

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРЕЩИН И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЕФЕКТОВ В ПЛАСТИНЕ

© 2024 г. Ю.Л. Гобов^{1,*}

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

Поступила в редакцию 23.02.2024; после доработки 03.04.2024
Принята к публикации 05.04.2024

Представлена модель дефектов внутренней поверхности ферромагнитной пластины, разработанная с точки зрения идентификации стресскоррозионных трещин на фоне дефектов коррозии с широким раскрытием.

Ключевые слова: дефекты ферромагнетика, трещина, коррозия, дефекты потери сплошности металла, поверхностные дефекты, магнитное поле рассеяния дефекта, тангенциальное намагничивание, MFL-метод.

IDENTIFICATION OF CRACKS AND MATHEMATICAL MODEL OF THE MAGNETOSTATIC FIELD OF DEFECTS IN A PLATE

© 2024 Yu.L. Gobov^{1,*}

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

A mathematical model of defects in the inner surface of a ferromagnetic plate is presented. The model compares crack-type defects with wide-opening corrosion defects.

Keywords: ferromagnetic defects, crack, corrosion, metal loss of continuity defects, surface defects, defect scattering magnetic field, tangential magnetization, MFL-method.

DOI: 10.31857/S0130308224040039

ВВЕДЕНИЕ

Для выявления и определения размеров дефектов потери металла получил широкое распространение метод магнитного поля рассеяния (MFL). Этот метод в настоящее время находит все более широкое применение при контроле изогнутых и прямых стальных листов. Характерным примером является реализация метода в виде внутритрубных дефектоскопов для контроля магистральных газопроводов [1, 2].

Основная проблема магнитного метода неразрушающего контроля изделий заключается в определении размеров, формы, ориентации и других геометрических параметров дефекта по пространственному распределению магнитного поля рассеяния, т.е. необходимо решить обратную геометрическую задачу магнитостатики. Такая задача может быть решена, если имеется точное аналитическое решение о магнитном поле, создаваемом дефектом в намагниченном ферромагнетике. Однако такое решение существует только для самых простых форм, например, шар в безграничном пространстве с заданной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$. Поэтому приходится искать приближенные методы решения этой задачи с привлечением различных идеализированных моделей, позволяющих в аналитическом виде записать решение прямой задачи и использовать этот результат для решения обратной геометрической задачи магнитостатики. В настоящее время существует большое количество идеализированных математических моделей, описывающих дефекты потери сплошности в пластине, такие как внутренние дефекты, дефекты «открытой» поверхности и дефекты «внутренней» поверхности [3—7]. Построение таких моделей в первую очередь служит для решения обратных задач идентификации, т.е. для определения параметров дефекта. Аналитические модели для решения прямой задачи справедливы только для конкретной формы дефекта. Переход к другой форме дефекта связан с получением нового решения.

Прогресс вычислительной техники и развитие программных средств обеспечили возможность решать прямую задачу практически для любой формы дефекта и для нелинейной зависимости магнитной проницаемости от магнитного поля. В настоящее время существует значительное количество прикладных программ для решения краевых задач магнитостатики методом конечных элементов (ELCUT, ANSYS, FEMM и др.). Однако эти программы могут использоваться в основном для решения прямой задачи, но при попытке их использования для решения обратной задачи требуется дополнительная априорная информация. В таком случае приближенные аналитические модели могут быть более эффективными. Кроме того, такие идеализированные модели могут служить также и для проектирования технических устройств магнитной дефектоскопии.

Тем не менее некоторые особенности полей рассеяния от трещин, возникающих на магистральных трубопроводах, существующие аналитические модели не объясняют. Из математических моделей, описанных в работах [3—7], следует, что поле от трещин увеличивается при увеличении приложенного поля H_0 независимо от ширины трещины. Но практика внутритрубной диагностики показывает, что мелкие трещины лучше выявляются в слабых полях [11]. В работе [8] с помощью численного моделирования в программе ELCUT 4.2 и с учетом нелинейности кривой намагничивания материала показано, что для трещин с раскрытием 0,1 мм поле от трещины не только не растет, но может и уменьшаться при увеличении приложенного поля. Для объяснения такого эффекта необходимо разработать аналитическую модель для вычисления поля от трещины различной ширины с учетом нелинейной зависимости материального уравнения ферромагнетика $B(H)$.

ОСОБЕННОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРЕЩИН ПРИ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Особенностью внутритрубного контроля магистральных газопроводов является то, что дефекты в основном сосредоточены на наружной стороне трубопроводов, а контроль проводится с внутренней стороны.

В настоящее время во внутритрубной магнитной дефектоскопии достигнут существенный прогресс с точки зрения технической реализации и выявления магнитных аномалий. Однако обратная геометрическая задача по идентификации и определения размеров дефектов решается только для достаточно крупных дефектов — широких и глубоких дефектов. Для неглубоких дефектов отличить трещину с малым раскрытием (стресскоррозионные дефекты) от других типов дефектов не удается.

