

Алгоритмы, устройства и условия применимости MFL-дефектометрии протяженных объектов с использованием методики построения линий магнитной индукции

Большинство производственных объектов в настоящее время изготавливают из сталей, которые, по своим магнитным свойствам, являются магнитомягкими ферромагнетиками. Надежная и долгосрочная эксплуатация таких объектов чрезвычайно важна для многих отраслей индустрии и транспорта. Однако, в процессе эксплуатации металлическая поверхность подвергается агрессивному воздействию внешней среды, что приводит к образованию поверхностных дефектов потери целостности (сплошности) металла. По этой причине становятся необходимы методы неразрушающего контроля (НК) состояния металла в процессе эксплуатации производственных объектов (то есть объектов контроля, ОК).

Один из наиболее часто используемых методов неразрушающего контроля — это метод регистрации магнитного потока рассеяния (Magnetic Flux Leakage, MFL). С помощью MFL метода дефекты обнаруживают следующим образом. Исследуемый участок намагничивают в определенном направлении так, что выявляемые дефекты искажают, создаваемый полем намагничивания, магнитный поток. В результате, часть магнитного потока в зоне дефекта выходит из металла наружу, что и фиксируется магнитными преобразователями. Необходимо заметить, что на практике часто происходит ситуация, когда имеется доступ только к одной поверхности металла. Назовем конфигурацию, когда магнитные преобразователи находятся над бездефектной поверхностью — конфигурацией 1, конфигурацию, когда магнитные преобразователи находятся над поверхностью с дефектом — конфигурацией 2. Рис. 1 иллюстрирует сказанное.

Таким образом, с помощью MFL метода можно оперативно выявить проблемные зоны в металле. Высокая скорость контроля, отсутствие необходимости дополнительно подготавливать исследуемую часть ОК, относительная низкая цена оборудования (в сравнении, например, с радиографическим и ультразвуковым методами НК), возможность автоматизации метода обеспечивают его широкое применение. Основным недостатком MFL метода является то, что это индикаторный метод. То есть с его помощью невозможно определить геометрические параметры формы поверхностного дефекта. В случае необходимости, требуется дополнительное исследование проблемной зоны металла, что увеличивает время и материальные затраты, выделяемые на обнаружение дефектов и определение степени их опасности.

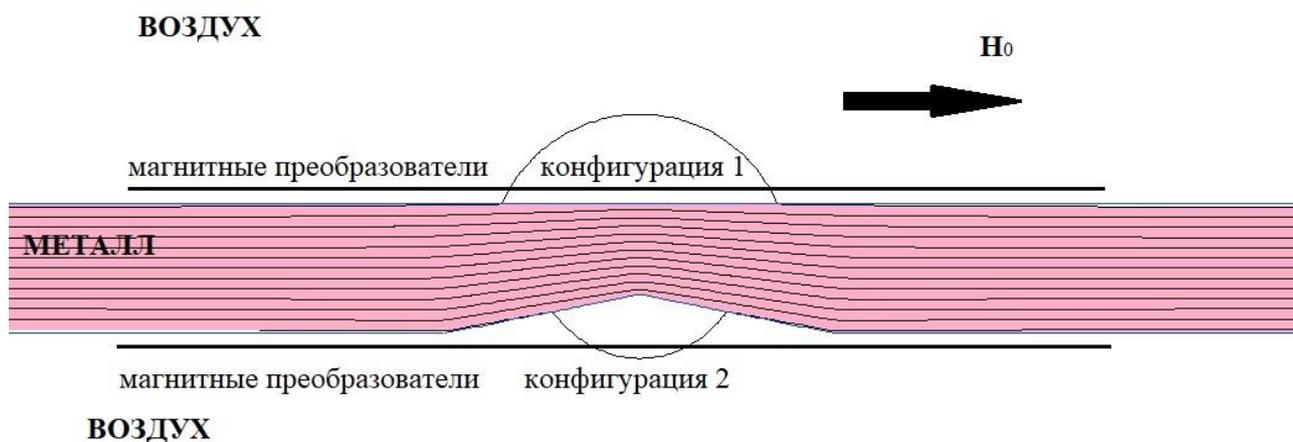


Рис. 1 Сечение металлической пластины в поперечном направлении по отношению к дефекту. \vec{H}_0 - внешнее постоянное магнитное поле. На рисунке показаны магнитные линии. Вследствие того, что дефект искажает магнитный поток, часть магнитного потока выходит за пределы ферромагнетика, что и фиксируется магнитными преобразователями.

