

## ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ОЦЕНКУ КОРРОЗИИ ПО АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

© 2020 г. Фэн Цзян<sup>1,2</sup>, Шулин Лю<sup>1,\*</sup>, Шаоджи Синь<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Шанхайский университет, Шанхай 200072, Китай

<sup>2</sup> Институт мехатроники машиностроения, профессиональный колледж информационных технологий Цзянсу, Уси 214153, Китай

<sup>3</sup>Шанхайский Диан Джи Университет, Шанхай 201306, Китай

\*e-mail: lsl346@shu.edu.cn

Поступила в редакцию 27.10.2018; после доработки 27.07.2019

Принята к публикации 30.08.2019

Представлено влияние тока возбуждения на оценку коррозии цилиндрической формы в полубесконечной пластине. Во-первых, установлена осесимметричная модель цилиндрической катушки над корродированной пластиной и получено аналитическое решение с помощью метода разложения по собственным функциям в усеченной области (TREE) для магнитного поля, измеряемого на поверхности объекта (поверхностное магнитное поле). Затем исследуется и количественно оценивается влияние частоты и амплитуды тока возбуждения на поверхностное магнитное поле. Обнаружено, что величина радиальной компоненты магнитной индукции увеличивается с увеличением частоты тока возбуждения, тогда как величина осевой компоненты магнитной индукции уменьшается. Амплитуда тока возбуждения пропорциональна величинам радиальной и осевой компонент магнитной индукции и не влияет на фазу величины магнитной индукции. В результате, узел влияния (характеристический параметр) для определения радиуса и глубина полости для обнаружения скрытой коррозии, очевидно, зависят от частоты тока возбуждения на графике в форме бабочки. Результаты расчетов хорошо согласуются с численным моделированием, показывая, что разработанная модель может быть использована для прогнозирования оптимальной частоты тока возбуждения. Из данной работы видно, что соответствующая частота тока возбуждения, например,  $f = 500$  Гц, может улучшить разрешение величины, влияющей на определение радиуса коррозии. Для обнаружения скрытой коррозии более низкая частота тока возбуждения, такая как  $f = 100$  Гц, может усиливать явление дефекта и повышать точность обнаружения. Полезно не только разрабатывать аналитическую модель для поверхностного магнитного поля, но и оптимизировать параметры измерительного устройства.

*Ключевые слова:* ток возбуждения, поверхностное магнитное поле, аналитическая модель, оценка коррозии.

DOI: 10.31857/S0130308220080060

### ВВЕДЕНИЕ

Вихретоковый контроль, основанный на принципе электромагнитной индукции, является одним из пяти традиционных методов неразрушающего контроля. Он имеет преимущества в высокой скорости, низкой стоимости и бесконтактности, а также широко используется при проверке качества и структурной целостности металлов и сплавов [1—3]. Для понимания физического механизма, оптимизации конструкции зонда и параметра контроля и даже для вычисления и оценки вероятности обнаружения дефектов могут быть использованы теоретические модели [4, 5]. По сравнению с численными моделями, аналитические модели обеспечивают четкую функциональную связь между сигналами датчиков и физическими параметрами. Расчет аналитической модели практически не зависит от размера катушки, параметров контролируемого объекта и значительно меньше численной модели. Таким образом, он особенно подходит для расчета влияния небольших изменений параметров на датчик. Theodoulidis и др. применил метод TREE для аналитического моделирования вихретокового контроля. Метод TREE значительно упрощает расчет сопротивления катушки и повышает точность вычислений. С тех пор метод TREE позволяет получить соответствующие такие аналитические модели, как модель влияния концов труб и стержней на импеданс катушки и модель импеданса катушки плоского проводника, содержащего дефект [6—8].

Тем не менее метод TREE еще предстоит дополнить и улучшить. Во-первых, традиционные вихретоковый контроль основан на измерении полного сопротивления катушки. Таким образом, метод TREE, наконец, дает аналитическое выражение импеданса катушки. Поскольку импеданс катушки фактически является одномерным сигналом, можно только лишь судить о наличии или отсутствии дефектов и нельзя полностью получить многомерную информацию о дефектах. Магнитное поле между катушкой и изделием, особенно вблизи поверхности изделия, содержит

обширную информацию. Трехмерное поверхностное магнитное поле может предоставлять информацию о глубине, длине и ширине дефекта. Поэтому изучение поверхностного магнитного поля важно для реконструкции дефектов [9, 10]. Кроме того, успешная разработка высокоэффективных магнитных датчиков обеспечивает основу для реконструкции дефектов на основе поверхностного магнитного поля. В настоящее время проводятся экспериментальные исследования по неразрушающему контролю на основе GMR и других магнитных датчиков [11, 12]. Однако теоретические исследования по оценке дефектов на основе магнитного поля отстают от прикладных исследований. Кроме того, магнитное поле свободного пространства фактически зависит от многих факторов. Ток возбуждения, протекающий в катушке, является источником магнитного поля. Изменение магнитного поля, вызванное дефектом, является полем рассеяния. Поэтому для анализа дефектов необходимо глубоко проанализировать влияние тока катушки на поверхностное магнитное поле. Есть несколько теоретических исследований влияния тока возбуждения на обнаружение магнитного поля для различных дефектов. Это, в некоторой степени, ограничивает применение этого метода.