Анализ статистики аварий на магистральных газопроводах показывает, что после проведения внутритрубной магнитной диагностики число аварий значительно снижается. Тем не менее не все дефекты, выявляемые по полям рассеяния, удается идентифицировать и ранжировать по степени опасности. В настоящее время больше половины аварий вызвано стресскоррозионными дефектами. Этот вид разрушения стенок трубопроводов также называют коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН).

Дефекты КРН существенно отличаются от дефектов, связанных с потерей металла, таких как коррозионные язвы и питтинговая коррозия. Дефекты потери металла характеризуются сравнительно гладкими краями. В то время как дефект КРН представляет собой колонию нераскрывшихся трещин глубиной 5—20 % от толщины стенки трубы [9].

Метод MFL не выявляет достоверно неглубокие (до 15 % толщины стенки трубопровода) стресскоррозионные трещины из-за того, что чувствительные к изменению магнитного поля датчики при внутритрубной диагностике находятся по определению внутри трубы, а стресскоррозионные трещины всегда образуются на внешней поверхности трубопровода.

При этих условиях изменения магнитного поля, регистрируемые датчиками внутритрубного дефектоскопа, носят очень размытый характер. А так как амплитуда магнитного сигнала падает пропорционально квадрату расстояния между датчиком и дном трещины, то магнитный сигнал от внешней трещины глубиной 10—15 % сопоставим по амплитуде с уровнем шума, который регистрируется этими датчиками из-за шероховатости внутренней поверхности трубопровода. При этом величина неровностей на внутренней поверхности новых трубопроводов составляет порядка 0,1 мм и увеличивается до 0,3 мм и более в трубопроводах эксплуатировавшихся несколько лет.

Из-за этого фундаментального недостатка MFL-метод не оправдывает тех надежд, которые еще недавно возлагались на него с точки зрения мониторинга стресскоррозионных повреждений магистральных газопроводов. MFL-метод подходит только для регистрации глубоких трещин (более 20 % толщины стенки трубы) и дефектов уноса металла.

Необходимо отметить, что в настоящее время в технические отчеты по внутритрубной дефектоскопии вносятся лишь дефекты КРН глубиной более 15 % от толщины стенки трубы. Вместе с тем по магнитограммам реальных дефектов КРН, обнаруженных на магистральных газопроводах внутритрубными дефектоскопами MFL, установлено, что они способны обнаруживать трещины КРН с глубиной, значительно меньшей 15 % (5—10 %).

Другой вопрос, что уверенное (с вероятностью не ниже 80 %) выявление и идентификация магнитными методами стресскоррозии глубиной менее 15 % от толщины стенки в настоящее время считается невозможным.

Еще более сложная задача — распознавание трещин и дефектов потери металла в сварных швах и вблизи швов. При глубине трещин менее 15 % (5—10 %) очень важно с высокой вероятностью (с вероятностью не ниже 80 %) идентифицировать трещину, т.е. определить, что это не дефект типа коррозии с плавными краями, а именно трещина.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для мониторинга КРН необходимо с высокой достоверностью не только обнаруживать, но и идентифицировать все трещины (одиночные и в колониях) с глубиной 10 % и даже меньше. Для проектирования подобного внутритрубного магнитного дефектоскопа необходима упрощенная аналитическая модель, объясняющая изменения полей от трещины с изменением приложенного магнитного поля H_0 . Такая модель должна учитывать нелинейность магнитных свойств стенки трубы при изменении намагничивающего поля.

В настоящей работе предложена новая математическая модель на основе упрощенной расчетной схемы магнитной цепи, описывающей обтекание магнитным потоком поверхностного дефекта в пластине. Такая модель позволяет рассмотреть с общих позиций дефекты типа трещин и широкие дефекты (типа коррозионные язвы и питтинговая коррозия, у которых ширина больше или равна глубине). Предложенная модель позволяет рассмотреть различные типы дефектов и определить, в каких случаях поля рассеяния от трещин будут существенно отличаться от других типов дефектов.

Для сравнения с расчетами по предлагаемой упрощенной модели приводятся результаты численного моделирования поля прямоугольной щели и канавки с широким раскрытием, выполненные в программе ELCUT 4.2.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБТЕКАНИЯ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА

На рис. 1 приведен пример обтекания магнитным потоком поверхностных дефектов в ферромагнитной пластине толщиной D . Пластина бесконечная как в ширину, так и в глубину рисунка (рассматриваем только двумерный случай). Магнитное поле величиной H_0 приложено слева направо вдоль пластины. Выделим два типа дефектов: дефекты типа трещины шириной b и глубиной h , причем ($b \ll h$), и дефекты типа общей коррозии, у которых ширина дефекта больше, чем глубина. На рисунке приведены результаты расчетов, выполненные в программе ELCUT 4.2 для случая нелинейных свойств ферромагнетика. Магнитные потоки, обтекающие эти дефекты, качественно отличаются друг от друга. Для дефектов типа коррозии ($b > h$) магнитным потоком, протекающим через область потери сплошности ферромагнетика, можно пренебречь, и практически весь поток будет протекать над дефектом по неповрежденной части ферромагнетика. Для трещин ($b \ll h$) необходимо учитывать, что часть магнитного потока будет протекать сквозь трещину (см. рис. 1). В таком случае можно ожидать, что с увеличением приложенного поля H_0 измеряемое поле рассеяния от дефектов коррозии будет увеличиваться, а от трещин поле рассеяния будет убывать.