Для того, чтобы определять геометрические параметры формы поверхностного дефекта MFL методом следует научиться вычислять геометрические границы металла в области дефекта с помощью измеренных значений компонент магнитного поля. Иными словами, требуется научиться получать решения обратной геометрической задачи магнитостатики в трехмерном случае с учетом нелинейной зависимости вектора магнитной индукции ферромагнетика от вектора напряженности магнитного поля. Работы в этом направлении ведутся с середины прошлого века и не прекращаются до сих пор [1-3].

Сложность решения обратных задач (ОЗ) заключается в следующем. Обратные задачи в общем случае являются некорректными, поскольку может существовать несколько решений для одних и тех же начальных условий задачи (неоднозначность решения), либо малые изменения в начальных условиях могут привести к большим изменениям в решении (неустойчивость решения).

Однако доказано [4], что в некоторых случаях из общего пространства функций являющихся решениями ОЗ можно выделить более узкий класс функций, такой, что для любой функции этого класса существует единственное решение соответствующей прямой задачи, эти функции однозначны, а также являются:

1. равномерно ограниченными;
2. равностепенно непрерывными.

Тогда для такого класса функций обратная задача будет корректной. Эта ситуация называется условной корректностью по Тихонову (по фамилии советского и российского математика А.Н. Тихонова). А семейство таких функций принято называть классом корректности.

Следуя [3], несложно доказать, что для пластины из магнитомягкого ферромагнетика с поверхностными трехмерными дефектами обратная геометрическая задача магнитостатики является условно корректной по Тихонову для класса дефектов, чьи формы описывает функция двух переменных $f(x, y) = Z_b$, где Z_b - это z координата границы металла в точке (x, y) , которую с заданной точностью можно представить отрезком двойного ряда Фурье. Это означает, что $f(x, y), \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$ являются непрерывными функциями в исследуемой области поверхности пластины, Рис. 2.

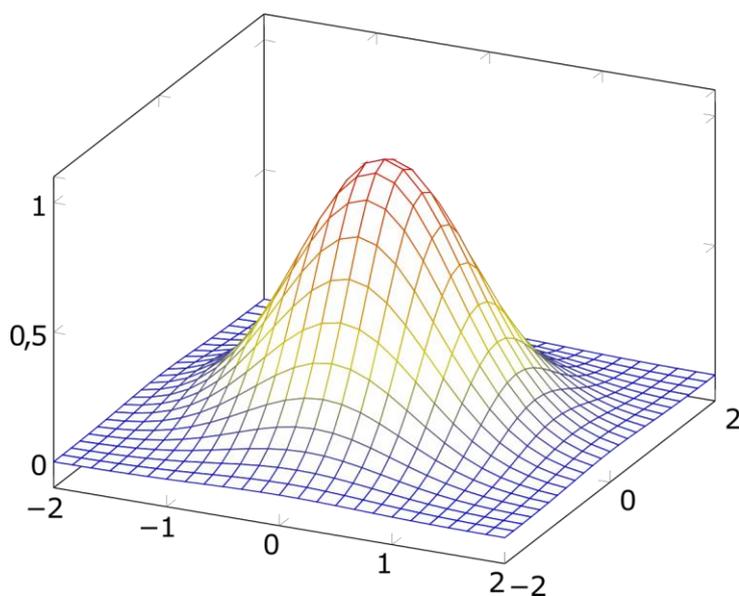


Рис. 2 Пример функции $f(x, y)$ такой, что $f(x, y), \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$ - являются непрерывными функциями.

Полученный результат хоть и является первым важным шагом в понимании класса дефектов, для которых можно рассчитать форму по топографии измеренных компонент

магнитного поля, но по-прежнему не приближает нас к решению соответствующего интегрального уравнения (именно так и будет выглядеть обратная задача, если решать ее «в лоб») с учетом нелинейных свойств ферромагнетика.

