

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДАТЧИК С МИНИАТЮРНЫМИ МАГНЕТОМЕТРАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ ПРОРЕЗЕЙ В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

© 2023 г. Мохд Маварди Саари^{1,*}, Нурул А'ин Надзри¹, Мохд Ауфа Хади Путера Зайни¹, Мохд Херван Сулейман¹, Тошихико Кива²

¹Университет Малайзии, Паханг 26600, Малайзия

²Университет Окаямы, Окаяма 700-8530, Япония

E-mail: *mmawardi@ump.edu.my

Поступила в редакцию 25.03.2023; после доработки 09.06.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Выявление параметров распространения трещин, например, их направления и глубины, является одним из важных аспектов в обеспечении безопасности и надежности стальных конструкций. В данном исследовании представлена разработка датчика для возбуждения круговых вихревых токов с использованием планарного дифференциального миниатюрного магнетометра для обнаружения вертикальных и горизонтальных прорезей. В датчике реализована методика возбуждения круговых вихревых токов, которая приводит к возникновению разнонаправленных вихревых токов в пластине из мягкой стали, а также используется схема для измерения тангенциального магнитного отклика. Рабочие параметры разработанного зонда были определены на основе линейного и двухмерного сканирования магнитного отклика, вызванного индуцированными вихревыми токами в образцах из низкоуглеродистой стали с различной ориентацией и глубиной искусственных прорезей. Результаты показали, что при различных ориентациях прорезей с помощью разработанного зонда была получена корреляция сигнала с глубиной прорези. Вертикальные и горизонтальные прорези можно было визуализировать по распределению магнитного поля, когда дифференциальная мнимая компонента имела лучшую чувствительность к обнаружению вертикальных прорезей, представленных измеренными сигналами от пика до пика. Контроль разнонаправленных прорезей показал, что ориентацию прорези можно оценить по картам магнитного отклика с пределом обнаружения 5 мм по длине прорези и 0,5 мм по ширине прорези соответственно.

Ключевые слова: прорезь, дефект, магнетометр, вихревые токи, низкоуглеродистая сталь.

DOI: 10.31857/S0130308223080067, EDN: DZEAFR

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы неразрушающего контроля (НК) широко используются при производстве, обработке и в процессе эксплуатации, а также при поиске неисправностей для обеспечения целостности и надежности продукции, контроля производственных процессов и поддержания постоянного уровня качества. В частности, для контроля стальных изделий были разработаны различные методы неразрушающего контроля для выявления дефектов в материалах, включая поверхностные, внутренние и с обратной стороны [1]. Среди методов неразрушающего контроля электромагнитные методы, основанные на индукции вихревых токов (ВТ), считаются перспективными для неразрушающего контроля стальных изделий, поскольку они безопасны, быстры, бесконтактны и выгодны при работе с проводящими материалами, такими как низкоуглеродистые стальные листы [2—4]. Метод ВТ доказал свою быстроту и эффективность в обнаружении таких дефектов, как усталостные трещины, включения, пустоты и коррозия в проводящих материалах [5—7]. Метод ВТ работает путем обнаружения магнитного отклика от искаженного вихревого тока, вызванного дефектами, при приложении изменяющегося во времени магнитного поля к проводящим образцам. В частности, дефекты, которые действуют как высокоомные барьеры, вызывающие возмущения потока вихревых токов, обнаруживаются и характеризуются на основе профиля измеренного распределения магнитного поля от векторов вихревых токов внутри образца [8].

В целом, на профиль распределения магнитного поля из-за наличия трещин/прорезей влияют в основном два фактора: i) направление и глубина проникновения индуцированного вихревого тока и ii) направление и конфигурация чувствительного магнитного датчика [9, 10]. Первый фактор влияет на степень искажения наведенного вихревого тока в зависимости от ориентации трещины/прорези относительно направления вихревого тока. В теории использования индукции вихревого тока было использовано несколько подходов для улучшения отношения сигнал/шум искаженного магнитного сигнала, вызванного трещиной/прорезью. О методах создания однородной индукции вихревого тока, таких как использование ортогонально расположенной катушки возбуждения, сообщалось в [9]. Возбуждающая катушка располагается перпендикулярно поверхности образца таким образом, чтобы индуцированные вихревые токи были равномерными со стороны катушки, об-

ращенной к поверхности образца, зеркально отражая ток, протекающий в возбуждающей катушке. По этой причине сигнал от искаженного вихревого тока из-за трещины/прорези будет значительным по сравнению с единообразным сигналом вихревого тока в области без дефектов.

Использование П-образного ярма также было описано во многих конструкциях вихретоковых датчиков [1]. Такое П-образное ярмо в основном работает аналогично методу равномерного вихревого тока, где равномерный вихревой ток индуцируется между полюсами ярма. Магнитные датчики размещаются в центре между полюсами ярма, так что измененный сигнал вихревого тока из-за трещины/прорези может быть обнаружен с хорошей чувствительностью в области, где вихревой ток однороден. Однако, по сравнению с методом равномерного вихревого тока, такое П-образное возбуждающее ярмо может вызывать более сильный вихревой ток в меньшей зоне контроля из-за того, что полюса ярма непосредственно обращены к поверхности образца. Следует отметить, что оба метода предназначены для создания однородного однонаправленного вихревого тока в зоне контроля [11]. Использование метода однонаправленной индукции вихревого тока может привести к различной чувствительности обнаружения в зависимости от ориентации трещин/прорезей относительно вихревого тока [12].

Для обеспечения аналогичной чувствительности, которая не зависит от ориентации трещины/прорези, был предложен ортогональный П-образный датчик для возбуждения вихревого тока в двух направлениях, перпендикулярных друг другу [9]. Этот тип датчика обычно работает на одной частоте, но в разных фазах. Хотя этот тип датчика способен генерировать сильные однородные вихревые токи, использование ярма приводит к увеличению размеров датчика, что затрудняет применение этого типа датчика для контроля на малой площади.

Использование простой круговой катушки было стандартным способом конструирования вихретоковых датчиков [2, 13]. Круговая катушка создает замкнутый вихревой ток в проводящем материале, т.е. разнонаправленные вихревые токи протекают в области, где трещина/прорезь любой ориентации может быть обнаружена по изменению магнитного поля. Этот подход хорошо подходит для применения в высокочастотных задачах, в которых для измерения искаженного сигнала вихревых токов можно использовать обычную катушку. Даже если измерительная катушка расположена в центре круговой возбуждающей катушки и находится под воздействием сильного возбуждающего поля, ее динамический диапазон рабочего поля не будет насыщен, обладая при этом высокой чувствительностью в высокочастотной области.