Для проверки высказанного предположения рассмотрим модель растекания магнитного потока, вызванного дефектами разного типа (рис. 2).

На этой схеме магнитный поток F_0 , текущий в бездефектной части пластины, разделяется на четыре потока: F_x , F_d и потоки по воздуху F_v . При этом потоками в воздухе F_v можно пренебречь ввиду их малости по сравнению с F_x и F_d .

$F_0 = B_0 \cdot D$ — суммарный магнитный поток при отсутствии дефекта;

$F_x = B_x \cdot (D-h)$ — магнитный поток обтекает дефект по неповрежденной части пластины;

F_d — магнитный поток проходящий по дефекту (по области потери сплошности ферромагнитной пластины);

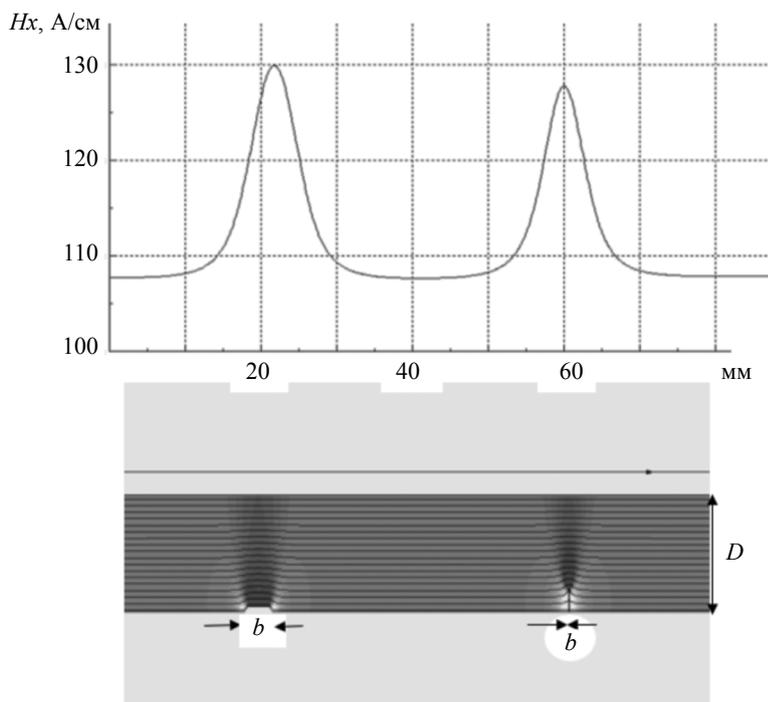


Рис. 1. Обтекание магнитного потока различных типов дефектов, расположенных на «внутренней» поверхности ферромагнитной пластины, и поле, измеренное над противоположной поверхностью. Результаты расчетов, выполненные в программе ELCUT 4.2.

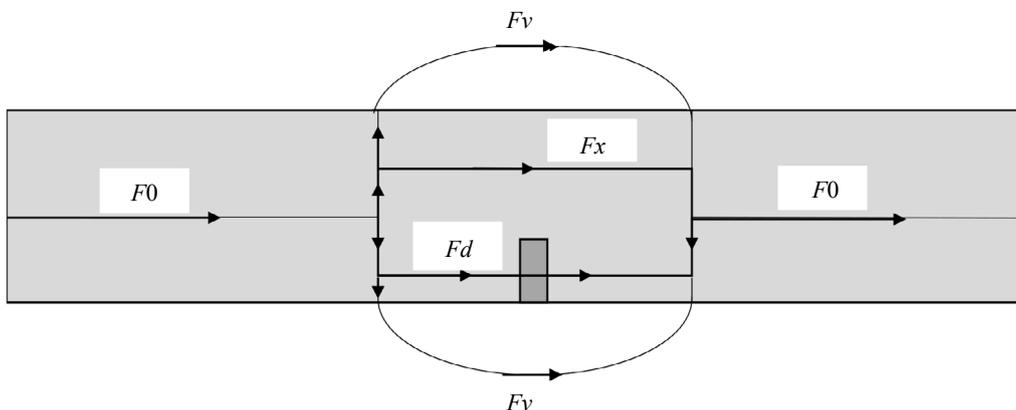


Рис. 2. Растекание магнитного потока вблизи дефекта.

B_0 — индукция в бездефектной области пластины;

B_x — индукция в неповрежденной области пластины над дефектом;

B_d — индукция в металле, в области потери сплошности ферромагнетика.