На помощь приходит физика, а именно понимание поведения магнитного поля в системе, состоящей из двух сред (Рис. 1):

- воздуха с постоянным значением относительной магнитной проницаемости равной единице: $\mu = 1$;

- магнитомягкого ферромагнетика, у которого $\mu = \mu(|\vec{H}|)$, где $|\vec{H}|$ - величина вектора напряженности магнитного поля.

Сейчас нам важно то, что магнитомягкие ферромагнетики обладают большой величиной относительной магнитной проницаемости (характерные величины относительной магнитной проницаемости μ для магнитомягких ферромагнетиков составляют от нескольких сотен до нескольких тысяч; возьмем, для определенности, $\mu = 1000$). Это означает, что величина магнитного поля (характеризуемая магнитной индукцией) в ферромагнетике будет в тысячу раз больше, чем в воздухе, или иначе: плотность магнитного потока в ферромагнетике в тысячу раз будет превышать плотность магнитного потока в воздухе. Величину магнитной индукции (т. е. магнитного поля) можно представить количеством магнитных линий (линий магнитной индукции), проходящих на единицу пересекаемой ими площади. В нашем случае ($\mu = 1000$) это означает, что из ферромагнетика в воздух может выйти только одна магнитная линия из тысячи. Заметим, что магнитные линии по определению не пересекаются (поскольку касательная к магнитной линии в каждой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции в этой точке, который определен в каждой точке однозначно). Из последних двух предложений можно сделать вывод о том, что выйти из металла в воздух может только магнитная линия, которая ближе всего подходит к границе металла. А это заключение указывает на то, что магнитные линии с высокой точностью описывают форму дефекта. Такой же вывод можно сделать рассмотрев формулу закона преломления магнитной линии на границе двух сред: $\frac{1}{\mu} \tan(\theta_a) = \tan(\theta_m)$, где $\mu = 1000$; θ_a - угол между границей металла и магнитной линией в воздухе, θ_m - угол между границей металла и магнитной линией в металле. Если даже $\theta_a = 89^\circ$, то θ_m будет чуть больше 3° .

Необходимо заметить, что магнитные линии не могут описывать форму трещин и трещинообразных дефектов (сильно вытянутые дефекты с раскрытием от 10 мкм до 1мм и глубиной, намного превышающей раскрытие). Дело в том, что в случае трещин и трещинообразных дефектов магнитный поток, проходящий внутри дефекта, сравним с магнитным потоком, который огибает дефект. В результате, магнитные линии проходят сквозь дефект.

Итак, во-первых, мы определили класс дефектов, для которого возможно определять геометрические параметры формы по измеренным в воздухе компонентам магнитного поля, во-вторых, убедились, что магнитные линии с хорошей точностью описывают форму таких дефектов за исключением трещин и трещинообразных дефектов.

Для того, чтобы рассчитать силовые магнитные линии мы должны отдельно рассмотреть конфигурацию 1 и конфигурацию 2. Начнем с конфигурации 1, так как эта конфигурация является ключевой для решения задачи о расчете силовых линий по измеренным над поверхностью ферромагнитной пластины значениям компонент напряженности магнитного поля. Данная методика была впервые предложена Ю.Л. Гобовым в [5-6]. Дело в том, что в случае конфигурации 1 нам известно расстояние от магнитных преобразователей до поверхности металла и, следовательно, используя выражения сопряжения компонент магнитного поля на границе двух сред, мы можем пересчитать значения \vec{H} и \vec{B} (вектора напряженности магнитного поля и магнитной индукции соответственно) с уровня измерений на границу воздух-металл со стороны металла. Значения \vec{H} и \vec{B} на границе бездефектной поверхности в металле (а значит и их производных на этой

поверхности) можно считать начальными условиями для решения задачи Коши. Так как выход магнитного потока из металла мал, то им можно пренебречь. Далее, используя уравнения Максвелла для случая магнитостатики плюс материальные уравнения, можно восстановить магнитное поле от бездефектной поверхности в сторону поверхности с дефектом и даже ниже, считая, что всюду ниже находится металл. В результате восстановления компонент магнитного поля можно построить семейство магнитных линий, начинающихся на поверхности с дефектом в бездефектной области «слева», проходящих через дефект, и заканчивающихся в бездефектной области «справа», что позволит описать геометрические параметры формы дефекта. Это возможно поскольку магнитные линии отвечают начальным условиям и магнитный поток не выходит за пределы этих рассчитанных линий, а значит за пределы ферромагнетика. В действительности магнитный поток за пределами ферромагнетика есть, но он мал по сравнению с потоком в металле и им с самого начала пренебрегли. Материальные уравнения позволяют найти магнитные линии с учетом нелинейных свойств ферромагнетика.