Для стали с высокими значениями магнитной проницаемости следует использовать возбуждающее поле низкой частоты, чтобы обеспечить большую глубину проникновения вихревых токов: $\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)}$ [14], где f , μ , σ — частота электромагнитного поля, магнитная проницаемость, электрическая проницаемость материала соответственно. Более того, поскольку применение обычной катушки в качестве датчика вихревого тока в низкочастотной области оказывается недостаточно эффективным, в вихретоковом датчике используются другие чувствительные магнитные датчики, такие как анизотропный магниторезистивный (АМР) датчик [15, 16], датчик на основе гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР) [17] и сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД) [18]. Однако их типичный рабочий диапазон полей относительно мал, и сильное поле возбуждения легко насыщает датчик, если его поместить в центр катушки возбуждения. Сообщалось о нескольких подходах для разделения поля возбуждения и датчика, таких как изменение геометрии круговой катушки для формирования двойной D-образной, 8-образной катушки возбуждения [19, 20] и использование магнитных экранов для дополнительной изоляции датчика [21]. В конфигурации с двумя D-катушками датчик помещается между соседними D-образными катушками, где градиент и интенсивность поля возбуждения значительно уменьшаются в этой области. Однако оба подхода могут увеличить сложность конструкции при изготовлении датчика.

В данном исследовании рассматривается круговой вихретоковый датчик с использованием миниатюрной дифференциальной конфигурации магнетометра для распознавания прорезей в нескольких направлениях. Круговая катушка является предпочтительной из-за ее простой конструкции при наведении вихревых токов в нескольких направлениях в зоне контроля. Кроме того, по сравнению с другими низкочастотными магнитными датчиками, для регистрации искаженного сигнала вихревого тока применяются миниатюрные магнитометрические датчики благодаря их высокой чувствительности и широкому динамическому диапазону поля. Метод подавления обратной связи на магнитных элементах позволяет эффективно расширить рабочий диапазон поля, а прогресс в производстве интегральных микросхем позволил создать более компактный магнитометрический датчик по сравнению с обычными громоздкими датчиками.

Статья построена следующим образом: в разделе 2 описаны моделирование и экспериментальные методы, использованные при исследовании схемы генерации вихревых токов, изготовлении датчика и экспериментальной установки для оценки параметров датчика. В разделе 3 представлены результаты моделирования для прорезей с различной ориентацией и их подтверждение в эксперименте с использованием изготовленного зонда. Показана и проанализирована корреляция сигналов при различной глубине и ориентации прорези. Раздел 4 завершает исследование.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

2.1. Конечно-элементное моделирование индукции круговых вихревых токов

Индукцированный вихревой ток J_s в проводящем материале, который протекает в плоскости xy из-за возбуждающего магнитного поля $B_0 e^{j2\pi ft}$, определяется по формуле:

$$J_s = J_{s0} e^{-(\pi f \mu \sigma)^{1/2} z} e^{j(2\pi ft + \alpha_0 - (\pi f \mu \sigma)^{1/2} z)}, \quad (1)$$

где μ , σ , J_{s0} и α_0 — магнитная проницаемость, электрическая проводимость образца, индуцированный ток и сдвиг фазы на поверхности соответственно. Следовательно, индуцируемый вихревой ток будет увеличивать вектор магнитного потенциала A в окружающей среде и может быть правильно описан в магнитодинамической модели следующим образом:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_s. \quad (2)$$

Плотность магнитного потока B , генерируемого током, может затем быть рассчитан по $B = \nabla \times A$, а магнитная проницаемость μ описывается по нелинейной кривой $B-H$ стальной пластины. Затем магнитный отклик B от индуцированного вихревого тока может быть численно определен при расчете магнитного векторного потенциала A , исходя из трехмерного конечно-элементного моделирования возбуждающей катушки и стального образца.

Таблица 1

Параметры конечно-элементного моделирования

Параметры	Настройка
Модуль	AC/DC
Физическое поле	Magnetic Field, mf
Режим расчета	Frequency domain
Настройка данных	3D surface
Настройка графика отображения	Magnetic flux density norm, T
Катушка возбуждения	Количество витков: 100 Диаметр катушки: 15 мм Переменный ток: 1 А, 110 Гц
Стальная пластина	Электропроводность: $8,41 \times 10^6$ См/м Относительная магнитная проницаемость: 129 Размеры: 80×80 мм Толщина: 12 мм
Прорезь	Ширина: 1 мм Глубина: 10 мм Положение: поверхностная Форма: вертикальная, горизонтальная, 45° , крест и зигзаг

В данном случае, в программном обеспечении COMSOL (COMSOL, Швеция) разрабатывается трехмерная (3D) конечно-элементная (КЭ) модель, а результатом моделирования являются распределения индуцированных вихревых токов и магнитных полей. Сетчатая 3D-модель показана на рис. 1, а общие параметры моделирования перечислены в табл. 1. Моделирование вихревых токов проводилось при двух условиях: 1) образец без дефекта и 2) образец с прорезью в центре. Затем была получена разница сигналов при вычитании между этими образцами для оценки влияния ориентации/формы прорези на генерируемые распределения магнитного поля.

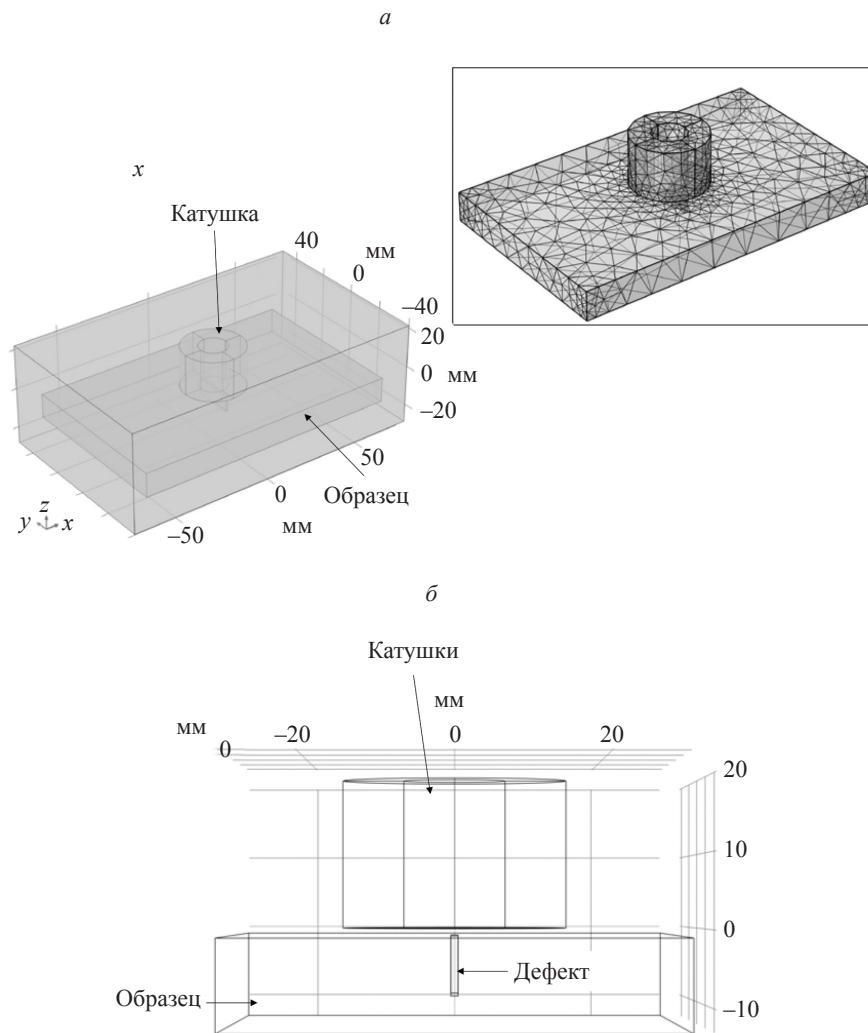


Рис. 1. 3D КЭ-модель, созданная в COMSOL, для циркулярного направления индуцированного вихревого тока: вид сверху (а); вид сбоку (б).

