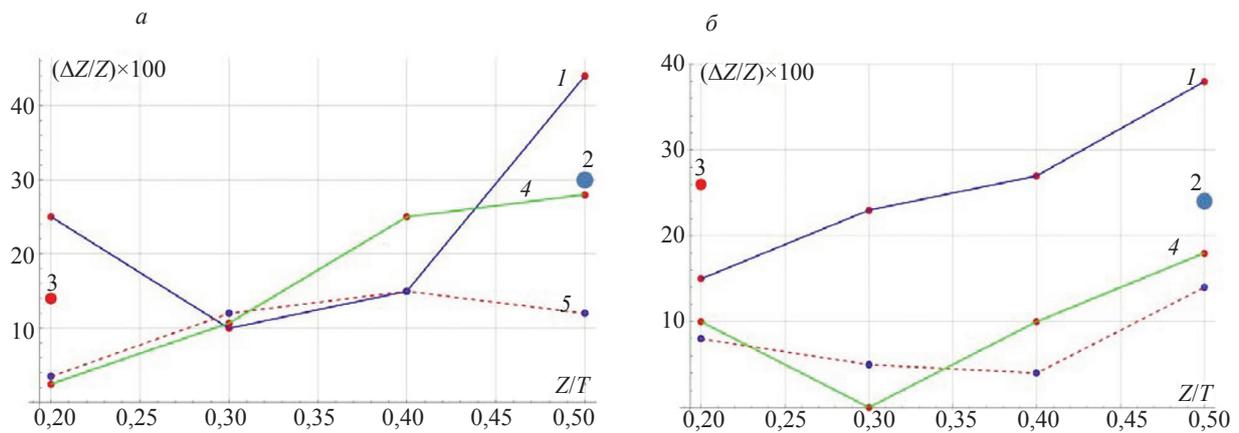


Рис. 9. Ошибка в процентах при определении глубины дефекта в зависимости от глубины дефекта для разных величин раскрытия: график для конфигурации 1 (а); для конфигурации 2 (б). Сплошная линия с номером 1 — соответствует дефекту с раскрытием $0,5T-0,5T$; точка с номером 2 и точка с номером 3 — соответствуют реальным дефектам с раскрытием $1T-1T$; сплошная линия с номером 4 — соответствует дефекту $1,5T-1,5T$; сплошная линия с номером 5 — соответствует дефекту с раскрытием $2,5T-2,5T$.

На рис. 9 показаны дефекты с равными величинами раскрытия по OX и OY ($L_x = L_y$). Для всех ошибок, превышающих 20 % на рис. 9, глубина дефекта, рассчитанная с помощью предлагаемой методики, меньше реальной глубины. Для дефектов с $L_x = L_y$ величина ошибки наибольшая — сравним с результатами на рис. 10. Однако, начиная с раскрытия $2,5T-2,5T$, величина ошибки для разных величин глубины дефекта не превышает 15 %.

Рис. 10 показывает, что даже при небольших величинах раскрытия поперечного дефекта ($0,5T-1T$ по L_x) ошибка при определении глубины дефекта меньше 20 %.

Ошибка при определении глубины несимметричного дефекта (см. рис. 3г) с помощью предложенной методики составила менее 8 % от его реальной толщины (для конфигурации 1 и для конфигурации 2), что подтверждает хорошую точность определения геометрических параметров дефекта.