Вычислим магнитные сопротивления для потоков F_x и F_d и их суммарное сопротивление для потока F_0 . Будем считать, что растекание магнитного потока происходит только на расстоянии, равном толщине пластины в обе стороны от дефекта шириной b , т.е. в области $(b+2D)$ вблизи дефекта. Упрощенная расчетная схема магнитной цепи показана на рис. 3. Используя схему магнитной цепи, можно вычислить величину B_x и если известно материальное уравнение $B(H)$, то определить усредненное поле на поверхности над трещиной. Учитывая, что тангенциальная составляющая на поверхности ферромагнетика непрерывна, тем самым определим поле в воздухе над трещиной.

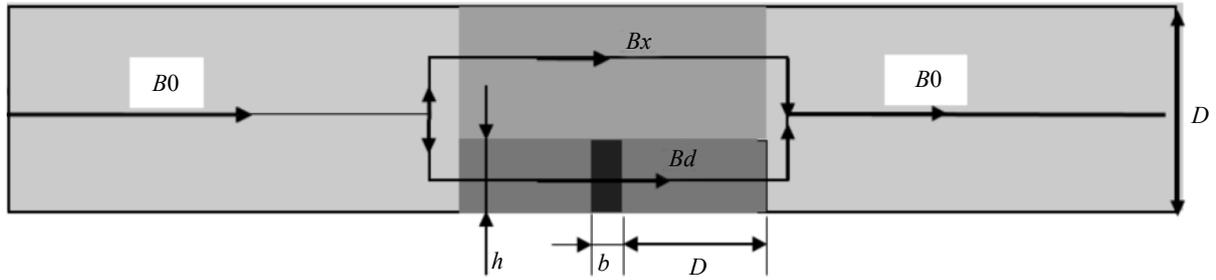


Рис. 3. Расчетная схема магнитной цепи растекания магнитного потока вблизи дефекта.

$$R_x(H) = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu(H)} \cdot \frac{b + D \cdot 2}{D - h}; \quad (1)$$

$$R_d(H) = \frac{b}{\mu_0 \cdot h} + \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu(H)} \cdot \frac{b + D \cdot 2}{h}; \quad (2)$$

$$R_{dx}(H) = \frac{R_x(H) \cdot R_d(H)}{R_x(H) + R_d(H)}, \quad (3)$$

где R_x — магнитное сопротивление в области протекания магнитного потока с индукцией B_x ; R_d — магнитное сопротивление в области протекания магнитного потока через трещину; R_{dx} — суммарное сопротивление при параллельном соединении сопротивлений R_x и R_d .

В выражения (1) и (2) входит зависимость магнитной проницаемости от приложенного поля. Для данной модели растекания магнитного потока будем считать, что магнитная проницаемость ферромагнетика вблизи дефекта равна магнитной проницаемости в области вдали от дефекта. Для определения этой зависимости необходимо знать кривую намагничивания ферромагнитного материала стенки трубы, в которой обнаружен дефект.

Для описания кривой намагничивания ферромагнетика $B_0(H)$ и магнитной проницаемости $\mu(H)$, входящей в выражения (1) и (2), используем формулу Фрелиха [10] (такая формула хорошо описывает кривую намагничивания вблизи технического насыщения):

$$B_0(H) = \mu_0 \cdot J_s \cdot \frac{H}{as + H} + H. \quad (4)$$

Для кривой намагничивания низкоуглеродистой стали используем следующие значения для величин, входящих в (4): $\mu_0 J_s = 2,1$ Тл; $as = 1200$ А/м; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Используя формулу Фрелиха (4) (сплошная кривая на рис. 4), найдем дифференциальную магнитную проницаемость:

$$\mu(H) = \frac{d B_0(H)}{dH} \cdot \frac{1}{\mu_0} = \frac{J_s}{(H + as)} - \frac{H \cdot J_s}{(H + as)^2} + 1. \quad (5)$$

Теперь, используя расчетную схему магнитной цепи (см. рис. 3), можно определить магнитный поток $F_x = B_x \cdot (D - h)$ и магнитную индукцию B_x соответственно:

$$B_x(H) = B_0(H) \cdot \frac{D}{D - h} \cdot \frac{R_d(H)}{R_d(H) + R_x(H)}. \quad (6)$$

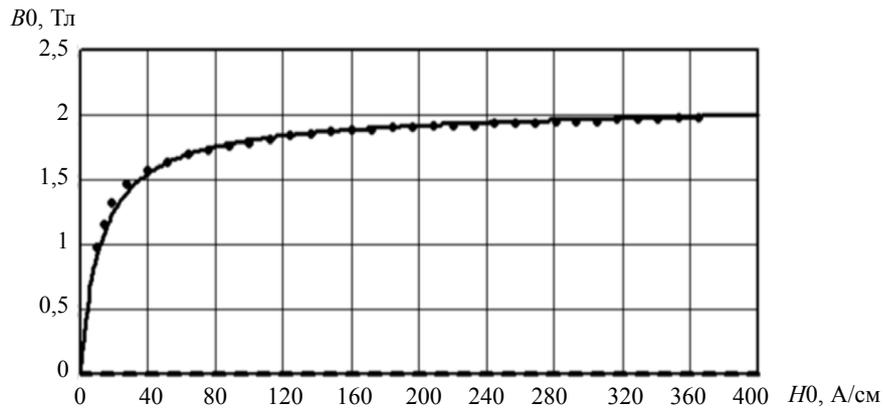


Рис. 4. Кривая намагничивания стали Ст20 и ее аппроксимация по выражению (4).

