

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПРИ НОРМАЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАЮЩЕМ ПОЛЕ

© 2021 г. Ю.Л. Гобов^{1,*}, С.Э. Попов^{1,**}

*¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail: *go@imp.uran.ru 1; **sergeypopov@inbox.ru 2*

Поступила в редакцию 24.11.2020; после доработки 27.01.2021
Принято к публикации 05.02.2021

Рассмотрена методика восстановления топографии дефектов ферромагнетиков при нормальном намагничивающем поле. Показано, что при таком намагничивании поверхность магнитомягкого ферромагнетика является эквипотенциальной поверхностью. Предложено приближение, позволяющее по результатам измерения трех компонент магнитного поля на небольшом удалении от дефекта получить его топографию. Точность восстановления оценена по результатам расчета поля от дефекта методом конечных элементов и восстановления топографии дефекта по предложенному приближению.

Ключевые слова: магнитный дефектоскоп, поверхностные дефекты, метод восстановления топографии дефекта.

DOI: 10.31857/S0130308221040047

ВВЕДЕНИЕ

Стальные изделия, такие как трубопроводы, резервуары и прочее, в процессе эксплуатации подвергаются воздействию внешней среды, в результате чего на поверхности образуются дефекты потери металла, снижающие прочность изделий. Процессы коррозии протекают с наружной или внутренней поверхности изделий, редко проникая внутрь изделия. Поэтому выявление и определение размеров именно дефектов поверхности металлических изделий в процессе их эксплуатации является необходимым мероприятием поддержания объектов в безопасном состоянии.

Особенностью проведения мероприятий по неразрушающему контролю конструкций типа трубопровод или резервуар является отсутствие одновременного доступа к обеим поверхностям стального листа, из которого изготовлены конструкции. Кроме того, изделие зачастую покрыто защитной изоляцией различной толщины и/или заглублено в почву или на дне водоема. Очистка поверхности от защитных покрытий зачастую нежелательна и невозможна из-за опасности ухудшить свойства покрытия при его восстановлении.

Для выявления и определения размеров дефектов потери металла получил широкое распространение метод магнитного рассеяния потока (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 и наружных дефектоскопов-сканеров.

Для намагничивания исследуемого объекта в большинстве случаев используется тангенциальное намагничивающее поле. Для эффективной работы устройств, использующих тангенциальное намагничивание, исследуемый объект должен быть намагничен до насыщения.

Достоинствами метода MFL при тангенциальном намагничивании является чувствительность одновременно к дефектам, расположенным на обеих поверхностях стального листа. С другой стороны, при тангенциальном намагничивании невозможно по полям рассеяния определить на какой поверхности находится аномалия. Но, если известно на какой стороне находится дефект типа коррозии (канавка, язва, лунка с плавными краями), то восстановление формы дефекта возможно как решение обратной геометрической задачи магнитостатики.

Основная проблема магнитного метода неразрушающего контроля изделий заключается в определении размеров, формы, ориентации и других геометрических параметров дефекта по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. Физические основы магнитного контроля базируются в основном на решении прямой задачи магнитостатики. Для выбранного типа дефекта строится приближенная математическая модель и решается прямая задача магнитостатики в рамках рассматриваемых приближений. При этом приближенное аналитическое выражение для поля рассеяния в явном виде содержит геометрические параметры дефекта, заложенные в модели, и их можно попытаться определить по измеренным значениям поля рассеяния. При таком

подходе возможно лишь качественное определение параметров дефектов и в основном в двумерном случае и при линейной зависимости $B(H)$ [1—8].

Другой подход к решению задачи восстановления геометрических параметров дефектов предложен в наших предыдущих работах [9, 10]. В предлагаемом подходе (методе) не требуется приближенного решения прямой задачи. По измеренной топографии магнитных полей рассеяния над бездефектной поверхностью восстанавливаются силовые линии магнитной индукции в магнитомягком материале вблизи поверхности с дефектами. Так, на рис. 1 показано, что по силовым линиям возможно восстановление формы дефекта с высокой точностью.