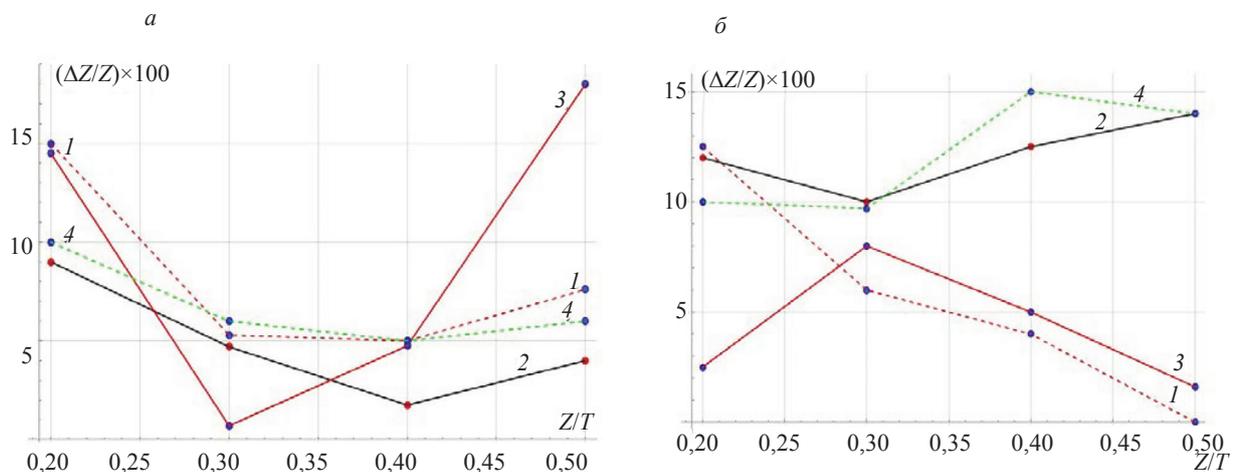


Рис. 10. Ошибка в процентах при определении глубины дефекта: график для конфигурации 1 (а); для конфигурации 2 (б). Пунктирная линия 1 — дефект $0,5T-1,5T$; сплошная линия 2 — дефект $1T-1,5T$; сплошная линия 3 — дефект $0,5T-2,5T$; пунктирная линия 4 — дефект $1T-2,5T$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведения 40 натуральных экспериментов и 240 численных экспериментов было показано, что между натуральными и численными экспериментами имеется хорошее соответствие для разных величин полей намагничивания (от 30 до 10000 А/м).

2. Если исключить из рассмотрения такие дефекты, как трещина и трещинообразные дефекты, то для типичных размеров поверхностных дефектов — каверны, раковины, утонение металлической пластины, величины раскрытия превышают $2T$, а в этом случае, с помощью описанной выше методики, геометрические параметры дефектов (топография глубин, раскрытие) определяются с ошибкой, менее 15 % от их реальных величин. Для небольших групп дефектов с раскрытием $0,5T—0,5T$ и менее, с глубиной $0,3T—0,5T$ (питтинговая коррозия) [14] можно ввести эмпирические множители для определения фактической глубины дефекта. В случае массового скопления питтинговых дефектов методика определит их как общее утонение стенки на дефектной поверхности.

3. Приведенные выше результаты показывают, что предложенная методика может быть использована в мобильных приборах для осуществления дефектометрии бурильных труб прямо на буровых площадках MFL-методом.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.В. Неразрушающий контроль / Справочник. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. Магнитные методы контроля. Машиностроение, 2004.
2. Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—59.
3. Кротов Л.Н., Шлеенков А.С., Щербинин В.Е. Компьютерное моделирование магнитных полей дефектов. Двумерная задача // Дефектоскопия. 1995. № 9. С. 27—32.
4. Кушнер А.В., Новиков В.А. Анализ моделей дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов // Вестник Белорусско-Российского Университета. 2014. № 1 (42)
5. Дякин В.В., Кудряшова О.Н., Раевский В.Я. Поле рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном внешнем поле // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 22—29.
6. 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.
7. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Обратная задача магнитостатики в полях насыщения // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 35—44.
8. Гобов Ю.Л., Никитин А.В., Попов С.Э. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 51—57.
9. 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.
10. Никитин А.В., Михайлов А.В., Гобов Ю.Л., Попов С.Э. Определение локализации дефекта, а также восстановление методом MFL его геометрических параметров при одностороннем доступе к ферромагнитной пластине // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2021. No. 6. P. 45—53.
11. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. <https://pipelineoperators.org/>
12. Штырев О.О. Причины разрушения тела бурильных труб при эксплуатации и преимущества бурильных труб с внутренним защитным покрытием // Территория Нефтегаз. 2014. № 12. С. 92—94.
13. Nikitin A.V., Mikhailov A.V., Smorodinskii Ya.G. Verification of a Technique for Reconstructing the Shape of Defects in Soft Magnetic Ferromagnets Using MFL Data // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 11. P. 1011—1017. [Никитин А.В., Михайлов А.В., Михайлов Л.В., Гобов Ю.Л., Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Верификация методики восстановления формы дефектов в магнитомягких ферромагнетиках с использованием MFL-данных // Дефектоскопия. 2022. № 11. С. 43—49.]
14. Кайдриков Р.А., Виноградова С.С. Питтинговая коррозия металлов и многослойных систем (исследование, моделирование, прогнозирование, мониторинг) // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 4. С. 212—227.