Поскольку целью моделирования является изучение эффективности кругового вихревого тока в обнаружении разнонаправленных прорезей, катушка возбуждения устанавливается неподвижной в центре образца в течение всего моделирования, а B_z рассчитывается на расстоянии 1 мм от поверхности образца в пределах области 30×30 мм. Были смоделированы и проанализированы пять прорезей: вертикальная, горизонтальная, 45° , крестообразная и z-образная. Вертикальная и горизонтальная прорези представляют собой прорезь, ориентированную в направлении x или y , и их ориентация ортогональна друг другу в плоскости контроля.

2.2. Разработка миниатюрных магнитометрических вихретоковых датчиков

Измерительная система для разработанного кругового вихретокового датчика, представленная на рис. 2, состоит из круговой катушки возбуждения и магнитометрических датчиков (DRV425, Texas Instrument), источника напряжения, платы сбора данных и компьютера для обработки результатов измерений. Катушка возбуждения имела 100 витков и была намотана из медного провода диаметром 0,1 мм, а 2 магнитометрические датчики располагались в центре катушки. Размеры катушки и магнитометрических датчиков составляли 14 мм (внешний диаметр) и $4 \text{ мм} \times 4 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$ соответственно. Чувствительные элементы магнитометрических датчиков имели размеры $0,5 \text{ мм} \times 2 \text{ мм} \times 0,1 \text{ мм}$. Между магнитометрическими датчиками для формирования пло-

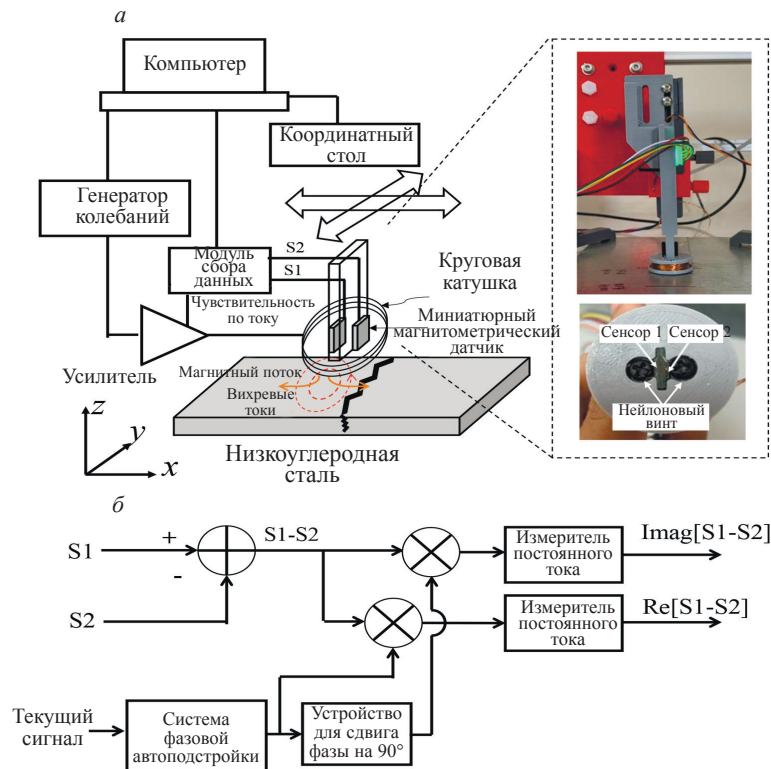


Рис. 2. Функциональная схема измерительной системы с вихретоковым преобразователем; нейлоновые винты М3 использовались, чтобы прикрепить возбуждающую катушку к корпусу датчика (а). Блок-схема фазочувствительной методики, реализованной на компьютере для разделения действительной и мнимой компоненты дифференциального сигнала (б).

скостной дифференциальной конфигурации датчика dB_z/dx имелся зазор 2 мм. Магнитометрический датчик имеет уровень собственных шумов, равный $1,5 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 10 Гц в экранированной области при смещении на 5 В. Оцениваемая чувствительность составляет 30 мВ/мТл при шунтировании резистором с сопротивлением 200 Ом в линейном области $[-0,5 \text{ мТл}, 0,5 \text{ мТл}]$ [10]. Оценочная полоса пропускания магнитометрического датчика составляет около 17 кГц. Поскольку магнитометрический датчик не содержит никаких ферромагнитных материалов и имеет небольшие размеры, его вкладом в искажение магнитного отклика от образца можно пренебречь.

Исходя из планарной дифференциальной конфигурации, плотность тока в направлении y , J_y , может быть оценена следующим образом:

$$J_y \propto \frac{dB_z}{dx} \approx \frac{\Delta S_{\text{eddy}}}{\Delta x} = \frac{S_{1,\text{eddy}} - S_{2,\text{eddy}}}{\Delta x}, \quad (3)$$

Дифференциальный сигнал измеряется магнитометрическими датчиками S1 и S2 на базовой линии $\Delta x = 2 \text{ мм}$. Стоит отметить, что S1 и S2 также измеряют поле возбуждения и сильный сигнал намагниченности из-за высокой магнитной проницаемости образца. Затем дифференциальный сигнал разделяется на действительную и мнимую компоненты, используя сигнал тока в катушке возбуждения в качестве опорной фазы, как показано на рис. 2б. В низкочастотной области можно предположить, что сигналы намагниченности и возбуждающего поля находятся в фазе, и эти вклады сигнала следует учитывать при извлечении слабого сигнала вихревого тока при измерениях.