Магнитное поле, создаваемое дефектом, можно вычислить двумя способами. Первый способ: зная индукцию в области Bx , и при условии, что тангенциальная составляющая поля на поверхности ферромагнетика непрерывна, находим:

$$\Delta H1 = Hx - H0 = \frac{Bx(H) - B0(H)}{\mu0 \cdot \mu(H)}. \quad (7)$$

Второй способ: зная общее магнитное сопротивление, создаваемое дефектом Rdx , и суммарный магнитный поток $F0 = B0 \cdot D$, который протекает по этому сопротивлению, можно определить падение магнитного потенциала на дефектной области ферромагнитной пластины и затем вычислить магнитное поле, создаваемое дефектом:

$$\Delta H2 = B0(H) \left(\frac{D}{b+D} \cdot \frac{Rx(H) \cdot Rd(H)}{Rx(H) + Rd(H)} \right) - \frac{B0(H)}{\mu0 \cdot \mu(H)}. \quad (8)$$

Выражение (7) определяет среднее поле, создаваемое дефектом на расстоянии $(b + 2D)$ на неповрежденной поверхности пластины. Выражение (8) также определяет поле на этой поверхности, но из него следует, что это среднее поле в области $(b + 2D)$ будет средним полем и с другой стороны пластины.

Поле $\Delta H1$ — это усредненное поле в области $(b + 2D)$. Максимальное поле, создаваемое дефектом ΔHm , будет больше в зависимости от ширины дефекта, а для широких дефектов коэффициент увеличения будет стремиться к единице.

Таким образом, максимальное поле, создаваемое дефектом, можно определить так:

$$\Delta Hm = \frac{Bx(H) - B0(H)}{\mu0 \cdot \mu(H)} \times \alpha(b). \quad (9)$$

Так как среднее поле в области $(b + 2D)$ меньше ΔHm , результат надо умножить на коэффициент $\alpha(b)$. Для трещин $\alpha(b) \approx 4$. С увеличением ширины дефекта коэффициент уменьшается до $\alpha(b) \approx 1$, как показано на рис. 5 (зависимость $\alpha(b)$ получена в результате численного моделирования намагничивания дефектов в пластине с различной величиной b).

Используя выражение (9) и коэффициент $\alpha(b)$ (см. рис. 5), можно вычислить поле $\Delta Hm(H0)$, создаваемое дефектами различной глубины h и раскрытия b .

На рис. 5 и 6 приведены результаты, использующие выражения (7)–(9). Оба способа полностью совпадают, как это и следует из расчетной схемы магнитной цепи растекания магнитного потока вблизи дефекта (см. рис. 3).

На рис. 6 показаны кривые изменения поля дефекта $\Delta Hm(H0)$ при изменении намагничивающего поля для дефектов с различным раскрытием при глубине дефекта $h = 1$ мм (толщина пластины $D = 10$ мм). Расчеты выполнены по выражению (7).

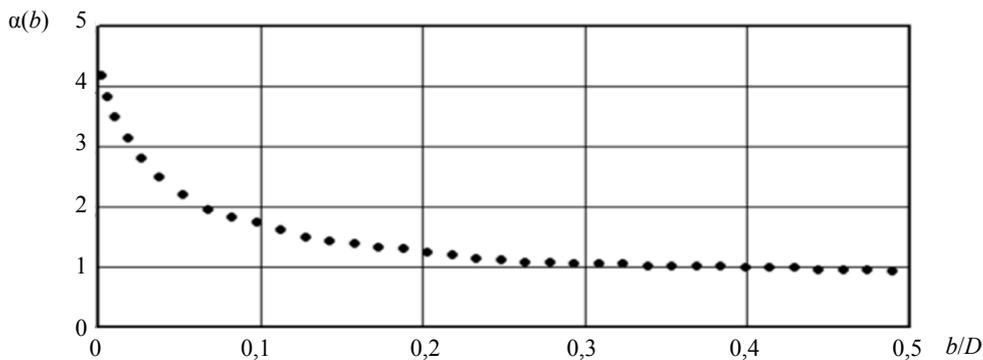


Рис. 5. Коэффициент пересчета с усредненного поля $\Delta H1(H0)$ в максимальное поле, создаваемое дефектом $\Delta Hm(H0)$.