В таком случае по топографии полей измеренных над бездефектной поверхностью возможно восстановить силовые линии в магнитомягком материале и тем самым вычислить форму дефекта на противоположной закрытой поверхности (здесь и далее «открытой поверхностью» будем называть поверхность, над которой производится измерение полей рассеяния, а «закрытой поверхностью» будем называть поверхность закрытую и экранируемую от датчиков слоем магнитного материала) [9, 10].

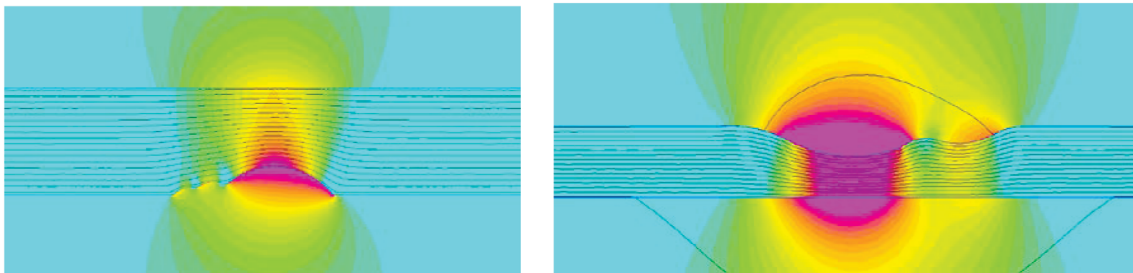


Рис. 1. Результат расчета намагничивания дефекта в пластине в тангенциальном поле. Показано, как силовые линии «огинают поверхность» дефекта.

Применение нового метода восстановления формы дефекта по силовым линиям возможно только, если измерение полей рассеяния проводится над бездефектной поверхностью или форма дефекта на этой поверхности известна с высокой точностью.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка метода, дополняющего метод MFL в тангенциальном поле, который позволит определить, на какой поверхности располагаются дефекты и определять топографию дефектов, если они расположены на открытой поверхности магнитомягкой пластины.

Определить, с какой стороны пластины расположен дефект, возможно, если провести исследование полей рассеяния при нормальном намагничивающем поле. Использование нормального намагничивания для определения дефектной стороны пластины или стенки трубы предложено в патентах [11, 12].

Кроме того, в работах [1—4] описано приближенное решение прямой задачи некоторых видов поверхностных дефектов при нормальном намагничивании, но не решается обратная задача восстановления формы трехмерных дефектов по полям рассеяния.

В настоящей работе предложен способ восстановления топографии поверхностных дефектов при нормальном намагничивающем поле. Физическая сущность способа заключается в том, чтобы при сканировании дефектной поверхности снимать топографию магнитных полей рассеяния и по этой топографии определять эквипотенциальные поверхности вблизи границы исследуемого объекта.

При нормальном намагничивающем поле поверхность исследуемого материала не намагничивается до насыщения, и материал остается магнитомягким с магнитной проницаемостью $\mu \sim 1000$.

Известно для диэлектриков, что при ϵ , стремящейся к бесконечности [13, с. 16, 17, 21, 22], его поверхность становится эквипотенциальной. В отсутствии переменных магнитных полей выводы, сделанные для электростатики, полностью применимы для магнитостатики. В условиях, когда металлическая пластина с дефектом находится в намагничивающем поле, величиной менее 0.2 Т, $\mu \sim 1000$, что является основанием для предположения об эквипотенциальной поверхности исследуемой пластины с дефектом. Для проверки того, что данное приближение можно использовать, нами был применено МКЭ-моделирование

Таким образом, исследуемая поверхность становится эквипотенциальной поверхностью, и силовые линии магнитного поля входят перпендикулярно этой поверхности.