2.3. Образцы из низкоуглеродистой стали с искусственными прорезами

Низкоуглеродистая сталь SS400 — разновидность углеродистой стали с достаточно сильными ферромагнитными свойствами и широко используется в промышленности благодаря своей хоро-

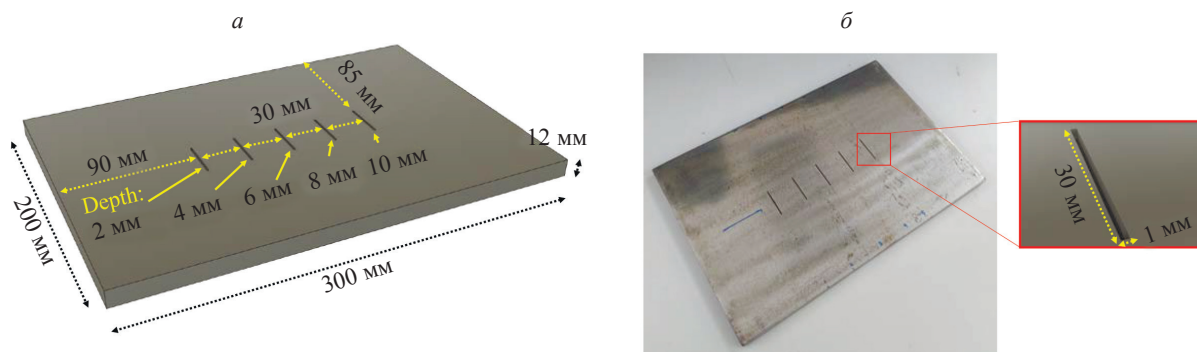


Рис. 3. Схематическое изображение образца из низкоуглеродистой стали толщиной 12 мм с глубинами прорезей от 2 до 10 мм (образец 1) (а); фотография образца 1 (б).

шей коррозионной стойкости. Для проверки эффективности метода индукции вихревого тока на 12-миллиметровых пластинах из стали SS400 методом электроэрозионной резки (ЭЭР) были подготовлены искусственные прорезы различной глубины и сложной формы. Относительная магнитная проницаемость и электрическая проводимость равны 500 и 2×10^6 С/м соответственно. Пять параллельных прорезей различной глубины показаны на рис. 3 (образец 1), а прорезь сложной формы, имитирующая форму трещины показана на рис. 4 (образец 2). Прорезы в образце 1 имели глубины 2, 4, 6, 8, 10 мм шириной 1, а прорезы во 2 образце имели постоянную глубину величиной в 10 мм с разными ширинами, длинами и ориентациями. Конкретные размеры показаны на рис. 3 для образца 1 и на рис. 4 и табл. 2 для образца 2.

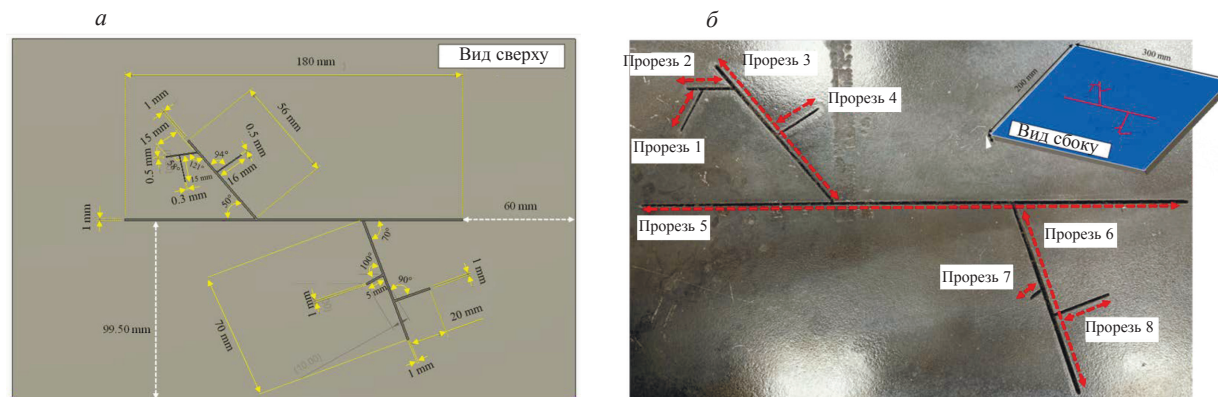


Рис. 4. Схематическое изображение искусственных прорезей с различными ширинами, длинами и ориентациями в интервале 0,2—1 мм, 5—180 мм, 0—290 град, соответственно на поверхности образца из низкоуглеродистой стали толщиной 12 мм (образец 2) (а); фотография образца 2 с соответствующими обозначениями прорезей (б).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. КЭ-моделирование индукции вихревых токов

Пять типов прорезей моделируются как поверхностные дефекты в стальных пластинах из стали SS400, и распределения магнитного поля по площади прорезей рассчитываются в рамках моделирования МКЭ. На рис. 5 показаны рассчитанные карты действительных и мнимых компонент нормального магнитного поля B_z , обусловленного вертикальными, горизонтальными, 45° , поперечными и z-образными прорезями после вычитания из данных по образцу без дефектов. Здесь катушка возбуждения располагается в точке (0, 0), т.е. в центре области щели, а B_z рассчитывается на рас-

Таблица 2

Параметры прорезей образца 2 и V_{pp} сигналы действительной и мнимой компонент S_1-S_2

Прорезь	Прорезь 1	Прорезь 2	Прорезь 3	Прорезь 4	Прорезь 5	Прорезь 6	Прорезь 7	Прорезь 8
Ориентация, град	247°	189°	130°	36°	0°	290°	210°	20°
Длина, мм	15	15	56	16	180	70	5	20
Ширина, мм	0,3	0,5	1	0,5	1	1	1	1
$V_{pp, фон} (Re[S_1-S_2])$, мВ	0,0020							
$V_{pp, прорезь} (Re[S_1-S_2])$, мВ	0,0003	0,0010	0,0044	0,0014	0,0034	0,0116	0,0005	0,0019
Результат контроля при использовании $Re[S_1-S_2]$: $V_{pp, прорезь} > 2 \times V_{pp, фон}$?	Нет	Нет	Да	Нет	Да	Да	Нет	Нет
$V_{pp, фон} (Imag[S_1-S_2])$, мВ	0,0006							
$V_{pp, прорезь} (Imag[S_1-S_2])$, мВ	0,0019	0,0006	0,0048	0,0022	0,0013	0,0053	0,0002	0,0014
Результат контроля при использовании $Imag[S_1-S_2]$: $V_{pp, прорезь} > 2 \times V_{pp, фон}$?	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Нет	Да

стоянии 1 мм от поверхности образца в пределах 30 мм×30 мм. Частота возбуждения установлена на 110 Гц на основе предыдущего исследования в [11], где можно получить оптимальный вклад компонентов утечки магнитного потока и вихревого тока для обнаружения щелей. Кроме того, частота возбуждения 110 Гц выбрана для обеспечения большей глубины проникновения вихревых токов, чтобы можно было оценить магнитный отклик от различных глубин щели по сравнению с традиционным подходом, использующим частоту возбуждения в области от 10 кГц до 1 МГц. Учитывая, что частота возбуждения составляет 110 Гц, глубина проникновения может быть рассчитана с использованием проводимости и проницаемости стали в табл. 1 как 1,46 мм, по сравнению с 0,15 мм, когда частота составляет 10 кГц. Более того, достаточная чувствительность для разрешения слабого магнитного отклика в низкочастотной области от образца может быть получена с помощью магнетометров по сравнению с обычным вихретоковым зондом, использующим катушку индуктивности в качестве датчика.