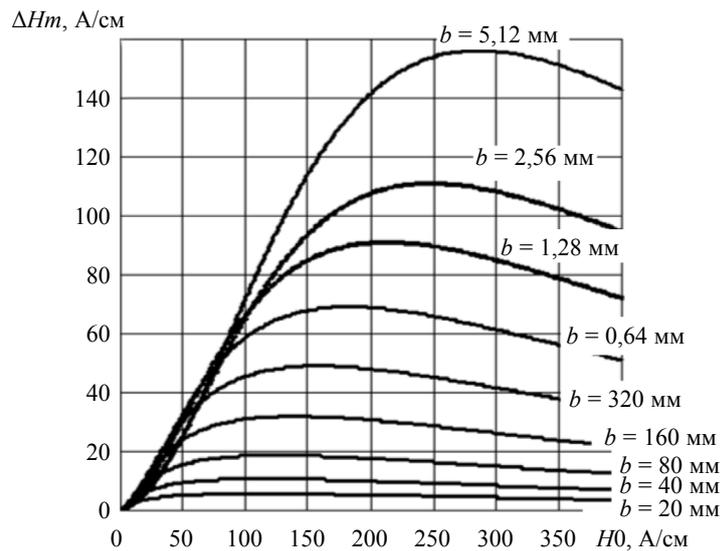


Рис. 6. Изменение поля, создаваемого дефектом $\Delta Hm(H0)$ с различным раскрытием b . Толщина ферромагнитной пластины $D = 10$ мм. Глубина дефекта $h = 1$ мм.

Из анализа приведенных результатов на рис. 6 можно сделать следующие выводы. Поля от трещин с раскрытием, много меньше глубины, уменьшаются с увеличением приложенного поля в области технического насыщения. Поля от дефектов с раскрытием, больше глубины дефекта, увеличиваются с увеличением приложенного поля и начинают уменьшаться только в больших полях $H0 \approx 250$ А/см и больше.

На рис. 7 показан результат расчета по выражению (9) для трещины глубиной 1 мм и раскрытием 40 мкм при изменении приложенного поля. На этом же рисунке приведен аналогичный график для дефекта глубиной 0,2 мм и раскрытием 1 мм (сплошные кривые).

Для сравнения на этих же графиках показаны результаты численного моделирования этих же дефектов для нелинейного случая с кривой намагничивания по формуле (4), выполненные в программе ELCUT 4.2.

При измерении в приложенном поле (например, в поле $H0 = 100$ А/см) невозможно определить, что это — опасная трещина или небольшая неопасная коррозионная канавка. Но при измерении в двух полях (например, в поле $H0 = 100$ А/см и $H0 = 200$ А/см) легко отличить трещину от коррозии даже на фоне значительных шумов. Действительно, с увеличением приложенного поля $H0$ поле рассеяния от трещины уменьшается, а поле рассеяния от коррозионной канавки увеличивается более чем в 2 раза.

На рис. 8 приведены результаты численного моделирования в полях $H0 = 100$ А/см и $H0 = 200$ А/см для трещины на фоне помех от широких дефектов, расположенных как с внутренней, так и с наружной стороны пластины.

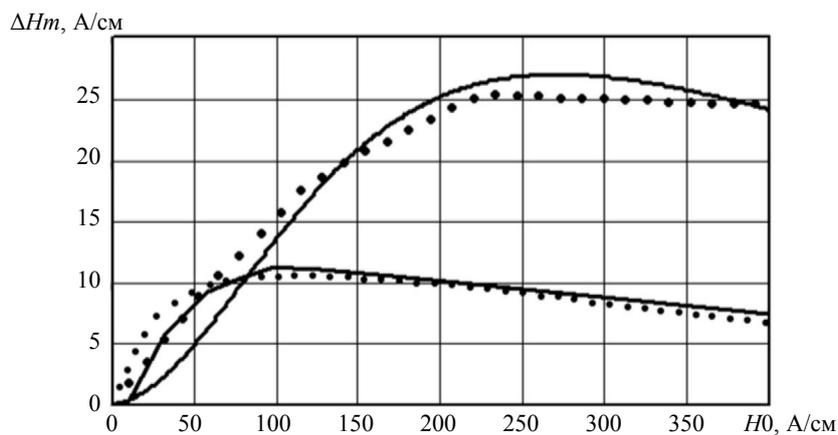


Рис. 7. Поле рассеяния $\Delta H_m(H_0)$ в пластине ($D = 10$ мм), создаваемое трещиной ($h = 1$ мм, $b = 40$ мкм) и канавкой ($h = 0,2$ мм, $b = 1$ мм). Сравнение результатов расчетов по выражению (9) (сплошные линии) и численное моделирование в программе ELCUT 4.2.