Для определения геометрии дефектной поверхности необходимо восстановить топографию магнитного поля в сторону ферромагнитного объекта и построить эквипотенциальную поверхность с краевыми условиями на бездефектной области.

Стоит отметить, что обратная задача восстановления поля рассеяния в сторону источников этого поля является «условно некорректной» по Тихонову и решается с тем меньшей точностью, чем глубже надо восстанавливать поле [14, 15]. При нормальном намагничивании поля рассеяния измеряются в непосредственной близости от дефектной поверхности, поэтому восстанавливать поле необходимо буквально на несколько миллиметров, что дает достаточно высокую точность при решении обратной задачи.

ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОГНУТОГО И ПРЯМОГО СТАЛЬНОГО ЛИСТА

Как уже упоминалось выше, для восстановления топографии дефектов необходимо создать такое нормальное намагничивающее поле, чтобы поверхность магнитомягкого материала можно было с высокой точностью считать эквипотенциальной поверхностью. Таким образом, для восстановления топографии поверхностных дефектов со стороны контроля необходимо сначала восстановить эквипотенциальную поверхность в воздухе в непосредственной близости от дефекта по измеренному магнитному полю при нормальном намагничивании, т.е. определить геометрию поверхностного дефекта.

При восстановлении топографии поверхностного дефекта важно, чтобы дефекты противоположной поверхности не влияли на измерение топографии полей рассеяния, позволяя, таким образом, добиться однозначности при идентификации магнитных аномалий.

На рис. 2 показан пример распределения магнитного поля рассеяния от дефектов при намагничивании пластины однородным полем по нормали к поверхности. Магнитные поля рассеяния создают только дефекты с «открытой поверхностью». Дефект с «закрытой поверхности» не создает полей рассеяния, так как магнитомягкий материал пластины экранирует дефект от приложенного нормального поля и экранирует датчики от незначительного поля рассеяния от дефекта, если незначительная часть приложенного нормального поля все же проникает в область дефекта. Таким образом, на восстановление дефектов «открытой поверхности» не влияет наличие дефектов «закрытой поверхности».

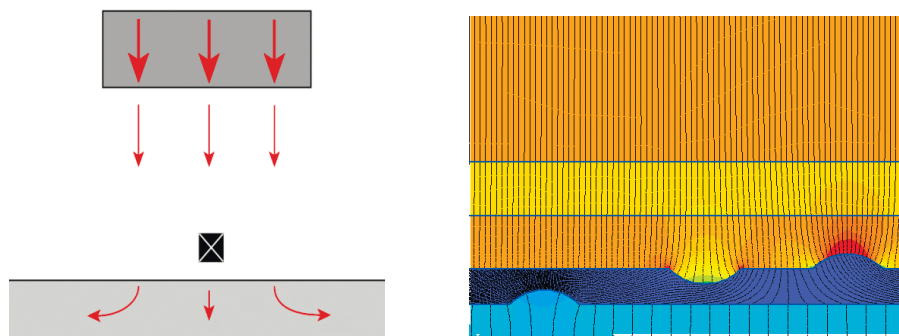


Рис. 2. Распределение поля и силовых линий от дефектов при нормальном намагничивании.

При осуществлении контроля датчики, записывающие показания поля, не могут двигаться непосредственно вдоль поверхности пластины, а двигаются на некотором удалении. Причем траектория движения датчиков отличается от профиля поверхности дефекта. Более того, можно утверждать, что датчики при осуществлении контроля движутся на плоскости на постоянном удалении от плоскости магнитомягкого материала. Таким образом, обратная геометрическая задача по восстановлению поверхностных дефектов в магнитомягком материале сводится к задаче восстановления магнитного потенциала или магнитного поля в сторону источников (в нашем случае источниками являются дефекты в пластине) по измеренным полям рассеяния от этих дефектов и построения эквипотенциальных поверхностей.