Карты распределения рассчитанных действительных и мнимых компонент B_z для всех типов прорезей показали изменение в интенсивности сигнала в местах расположения прорезей. Как действительная, так и мнимая компоненты принимали максимальное значение в тех местах расположения прорезей, где величина сигнала $Re[B_z]$ была примерно на порядок больше, чем $Imag[B_z]$. $Re[B_z]$ может рассматриваться как сигналы намагниченности и потока рассеяния на прорези и $Re[B_z]$ находился в фазе с током возбуждения. Из этого можно сделать вывод, что поток рассеивается больше всего в местах расположения дефектов, следовательно, показывая максимальное значение B_z . С другой стороны, $Imag[B_z]$ представлял сигнал, обусловленный вихревыми токами, и был меньше, чем сигнал намагниченности образца. Увеличение значения $Imag[B_z]$ вокруг мест расположения щелей свидетельствует о концентрации вихревых токов на краях щелей. Смоделированные значения $Re[B_z]$ и $Imag[B_z]$ показали, что метод индукции вихревых токов эффективен для геометрической оценки прорезей сложной формы. Однако следует отметить, что чувствительность в выявлении прорези, находящейся между большими прорезями, с помощью $Imag[B_z]$, как показано в случае прорези z-образной формы (рис. 5и, к), будет значительно снижена по сравнению с большими прорезями. Это связано с тем, что на циркуляцию вихревого тока сильно повлияли большие прорези, что привело к меньшему изменению интенсивности для центральной прорези.

В случае применения конкретного вихретокового датчика для получения “истинного” изменения вихретокового сигнала, вызванного дефектами, необходимо вычесть фоновые сигналы, например, от поля возбуждения и намагниченности. Обычно для этой цели используется дифференциальная конфигурация вихретоковых датчиков, где планарная дифференциальная конфигурация [11] эффективно уменьшает сильные фоновые сигналы в измеряемом сигнале.

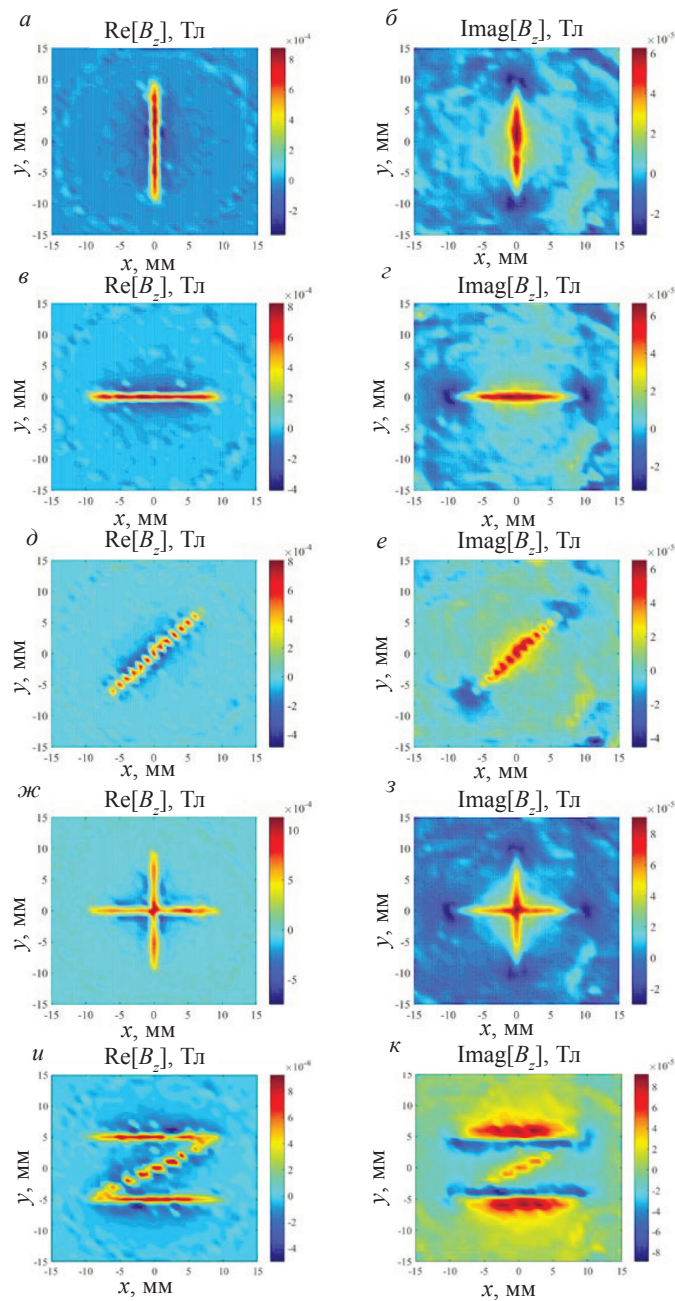


Рис. 5. Смоделированные распределения действительных и мнимых компонент магнитного поля B_z при частоте возбуждения 110 Гц для вертикального (а, б), горизонтального (в, г), 45° (д, е), крестообразного (ж, з), z-образного (и, к) типа прорези.

3.2. Оценка искусственных прорезей с помощью вихрекового датчика с миниатюрными магнетометрическими датчиками

На рис. 6а, б показаны двухмерные скан-карты действительной и мнимой компонент магнитных откликов $\text{Re}[S_1 - S_2]$ и $\text{Imag}[S_1 - S_2]$ по поверхности образца 1, ориентированные так, чтобы получилась серия горизонтальных щелей. Измерения проводились при возбуждающем поле 110 Гц, амплитуде тока возбуждения 70 мА и расстоянии 1 мм от поверхности образца. Наличие горизонтальных щелей можно было определить по профилю изменения интенсивности сигнала. По