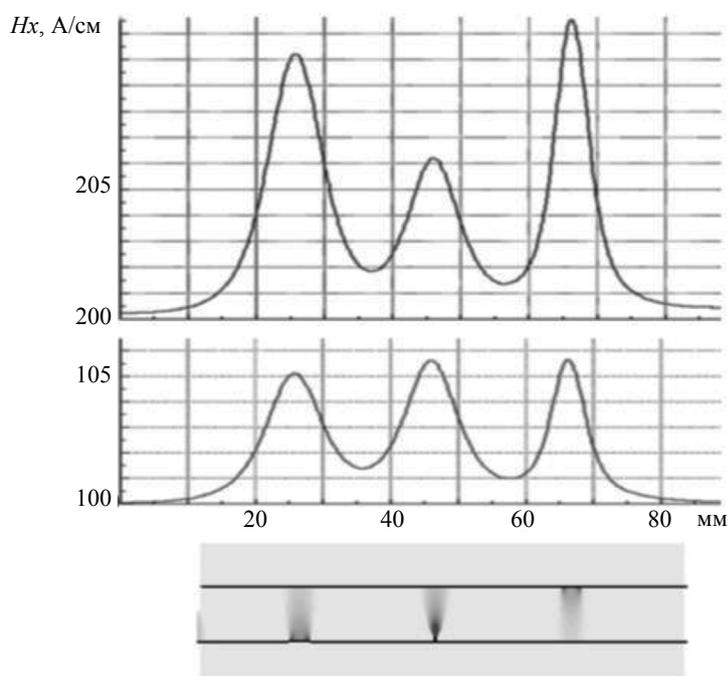


Рис. 8. Поле рассеяния $\Delta H_m(H_0)$ в пластине ($D = 10$ мм), создаваемое трещиной ($h = 1$ мм, $b = 50$ мкм) и канавками шириной 3 мм ($h = 0,25$ мм с «внутренней» поверхности и $h = 0,2$ мм с «открытой» поверхности). Результаты расчетов, выполненные в программе ELCUT 4.2.

Из рис. 8 видно, что поля рассеяния от широких дефектов (дефекты типа общей коррозии) увеличились примерно в два раза при увеличении поля H_0 от 100 до 200 А/см. А поле от трещины не изменилось. В таком случае трещину легко идентифицировать на фоне помех от мелких дефектов типа коррозии, даже если эти дефекты расположены с «открытой» поверхности, т.е. со стороны измерения магнитного поля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НА РЕАЛЬНОМ ДЕФЕКТЕ, ИМИТИРУЮЩЕМ ТРЕЩИНУ

Для проверки полученных результатов были проведены измерения на образцах, имитирующих

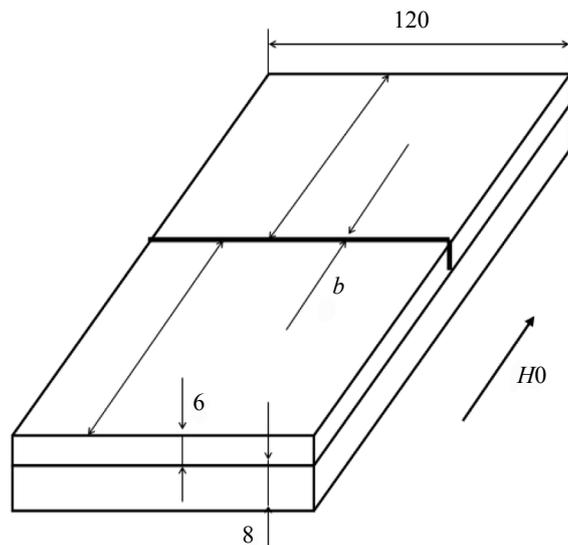


Рис. 9. Имитация трещины с варьируемым раскрытием (b) тремя стальными пластинами (измерение поля рассеяния производилось под нижней поверхностью образца).

трещину с различным раскрытием. Были изготовлены две пластины размером $120 \times 120 \times 6$ мм и одна пластина размером $240 \times 120 \times 8$ мм. С помощью этих пластин имитировалась трещина с различным раскрытием в зависимости от расстояния между малыми пластинами, как показано на рис. 9. Образец намагничивался в электромагните полем от $H_0 = 6000$ до 50000 А/м, а на расстоянии 4 мм от поверхности большой пластины измерялась топография тангенциальной составляющей полей рассеяния $H_x(L)$.

Для случая, когда трещина создавалась прокладкой толщиной $b = 100$ мкм, при поле $H_0 = 10\,000$ А/м — поле от трещины было $\Delta H_m = 5400$ А/м, при поле $H_0 = 22000$ А/м — поле от трещины было $\Delta H_m = 6000$ А/м и при поле $H_0 = 40800$ А/м — поле от трещины было $\Delta H_m = 5900$ А/м.

Такие результаты подтверждают, что поле от трещины с раскрытием от 100 мкм и менее в полях от $H_0 = 10000$ до $H_0 = 40000$ А/м практически остается постоянным или начинает уменьшаться.

ВЫВОДЫ

Предложена новая математическая модель для определения полей рассеяния от поверхностных дефектов «внутренней» поверхности на основе расчета эквивалентной схемы растекания магнитных потоков по дефекту потери сплошности и по неповрежденной части ферромагнетика. Математическая модель позволяет рассматривать и дефекты типа трещин, и дефекты коррозии типа язвы, каверны, канавки как в линейном случае, так и при изменении дифференциальной магнитной проницаемости при нелинейной зависимости $B(H)$.