В случае конфигурации 2 поступим следующим образом. Поскольку, в отличие от предыдущего случая, в зоне дефекта неизвестно расстояние от уровня измерений в воздухе до границы металла, будем считать, что измеренные компоненты \vec{H} и \vec{B} являются нулевым приближением для их пересчета на границу металл-воздух со стороны металла на бездефектной поверхности пластины. Повторив описанные выше вычисления получим поверхность, которая приближенно описывает поверхность реального дефекта.

В точках на получившейся поверхности дефекта сравним тангенциальные векторы напряженности магнитного поля, полученные в результате применения методики и тангенциальные векторы, полученные в результате восстановления поля в воздухе от уровня измерений. То есть проверим выполняется ли в точках на получившейся поверхности выражение сопряжения для тангенциальных векторов напряженности магнитного поля со стороны металла и со стороны воздуха. Точки вычисленной поверхности, где тангенциальные векторы напряженности магнитного поля совпадают определены верно. В точках поверхности, где они не совпадают, переопределим соответствующим образом значения \vec{H} и \vec{B} на начальном уровне (добавляя к начальным компонентам тангенциальных векторов напряженности магнитного поля часть разности тангенциальных векторов напряженности магнитного поля на поверхности с дефектом умноженную на коэффициент изменения значений компонент магнитного поля от начального уровня до уровня нижней поверхности). Эту процедуру можно повторять до тех пор, пока величины разности тангенциальных векторов в области дефекта не станут достаточно малы и, следовательно, 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. Для получения начальных условий для решения обратной геометрической задачи магнитостатики использовались решения прямой задачи с помощью программы ELMER, а также результаты натуральных экспериментов [7].

Для проведения натуральных экспериментов использовалась экспериментальная установка показанная на Рис. 3.