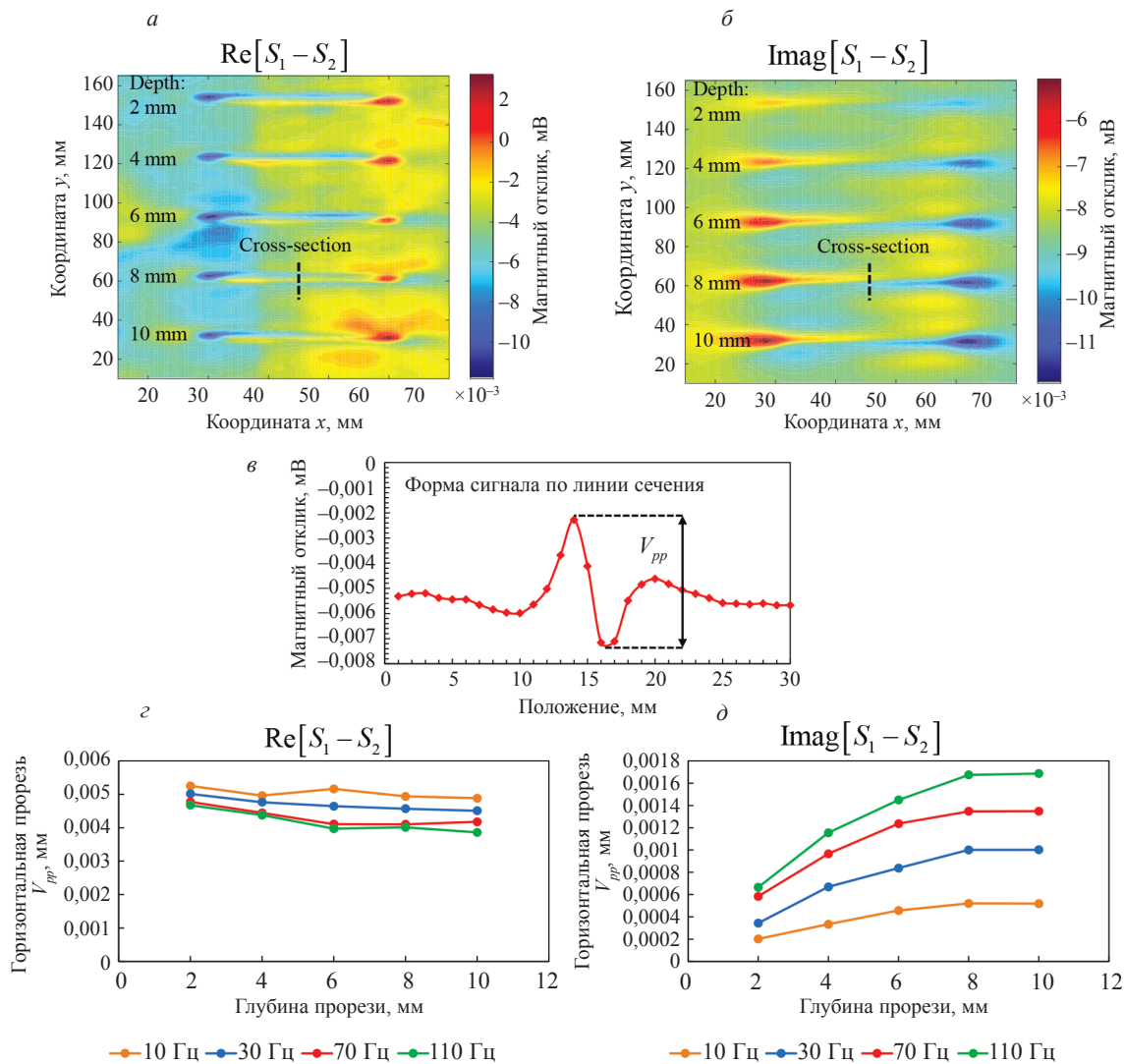


Рис. 6. Действительная (а) и мнимая (б) компоненты двумерной карты распределения, полученных при контроле горизонтальных прорезей с различными глубинами, форма сигнала по линии сечения (в), размах сигнала действительной (г) и мнимой компоненты (д) вдоль линии сечения в зависимости от глубины трещины.

сравнению с картой $\text{Re}[S_1 - S_2]$, карта $\text{Imag}[S_1 - S_2]$ лучше отображает вертикальные прорезы, где изменение интенсивности сигнала в областях без дефектов было небольшим. Кроме того, влияние соседних прорезей на магнитные отклики можно считать незначительным, поскольку изменение сигнала в области между прорезями было относительно небольшим. Сигналы $S_1 - S_2$ на линиях сечения, показанных на рис. 6а, были получены для оценки пикового сигнала V_{pp} (рис. 6в) в зависимости от глубины. Линии сечения располагались вертикально по центру прорези в положении $x = 45$ мм. Сигналы V_{pp} в зависимости от глубины прорези на разных частотах показаны на рис. 6г и д для действительной и мнимой составляющих. Наблюдается корреляция между V_{pp} и глубиной щели, когда V_{pp} для $\text{Re}[S_1 - S_2]$ уменьшается по мере увеличения глубины щели. Эта тенденция была обратной в случае V_{pp} для $\text{Imag}[S_1 - S_2]$, показывая тенденцию к росту при увеличении глубины щели. Эти характеристики можно интерпретировать следующим образом: $\text{Re}[S_1 - S_2]$ связана с намагниченностью и сигналом рассеяния потока образца, при этом можно предположить, что увеличение глубины прорези уменьшало сигнал намагниченности из-за меньшего намагниченного объема. По сравнению с сигналами от рассеивания потока, сигнал намагниченности под круговой катушкой возбуждения был бы больше, так как направление намагниченности было параллельно

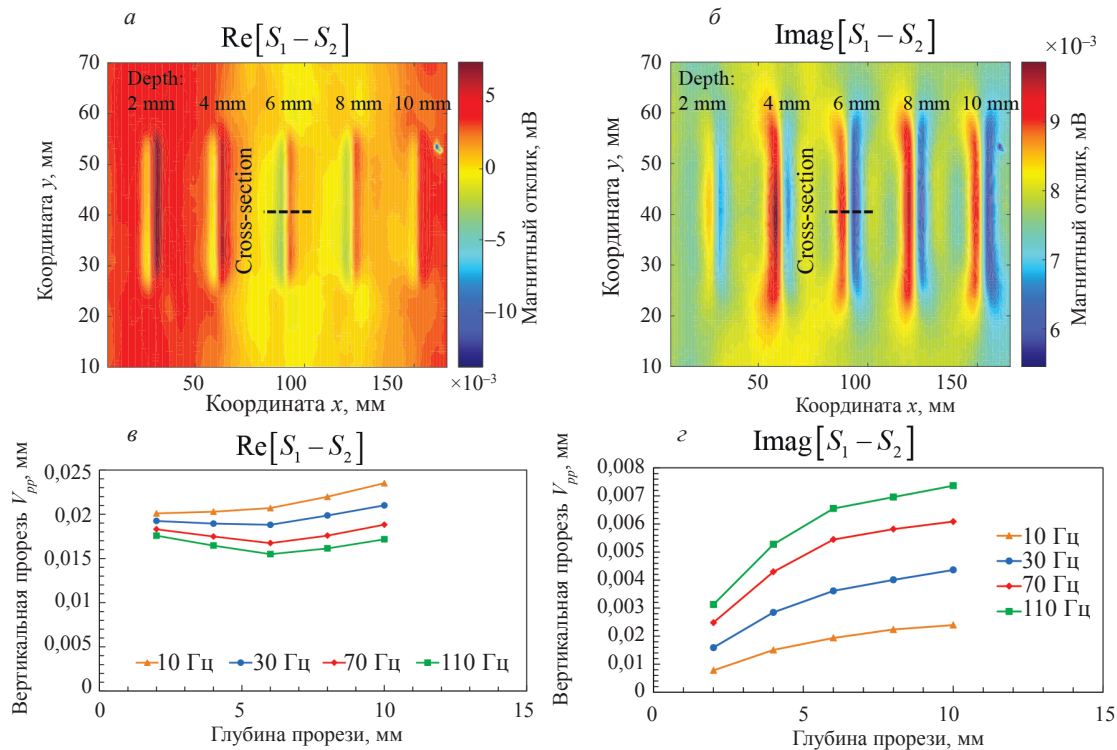


Рис. 7. Действительная (а) и мнимая (б) компоненты двумерной карты распределения, полученных при контроле горизонтальных прорезей с различными глубинами, размах сигнала действительной (в) и мнимой (г) компоненты вдоль линии сечения в зависимости от глубины трещины.