Приближенно, потенциал на поверхности дефекта можно записать в следующем виде:

$$\varphi(x, y, z) = \varphi(x, y, z_0) - H_z(x, y, z_0)(z(x, y) - z_0(x, y)) - \frac{1}{2} H_{zz}(x, y, z_0)(z(x, y) - z_0(x, y))^2, \quad (1)$$

где $z_0(x, y)$ задает поверхность контроля, а $z(x, y)$ — поверхность дефекта; $H_z(x, y, z_0)$ — нормальная составляющая поля на поверхности контроля, а $H_{zz}(x, y, z_0)$ — производная нормальной составляющей поля вдоль оси Z (нормаль к поверхности).

В данном выражении сделано предположение, что нормальная составляющая поля линейно меняется при движении от зоны контроля к поверхности дефекта.

Как уже отмечалось выше, поверхность дефекта является эквипотенциальной поверхностью, следовательно, для нахождения $z(x, y)$ полагаем $\varphi(x, y, z) = 0$ и решаем квадратное уравнение относительно $z(x, y)$.

При проведении контроля прямое измерение потенциала невозможно, а измерение нормальной производной затруднительно. С другой стороны, возможно измерение трех компонент поля. В этом случае:

$$\varphi(x, y, z_0) = C + \int_0^x H_x(x, y, z_0) dx; \quad (2)$$

$$H_{zz}(x, y, z_0) = -H_{xx}(x, y, z_0) - H_{yy}(x, y, z_0). \quad (3)$$

Константа C выбирается таким образом, чтобы потенциал на бездефектном месте был равен $\varphi(x, y, z_0) = H_z(x, y, z_0)\Delta z$, где Δz — расстояние от зоны контроля до поверхности контролируемой пластины в бездефектном месте. Считается, что эта величина известна и постоянна в бездефектном месте. При использовании экспериментальных данных выражения (2), (3) можно записать в конечных разностях:

$$\varphi(x_i, y_i, z_0) \approx C + \varphi(x_{i-1}, y_{i-1}, z_0) + H_x(x_i, y_i, z_0)(x_i - x_{i-1}); \quad (4)$$

$$H_{zz}(x_i, y_i, z_0) \approx -(H_x(x_i, y_i, z_0) - H_x(x_{i-1}, y_i, z_0)) / (x_i - x_{i-1}) - (H_y(x_i, y_i, z_0) - H_y(x_i, y_{i-1}, z_0)) / (y_i - y_{i-1}). \quad (5)$$

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИИ ДЕФЕКТА ПО ДАННЫМ РАСЧЕТА

Для иллюстрации метода, его точности и возможностей было проведено моделирование поля методом конечных элементов в программе Elmer FEM. Для моделирования были выбраны два дефекта в виде выфрезеровки и наплавки длиной 20 мм, шириной 60 мм и глубиной 6 мм. Эскиз дефектов приведен на рис. 3.

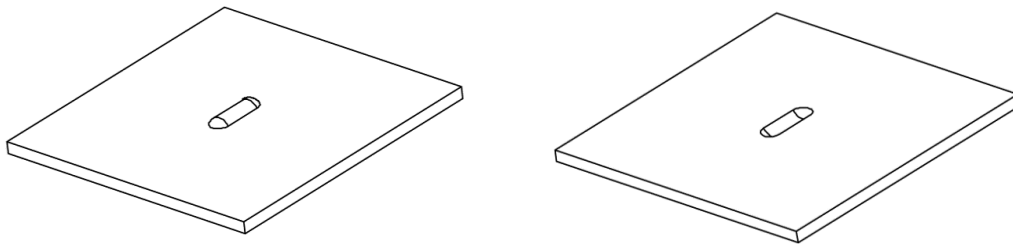


Рис. 3. Форма дефектов, выбранных для расчета методом конечных элементов. Левый рисунок — модель наплавки, правый — выфрезеровка.

На рис. 4 приведены результаты расчета полей методом конечных элементов для наплавки на расстоянии 9 мм от поверхности пластины или 3 мм от поверхности дефекта, а для выфрезеровки — на расстоянии 3 мм от поверхности пластины или 9 мм от самой глубокой точки дефекта.