На основе анализа рассмотренной модели предлагается метод идентификации трещин малой глубины (менее 15 %) по результатам измерения в двух приложенных полях. Такой метод позволит определять наличие трещин на фоне шумов, создаваемых мелкой коррозией, в том числе небольшими дефектами общей коррозии, даже если эти дефекты расположены на «открытой» поверхности трубопровода, а измерение производится с этой же стороны, а трещины расположены с противоположной «внутренней» поверхности пластины.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канайкин В.А. Внутритрубная магнитная дефектоскопия магистральных трубопроводов / Под ред. А.Ф. Матвиенко. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 307 с.
2. Внутритрубная диагностика с помощью магнитных дефектоскопов MFL/CDP и (или) TFI/AFD, в том числе HIGH RESOLUTION, НТЦ «НефтеГазДиагностика», 2013. https://ntngd.com/uslugi/article_post/vnutritrubnaya-diagnostika-spomoshchyu-magnitnykh-defektoskopov-vysokogo-razresheniya

3. *Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е.* К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—65.
4. *Загидулин Р.В., Мужичицкий В.Ф.* Трехмерная модель дефекта сплошности конечной протяженности в ферромагнитной пластине // Дефектоскопия. 2002. № 11. С. 17—25.
5. *Мужичицкий В.Ф., Щербинин В.Е.* Магнитное поле короткого дефекта типа прямоугольной щели // Дефектоскопия. 2006. № 2. С. 58—63.
6. *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).
7. *Мужичицкий В.Ф.* К расчету магнитостатических полей рассеяния от поверхностных дефектов конечной глубины // Дефектоскопия. 1987. № 7. С. 8—13.
8. *Реутов Ю.Я., Лоскутов В.Е.* Топография поля щели при нелинейном намагничивании // Дефектоскопия. 2004. № 10. С. 70—78.
9. *Аскарлов Р.М., Усманов Р.Р., Чучкалов М.В., Аскарлов Г.Р.* Особенности коррозионного растрескивания под напряжением на современном этапе эксплуатации магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 2017. № 10. С. 40—45.
10. *Матюк В.Ф., Осипов А.А.* Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. I. Анализ моделей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 2. С. 3—35.
11. Особенности выявления дефектов КРН различными средствами диагностирования и методами неразрушающего контроля. ООО «Газпром ВНИИГАЗ». https://vniigaz.gazprom.ru/d/textpage/01/513/08_zotov-%28lazarev%29-osobennosti-vyyavleniya-krn-vtd-nk-versiya-2.pdf

REFERENCES

1. *Kanaykin V.A.* In-pipe magnetic flaw detection of main pipelines / Ed. A.F. Matvienko. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 307 p.
2. In-line diagnostics using magnetic flaw detectors MFL/CDP and (or) TFI/AFD, including HIGH RESOLUTION, STC «NefteGazDiagnostics», 2013. https://ntcngd.com/uslugi/article_post/vnutritrubnaya-diagnostika-spomoshchyu-magnitnykh-defektoskopov-vysokogo-razresheniya
3. *Zatsepin N.N., Shcherbinin V.E.* Towards the calculation of the magnetostatic field of surface defects // Defectoscopya. 1966. No. 5. P. 50—65.
4. *Zagidulin R.V., Muzhitsky V.F.* Three-dimensional model of a continuity defect of finite extent in a ferromagnetic plate // Defectoscopya. 2002. No. 11. P. 17—25.
5. *Muzhitsky V.F., Shcherbinin V.E.* Magnetic field of a short defect such as a rectangular slot // Defectoscopya. 2006. No. 2. P. 58—63.
6. *Kushner A.V., Novikov V.A.* Analysis of defect models in theoretical studies of magnetic stray fields arising during magnetization of ferromagnetic objects // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2014. No. 1 (42).
7. *Muzhitsky V.F.* Towards the calculation of magnetostatic stray fields from surface defects of finite depth // Defectoscopya. 1987. No. 7. P. 8—13.
8. *Reutov Yu.Ya., Loskutov V.E.* Topography of the slot field under nonlinear magnetization // Defectoscopya. 2004. No. 10. P. 70—78.
9. *Askarov R.M., Usmanov R.R., Chuchkalov M.V., Askarov G.R.* Features of stress corrosion cracking at the present stage of operation of main gas pipelines // Gas industry. 2017. No. 10. P. 40—45.
10. *Matyuk V.F., Osipov A.A.* Mathematical models of the magnetization curve and magnetic hysteresis loops. Part I. Analysis of models // Non-destructive testing and diagnostics. 2011. No. 2. P. 3—35.
11. Features of identifying SCC defects using various diagnostic tools and non-destructive testing methods. Gazprom VNIIGAZ LLC. https://vniigaz.gazprom.ru/d/textpage/01/513/08_zotov-%28lazarev%29-osobennosti-vyyavleniya-krn-vtd-nk-versiya-2.pdf