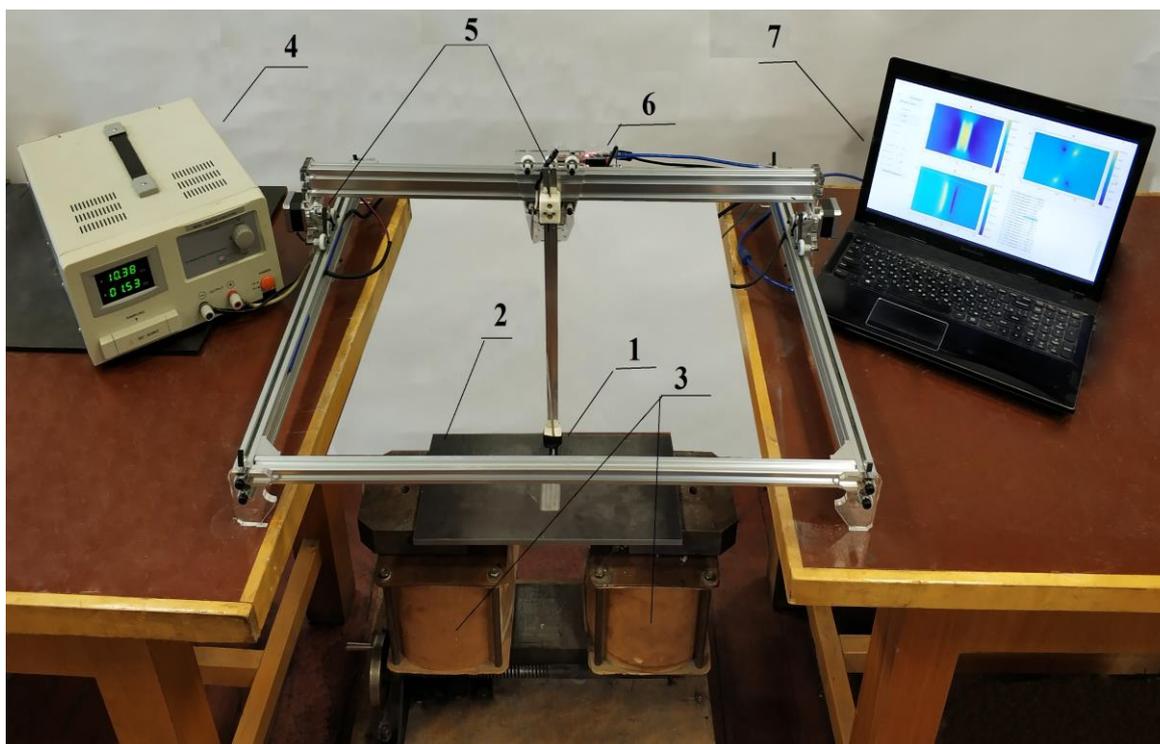


Рис. 3 Фотография экспериментальной установки. На фотографии: 1 — расположение магнитного преобразователя Холла ALS31300; 2 — исследуемая стальная пластина; 3 — катушки намагничивания; 4 — источник постоянного тока QJ6010E (0-60 В, 10 А); 5 — шаговые двигатели каретки с магнитным преобразователем; 6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

В натурных экспериментах начальные условия для обратной задачи были измерены в следующих искусственно созданных дефектах, Рис. 4.

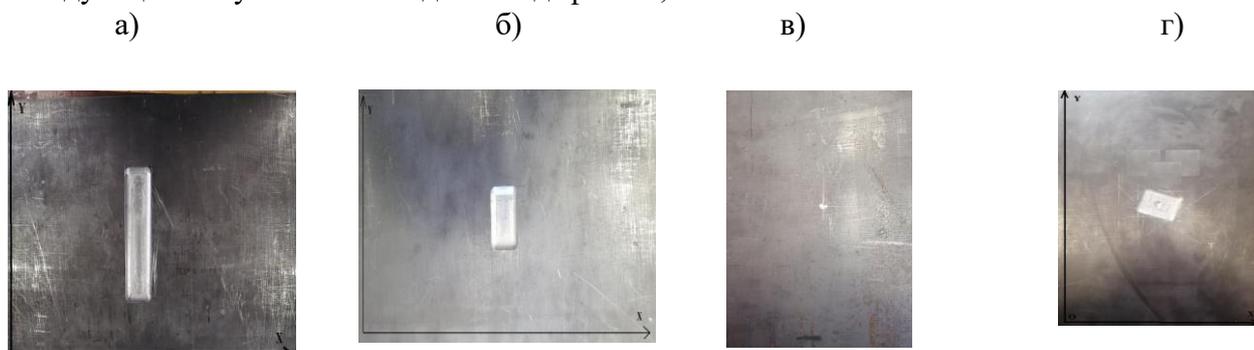


Рис. 4 Искусственные дефекты, созданные в металлических пластинах из стали 20. Размеры пластин 200 x 400 мм, толщина пластины $T=10$ мм. Прямоугольные дефекты имеют сглаженные верхние края. Размеры дефектов описываются следующим образом: [размер вдоль оси OX (мм)] x [размер вдоль оси OY (мм)] x [размер вдоль оси OZ (мм)].

а) дефект с размерами 30 x 100 x 4 мм, б) дефект с размерами 30 x 40 x 5 мм.

в) дефект с размерами 10 x 10 x 2 мм и дефект 10 x 10 x 5 мм,

г) 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

В численных трехмерных экспериментах начальные условия для решения обратной геометрической задачи магнитостатики были получены с помощью решения прямой задачи в

программе ELMER. Кривая намагничивания, использованная в численных экспериментах, была получена на установке REMAGRAPH®. 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 (Рис.1). На этом уровне были получены значения компонент напряженности магнитного поля в точках, равноотстоящих на 1 мм, на площади 200x200 мм. Центр дефекта всегда находился в центре квадрата 200 x 200 мм.

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

Поскольку размеры дефекта с хорошей точностью можно определить по измеренной топографии магнитного поля в воздухе, вблизи поверхности металла (Рис. 5), то рассмотрим точность определения глубины дефектов с помощью предложенной методики.