Применяя последовательно выражения (1)—(4), были восстановлены топографии дефектов, продольные и поперечные сечения которых приведены на рис. 5

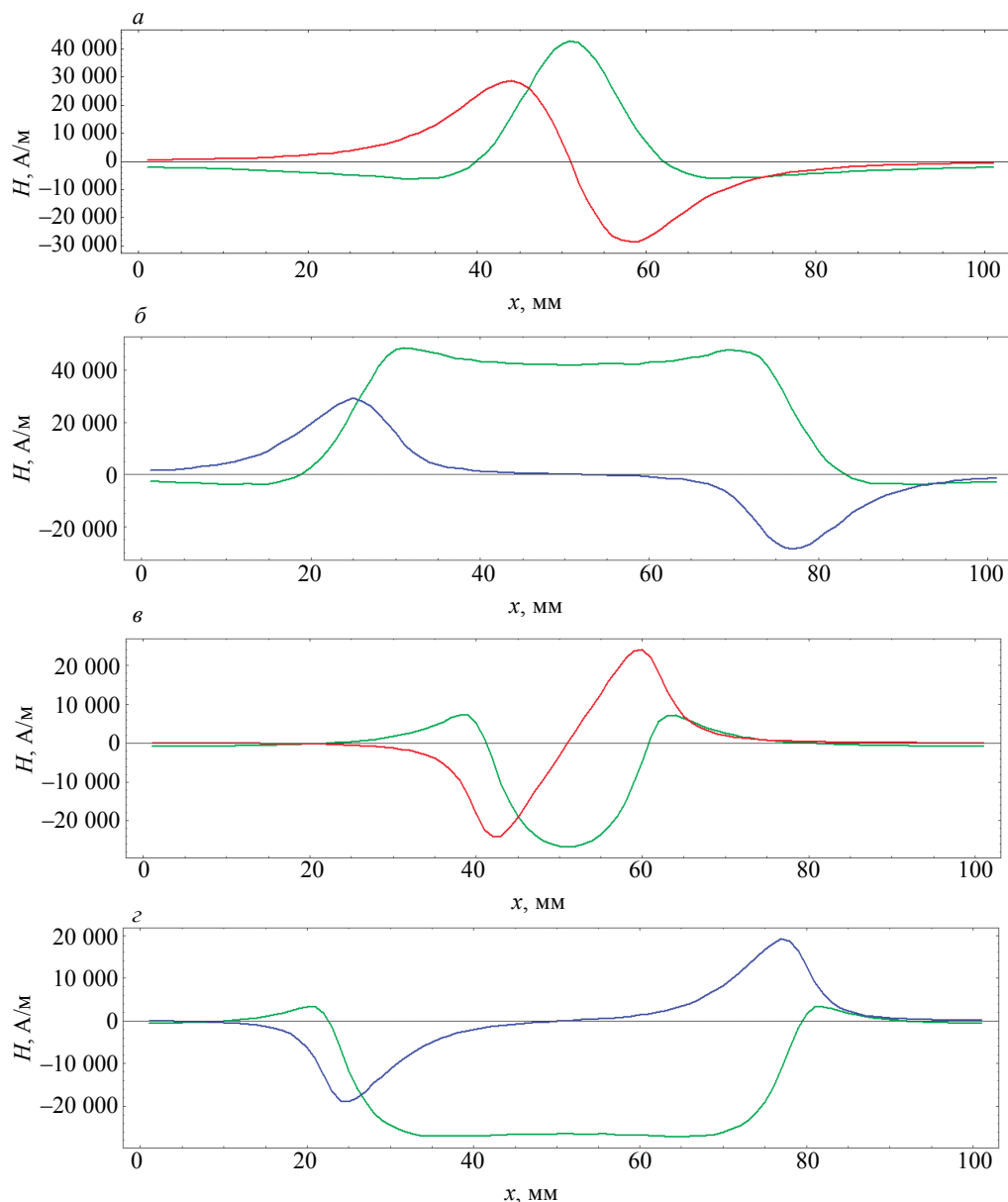


Рис. 4. Рассчитанные методом конечных элементов поля для дефекта типа наплавка (*a*, *b*) и выфрезеровка (*v*, *z*). Графики (*a* и *v*) — сечение вдоль короткой стороны дефекта, (*b* и *z*) — вдоль длинной стороны. Зеленая линия — нормальная компонента поля (для наглядности вычтена постоянная составляющая поля), синяя и красная — тангенциальные компоненты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ТОПОГРАФИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПО МАГНИТНЫМ ПОЛЯМ РАССЕЯНИЯ