чувствительной оси S_1-S_2 . Из корреляций, полученных в отношении различных глубин щели, можно сделать вывод, что $\text{Imag}[S_1-S_2]$ будет полезна для оценки глубины щели.

На рис. 7а, б показаны карты распределения $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$ по поверхности образца 1, ориентированного так, чтобы получилась серия вертикальных прорезей. Параметры измерения, такие как частота возбуждения, амплитуда тока и зазор, были аналогичны предыдущему измерению. Как и на рис. 6, наличие вертикальных прорезей можно было определить по профилю изменения интенсивности сигнала. Однако, по сравнению со случаем горизонтальных прорезей, карты $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$ показывали заметно больший отклик сигнала в областях прорезей и представляли существование вертикальных прорезей с лучшим разрешением. Такого результата можно было ожидать, поскольку дифференциальный сигнал $[S_1-S_2]$ был задан как dB_z/dx ; следовательно, вертикальные прорезы могут привести к сильному изменению вихревых токов в направлении оси y в месте положения прорези. Значения V_{pp} сигналов S_1-S_2 в зависимости от глубин трещины были рассчитаны вдоль линий сечения, располагающихся на $y = 40$ мм и показаны на рис. 7 в, г. Была обнаружена лучшая корреляция сигнала V_{pp} для $\text{Imag}[S_1-S_2]$ в зависимости от глубины прорези по сравнению с $\text{Re}[S_1-S_2]$. Хотя подобная зависимость наблюдалась в случае вертикальных и горизонтальных прорезей, V_{pp} сигнала $\text{Imag}[S_1-S_2]$ из-за вертикальных прорезей был почти в 4 раза больше, чем в случае горизонтальных прорезей, что показывает зависимость чувствительности распознавания прорезей от дифференциальной конфигурации и ориентации прорезей.

Двухмерные карты $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$ для образца 2 (прорези сложной формы) показаны на рис. 8. Параметры измерения, такие как частота возбуждения, амплитуда тока и зазор, были такими же, как и в предшествующих экспериментах. Как и в случае образца 1, изменения интенсивности сигнала из-за прорезей на карте $\text{Imag}[S_1-S_2]$ были более заметны, чем на карте $\text{Re}[S_1-S_2]$. Изменения интенсивности, вызванные прорезями, ориентированными почти вертикально, т.е. прорезями 3 и 6, были больше, чем прорезями, ориентированными горизонтально. Дальнейшая оценка эффективности контроля прорезей проводилась для карт $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$, когда значения $V_{pp, \text{прорезь}}$ рассчитывались по линии сечения по середине каждой прорези. Затем значения $V_{pp, \text{прорезь}}$ сравнивались с $V_{pp, \text{фон}}$ полученными по максимальным и минимальным значениям по площади, выделенной штриховой линией на рис. 8. Рассчитанные

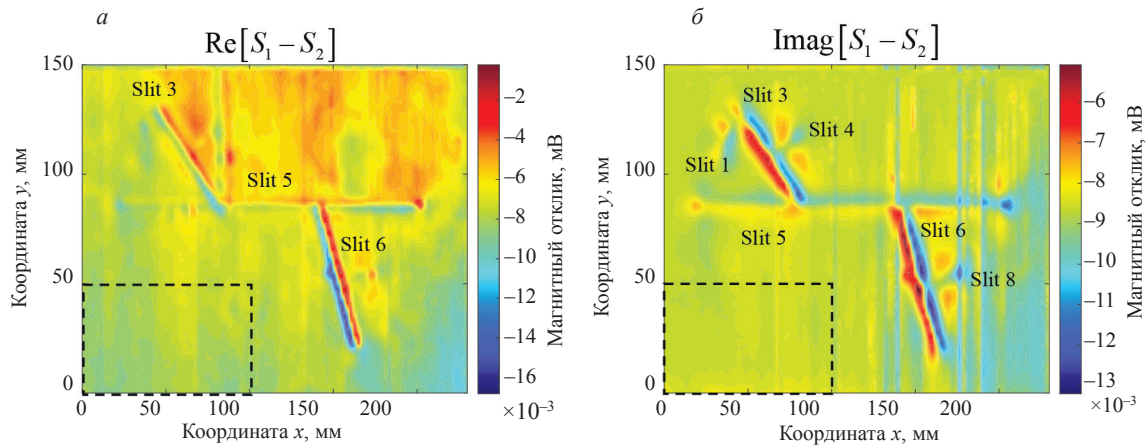


Рис. 8. Действительная (а) и мнимая (б) компоненты двумерной карты, полученной для образца 2 с различными размерами, глубинами и ориентациями прорезей.

$V_{pp, \text{прорезь}}$ и $V_{pp, \text{фон}}$ сведены в табл. 2. Используя критерий контроля прорезей, основанный на соотношении сигнал/шум $S/R = V_{pp, \text{прорезь}} / V_{pp, \text{фон}} > 2$, можно сделать вывод, что $\text{Imag}[S_1 - S_2]$ обладает лучшей способностью к распознаванию прорезей в образце 2 в сравнении с $\text{Re}[S_1 - S_2]$. Однако при использовании обоих компонент не удалось разрешить прорези 2 и 7, и это может быть связано с малой шириной в 0,5 мм прорези 2 и короткой в 5 мм прорези 7.