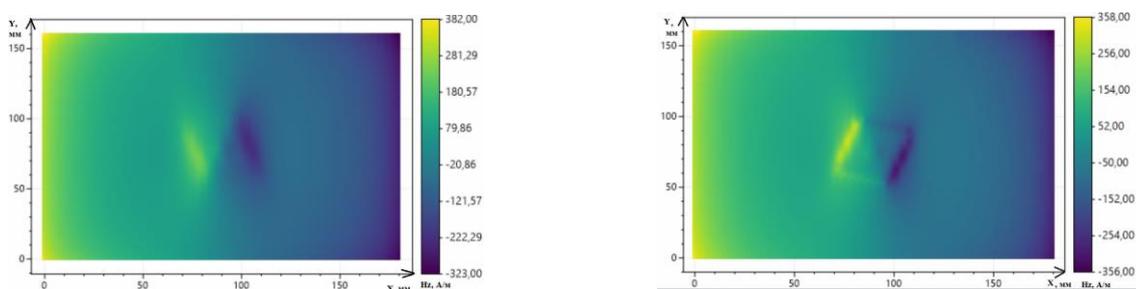


Рис. 5 Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над поверхностью металла. Слева показана цветовая карта для конфигурации 1, справа для конфигурации 2. Дефект расположен под углом к осям OX и OY , большая сторона дефекта 40 мм, меньшая 30мм, площадка основной части дефекта имеет глубину 2 мм, в центре дефекта находится лунка диаметром 7 мм и глубиной 2 мм

На рисунках 6-7 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: $(|Z - Z_{calc}|/Z) * 100$, 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).

Размеры 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 . В натурных и численных экспериментах, прямоугольные дефекты имеют сглаженные верхние края. Для всех дефектов справедливо неравенство $L_y \geq L_x$, то есть рассматриваем только поперечные поверхностные дефекты потери сплошности металла.

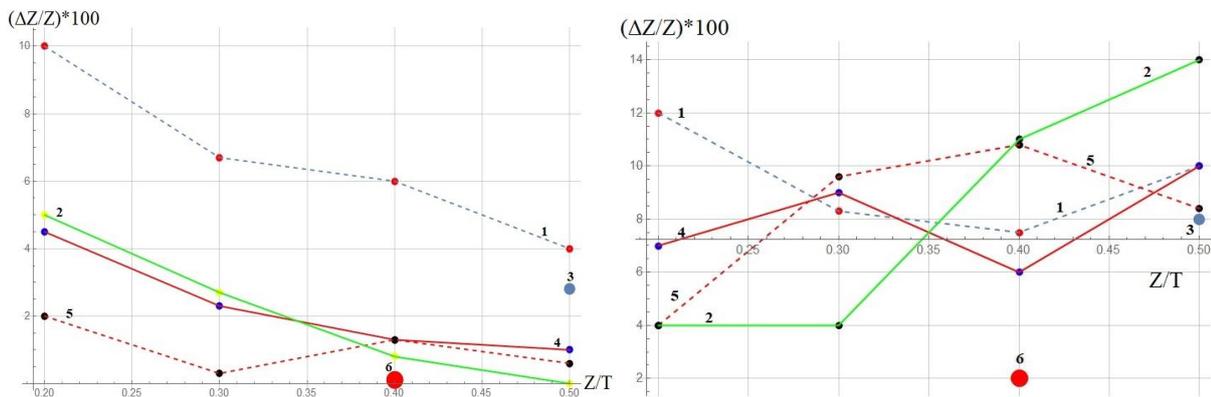


Рис. 6 Ошибка в процентах при определении глубины дефекта в зависимости от глубины дефекта для разных величин раскрытия. а) график для конфигурации 1; б) для конфигурации 2. Пунктирная кривая с номером 1 — соответствует дефекту с раскрытием 3Т-3.5Т; сплошная кривая с номером 2 — дефекту 2Т-3.5Т; точка с номером 3 — соответствует реальному дефекту 3Т-4Т; сплошная кривая с номером 4 — дефекту 3Т-4.5Т; пунктирная линия с номером 5 — дефекту 2Т-4.5Т; точка с номером 6 — соответствует реальному дефекту 3Т-10Т.