Для демонстрации возможностей разработанного метода была создана линейка из 12 датчиков Холла с расстоянием между датчиками 5 мм. Линейка располагалась под широким постоянным магнитом, создающим в области расположения датчиков однородное поле 30000 А/м. Линейка датчиков и постоянный магнит жестко скреплены друг с другом.

На стальную пластину толщиной 8 мм были наклеены буквы из магнитомягкого материала (рис. 6), толщина букв 0,5 мм и был сделан пропил шириной 0,8 мм, глубиной 5 мм и длиной 60 мм.

Линейка датчиков вместе с магнитом сканировалась над буквами из магнитомягкого материала и пропилом. В верхней части рис. 6 приведена фотография исследуемых участков пластины, а в нижней части рисунка показана топография дефектных участков пластины, полученная по алгоритму, описанному в предыдущих параграфах настоящей статьи.

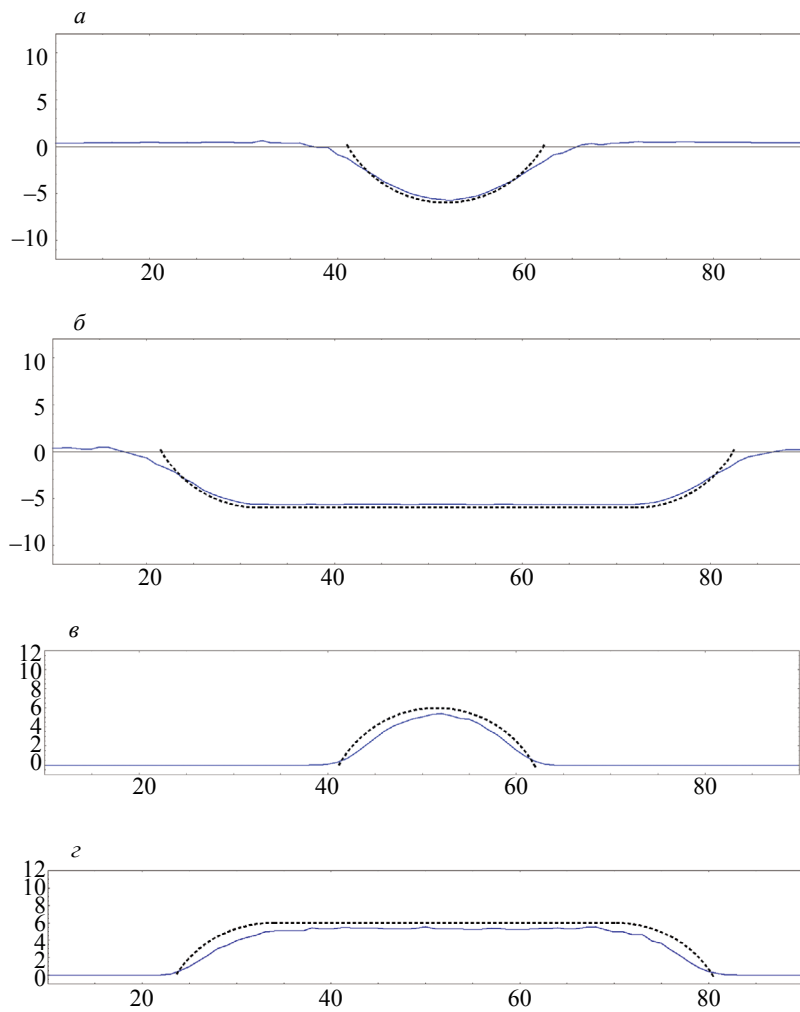


Рис. 5. Сечение восстановленной топографии дефектов:

(*a, б*) — дефект типа наплавка, (*в, з*) — дефект типа вырезеровка. Синяя линия — результат восстановления, пунктирная черная — сечение профиля дефекта, использовавшегося при расчетах методом конечных элементов.



Рис. 6. Фотография ферромагнитной пластины с искусственными неоднородностями и трехмерная реконструкция магнитных неоднородностей по полям рассеяния при нормальном намагничивании пластины.

Восстановленная визуализация утолщения металла является более информативной, чем фотография, поскольку кроме контуров букв была установлена и величина утолщения магнитомягкого металла этих букв. Толщина букв определилась с высокой точностью. Вычисленная толщина букв составляла 4,5 мм (т.е. есть точность около 5 %).

Пропил 0,8 мм уверенно регистрируется, но его раскрытие и глубину определить не удалось. Глубину дефектов типа пропила возможно определить, только если раскрытие больше глубины. А раскрытие без определения глубины возможно, только если сканирование проведено на расстоянии от поверхности пластины меньшем, чем раскрытие.

ВЫВОДЫ

На основе полученных выше теоретических данных и проведенных экспериментов можно сделать ряд выводов:

при нормальном намагничивании изделия из магнитомягкого материала поверхность дефекта является эквипотенциальной поверхностью;

для восстановления эквипотенциальной поверхности, совпадающей с поверхностью дефекта, достаточно измерения нормальной и тангенциальных компонент магнитного поля;

величина магнитного поля дефекта существенно зависит от раскрытия и глубины дефекта, поэтому при нормальном намагничивании оценка глубины и раскрытия дефектов типа трещины может иметь существенные погрешности;

дополнение метода MFL в тангенциальном поле методом MFL в нормальном поле намагничивания позволяет разделить дефекты на дефекты внутренней и наружной поверхности и определить топографию этих поверхностных дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мужижский В.Ф. Модель поверхностного дефекта при нормальном намагничивании и расчет топографии его магнитостатического поля // Дефектоскопия. 1988. № 7. С. 3—7.
2. Гусев А.П., Поляков П.Н. Магнитное поле поверхностного дефекта при намагничивании ферромагнетика неоднородным полем магнитов // Дефектоскопия. 1992. № 11. С. 71—75.
3. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики при малых возмущениях границы // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 36—44.
4. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. III. Метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 45—51.
5. Мужижский В.Ф., Щербинин В.Е. Магнитное поле короткого дефекта типа прямоугольной щели. // Дефектоскопия. 2006. № 2. С. 58—63.
6. Загидулин Р.В., Мужижский В.Ф., Исаев Д.А. Динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании ферромагнитного изделия. I. Магнитостатическое поле дефекта сплошности конечной протяженности // Дефектоскопия. 2006. № 10. С. 17—23.
7. Загидулин Р.В., Мужижский В.Ф., Исаев Д.А. Динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании ферромагнитного изделия. II. Магнитное поле дефекта сплошности при намагничивании изделия намагничивающим устройством конечных размеров // Дефектоскопия. 2006. № 11. С. 17—23.
8. 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. С. 42.
9. Гобов Ю.Л., Никитин А.В., Попов С.Э. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 51—58.
10. 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—38.
11. Патент США 4468619, оп.28.08.1984.
12. Патент RU(11) 2 393 466(13) С2, оп. 27.07.2008.
13. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 733 с.
14. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
15. Самарский А.А., Вабичевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: ЛКИ, 2009. 480 с.