Нечеткое изменение интенсивности сигнала некоторых прорезей можно объяснить: 1) дифференциальной конфигурацией в x -направлении и 2) влиянием сильного возбуждающего поля, действующего на датчики. Первая причина может быть решена путем установки разностного направления в направлении оси y , чтобы можно было разрешить горизонтальные щели. Однако, несмотря на то, что датчик настроен на работу в дифференциальном режиме, вторая проблема напрямую влияет на чувствительность датчика. В разработанном датчике можно сказать, что плоскостная дифференциальная конфигурация испытывает зависимость от направления вихревого тока, где dB_z/dx будет соответствовать только вихревому току, направленному по оси y . Эта зависимость от направления вихревого тока снижает чувствительность зонда для выявления прорези, параллельной дифференциальному направлению [10]. Для преодоления этой проблемы в будущем конфигурация вихретокового датчика может быть дополнительно оптимизирована, чтобы обеспечить полное обнаружение векторов вихревых токов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследуется магнитный отклик, обусловленный наличием прорезей в стальных пластинах, с использованием круговой катушки возбуждения и планарной дифференциальной конфигурации магнитометра. Моделирование магнитного отклика показало, что метод индукции вихревого тока имеет преимущество в обнаружении щелей в любой ориентации. С помощью изготовленного кругового вихретокового датчика с планарным дифференциальным магнитометром были измерены действительные и мнимые компоненты магнитного отклика двух образцов с различной глубиной, длиной и ориентацией прорезей. Было обнаружено, что мнимая составляющая дифференциального магнитного отклика коррелирует с глубиной щели и имеет лучшую чувствительность к обнаружению, представленную измеренным значением V_{pp} для вертикальных щелей. Распознавание разнонаправленных прорезей в образце 2 показало эффективность изготовленного датчика, где было трудно разрешить почти горизонтальные прорези длиной и шириной менее 5 и 0,5 мм соответственно. Тем не менее, ориентацию более крупных щелей можно было четко определить по картам магнитного отклика. В ближайшем будущем можно будет использовать конфигурации датчиков dB_z/dx и dB_z/dy для обеспечения аналогичной чувствительности и одновременного обнаружения вертикальных и горизонтальных прорезей, в то время как общая конструкция зонда может быть улучшена для обнаружения более узких и коротких прорезей.

Работа поддержана Министерством высшего образования Малайзии (№ гранта FRGS/1/2022/TK07/UMP/02/9) и Центром управления исследованиями Университета Малайзии в Паханге (№ гранта RDU223315).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E.* Non-destructive techniques based on eddy current testing // *Sensors*. 2011. V. 11. No. 3. P. 2525—2565. DOI: 10.3390/s110302525
2. *Tsukada K., Hayashi M., Nakamura Y., Sakai K., Kiwa T.* Small Eddy Current Testing Sensor Probe Using a Tunneling Magnetoresistance Sensor to Detect Cracks in Steel Structures // *IEEE Trans. Magn.* 2018. V. 54. No. 11. P. 1—5. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2845864
3. *Xu P., Shida K.* Eddy Current Testing Probe Composed of Double Uneven Step Distributing Planar Coils for Crack Detection // *IEEE Trans. Sensors Micromachines*. 2008. V. 128. No. 1. P. 18—23. DOI: 10.1541/ieejsmas.128.18
4. *Kiselev E.K., Gol'dshtein A.E.* Eddy-Current System for Testing Inner Diameter of Pipes // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. V. 55. No. 3. P. 210—216. DOI: 10.1134/S1061830919030069
5. *Nadzri N.A.* Development of Eddy Current Testing System for Welding Inspection // *2018 9th IEEE Control Syst. Grad. Res. Colloq.* 2018. P. 94—98. DOI: 10.1109/ICSGRC.2018.8657511
6. *Jiang Feng, Liu S., Xin S.* Influences of Excitation Current Frequency and Amplitude on Corrosion Evaluation Based on Analytical Model for Surface Magnetic Field // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2020. V. 56. No. 8. P. 668—680. DOI: 10.1134/S1061830920080057
7. *Mardaninejad R., Safizadeh M.S.* Gas Pipeline Corrosion Mapping Through Coating Using Pulsed Eddy Current Technique // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. V. 55. No. 11. P. 858—867. DOI: 10.1134/S1061830919110068
8. *Sasayama T., Ishida T., Matsuo M., Enpuku K.* Thickness Measurement of an Iron Plate Using Low-Frequency Eddy Current Testing With an HTS Coil // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Aug. 2016. V. 26. No. 5. P. 1—5. DOI: 10.1109/TASC.2016.2535366
9. *Repelianto A.S., Kasai N.* The improvement of flaw detection by the configuration of uniform eddy current probes // *Sensors (Switzerland)*. 2019. V. 19. No. 2. DOI: 10.3390/s19020397
10. *Saari M.M., Nadzri N.A., Zaini M.A.H.P., Ramlan N.H., Tsukada K.* A Low-frequency Eddy Current Probe Based on Miniature Fluxgate Array for Defect Evaluation in Steel Components // *IEEE Trans. Magn.* 2021. P. 1—5. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3076441
11. *Zaini M.A.H.P., Saari M.M., Nadzri N.A.I., Aziz Z., Ramlan N.H., Tsukada K.* Extraction of Flux Leakage and Eddy Current Signals Induced by Submillimeter Backside Slits on Carbon Steel Plate Using a Low-Field AMR Differential Magnetic Probe // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 146755—146770. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3123421
12. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Detecting Extended Complex-Shaped Defects in Electroconductive Plates Using a Magnetic Carrier // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. V. 55. No. 3. P. 217—224. DOI: 10.1134/S1061830919030094
13. *Saari M.M. et al.* Design of eddy current testing probe for surface defect evaluation // *Int. J. Automat. Mech. Eng.* 2019. V. 16. No. 1. DOI: 10.15282/ijame.16.1.2019.19.0481
14. *Yoshimura W., Sasayama T., Enpuku K.* Optimal Frequency of Low-Frequency Eddy-Current Testing for Detecting Defects on the Backside of Thick Steel Plates // *IEEE Trans. Magn.* 2019. V. PP. P. 1—5. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2896590
15. *Vyhnanek J., Ripka P.* Experimental Comparison of the Low-Frequency Noise of Small-Size Magnetic Sensors // *IEEE Trans. Magn.* 2017. V. 53. No. 4. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2633398
16. *Shleenkov A.S., Bulychev O.A., Shleenkov S.A., Novgorodov D.V.* Features and Advantages of Applying Anisotropic Magnetoresistive Field Sensors to Testing the Full Volume of Small- and Medium-Diameter Pipes // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2020. V. 56. No. 5. P. 417—425. DOI: 10.1134/S1061830920050083
17. *Postolache O., Ramos H.G., Ribeiro A.L.* Computer Standards & Interfaces Detection and characterization of defects using GMR probes and artificial neural networks // *Comput. Stand. Interfaces*. 2011. V. 33. No. 2. P. 191—200. DOI: 10.1016/j.csi.2010.06.011
18. *Carr C., Graham D., Macfarlane J.C., Donaldson G.B.* HTS SQUIDS for the nondestructive evaluation of composite structures. V. 1387.
19. *Hatsukade Y., Tanaka S.* Mobile NDE System Utilizing Robust HTS-SQUID Magnetometer for Use in Unshielded Environments // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016. V. 26. No. 3. DOI: 10.1109/TASC.2015.2512845
20. *Xu Z., Wang X., Deng Y.* Rotating focused field eddy-current sensing for arbitrary orientation defects detection in carbon steel // *Sensors (Switzerland)*. 2020. V. 20. No. 8. DOI: 10.3390/s20082345
21. *Chang. Y., Jiao J., Li G., Liu X., He C., Wu B.* Effects of excitation system on the performance of magnetic-flux-leakage-type non-destructive testing // *Sensors Actuators A Phys.* Dec. 2017. V. 268. P. 201—212. DOI: 10.1016/j.sna.2017.08.009