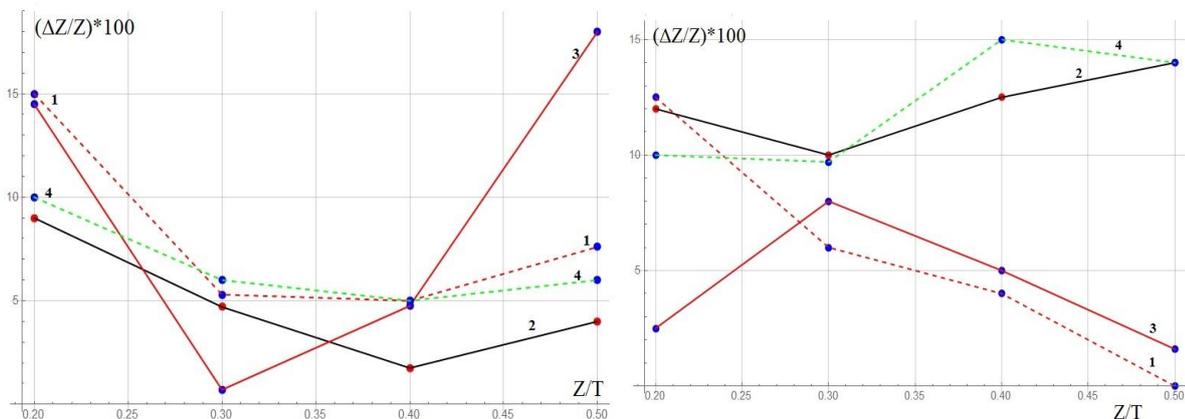


Рис. 7 Ошибка в процентах при определении глубины дефекта. а) график для конфигурации 1; б) для конфигурации 2. Пунктирная линия 1 — дефект 0.5Т-1.5Т; сплошная линия 2 — дефект 1Т-1.5Т; сплошная линия 3 — дефект 0.5Т-2.5Т; пунктирная линия 4 — дефект 1Т-2.5Т.

Итак, в результате проведения 40 натуральных экспериментов и 240 численных экспериментов было показано:

1. между натурными и численными экспериментами имеется хорошее соответствие для разных величин полей намагничивания (от 30 А/м до 10000 А/м);
2. для типичных размеров поверхностных дефектов таких как каверны, раковины, утонение металлической пластины, размеры дефектов превышают 2Т, а в этом случае, с помощью описанной выше методики, геометрические параметры дефектов (топография глубин, размеры) определяются с ошибкой менее 15% от их реальных величин.

Так как характерными дефектами тела бурильной трубы (Рис. 8) являются: износ внутренней поверхности в виде сквозных каверн, раковины на внутренней поверхности, утонение стенок трубы. Методика может быть использована мобильными дефектоскопами для неразрушающего контроля тела бурильной трубы на буровых площадках. При этом отпадает необходимость вывоза труб с буровых площадок для дальнейшего обследования. В настоящее время аналогов таких технологий и устройств в мире не существует.



Рис. 8 Бурильная труба. Область 1 — тело трубы; область 2 — область высадки тела бурильной трубы. L – общая длина бурильной трубы; D – наружный диаметр тела бурильной трубы.

Литература

1. К вопросу корректности прямой и обратной задачи магнитостатики. Часть 2 / В.В. Дякин, О.В. Кудряшова, В.Я. Раевский // Дефектоскопия. — 2018. — V. 10. — P. 15—25.
2. Обратная задача магнитостатики в полях насыщения / В.В. Дякин, О.В. Кудряшова, В.Я. Раевский // Дефектоскопия. — 2019. — V. 10. — P. 35—44.
3. Моделирование обратной геометрической задачи магнитостатики в магнитном контроле / Л.Н. Кротов — Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук — 2004.
4. Методы решения некорректных задач. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин, М.: Наука, 1979.
5. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии / Ю.Л. Гобов, А.В. Никитин, С.Э. Попов // Дефектоскопия. — 2018. — V. 10. — P. 51—57.
6. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии с учетом нелинейных свойств ферромагнетика / Ю.Л. Гобов, А.В. Никитин, С.Э. Попов // Дефектоскопия. — 2018. — V. 12. — P. 31—37.
7. Область применимости методики построения линий магнитной индукции для дефектометрии протяженных объектов / А.В. Никитин, А.В. Михайлов, Л.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия - № 12 — 2023, с. 51-59.