В этой статье с помощью метода TREE получено аналитическое выражение для поверхностного магнитного поля полубесконечной пластины, содержащей коррозионное отверстие. На основе созданной аналитической модели изучены и проанализированы влияния различных частот и амплитуд тока возбуждения на определение радиуса и толщины коррозии, а также глубины залегания скрытой коррозии. Выводы, сделанные на основе исследования, обеспечивают теоретическую основу для применения модели и оптимального проектирования, и разумного выбора зонда возбуждения.

## 1. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

Как показано на рис. 1, над полубесконечным проводником находится цилиндрическая катушка с синусоидальным током. Ось симметрии катушки перпендикулярна проводнику. Расстояние между нижней плоскостью катушки и плоскостью проводника равно  $z_1$ . Внутренний и внешний радиусы катушки равны  $r_{c1}$  и  $r_{c2}$  соответственно, а высота равна  $z_2 - z_1$ . Имеется коррозия в виде цилиндра с радиусом  $r_1$  и толщиной  $d_1$  на расстоянии  $d_2$  ниже поверхности проводника. Задача может быть упрощена до осесимметричного электромагнитного поля. Чтобы решить эту задачу, мы делим поле на пять областей: область 1, расположенная над катушкой, ( $z \geq z_2$ ), область 2 ( $0 \leq z \leq z_1$ ), область 3 ( $-d_2 \leq z \leq 0$ ), область 4 ( $-d_2 - d_1 \leq z \leq -d_2$ ) и область 5 ( $z \leq -d_2 - d_1$ ). Область 4 разделена на 2 подобласти: коррозионная зона 4-1 ( $r \leq r_1$ ) и бескоррозионная зона 4-2 ( $r \geq r_1$ ) из-за наличия дефекта.

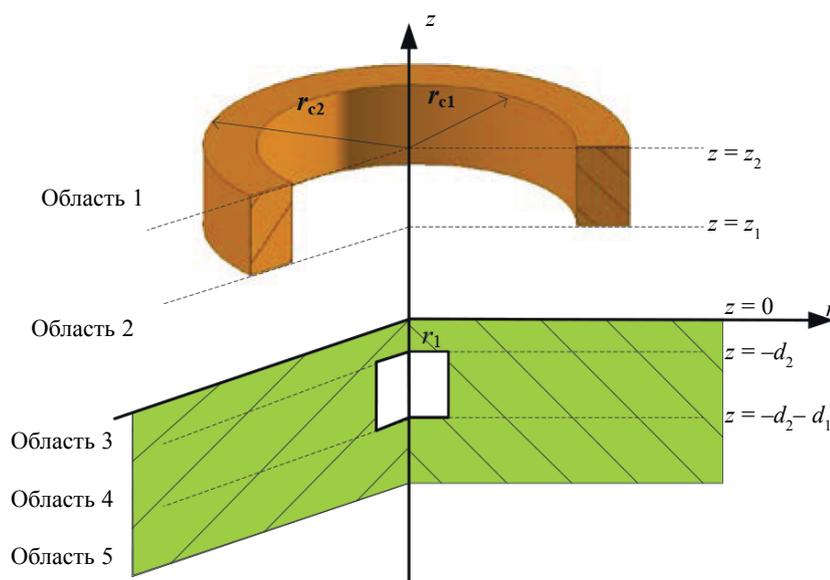


Рис. 1. Осесимметричная модель со скрытой коррозией.

В данной работе подход к решению задачи определения поля рассеяния дефекта в полупространстве аналогичен сеточному методу. При численном решении этой задачи с использованием сеточного метода необходимо ограничиться конечными размерами и совместить решения на линиях  $z = -d_2$ ,  $z = -(d_2 + d_1)$  и наложить условия согласования на внешней границе и границах дефекта. Магнитный векторный потенциал  $A$  определяется как  $\nabla \times A = B$  с  $\nabla \times A = 0$ . В гармоническом по времени электромагнитном поле уравнения Максвелла могут быть преобразованы в простые уравнения связей путем введения магнитного векторного потенциала. Потенциал магнитного вектора удовлетворяет уравнению Лапласа в воздухе и уравнению Гельмгольца в проводящей области, соответственно, следующим образом [7]:

$$\nabla^2 A = 0, \quad (1)$$

$$(\nabla^2 - k^2)A = 0, \quad (2)$$

где  $k^2 = j\omega\mu\sigma$ . Электромагнитное поле представлено магнитным векторным потенциалом только с азимутальной составляющей. Используя цилиндрические координаты для решения вышеуказанной задачи, (2) можно переписать как

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} = k^2 A. \quad (3)$$

Магнитный векторный потенциал  $A$  может определяться как

$$A(r, z) = R(r)Z(z). \quad (4)$$

Согласно методу разделения переменных, мы можем получить следующие два дифференциальных уравнения:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + (a^2 r^2 - 1)R = 0, \quad (5)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} - k^2 = a^2, \quad (6)$$

где  $a^2$  определена как константа. Когда  $a > 0$ , общее решение (5):

$$R(r) = CJ_1(ar) + DY_1(ar). \quad (7)$$

$J_1$  обозначает функцию Бесселя первого рода и первого порядка, а  $Y_1$  обозначает функцию Бесселя второго рода и первого порядка. В областях 1, 2, 3 и 5 подстановка  $\lim |R(r)| < \infty$  в (7) приводит к  $D = 0$ . Следовательно, в этих четырех областях:

$$R(r) = CJ_1(ar). \quad (8)$$

Поскольку магнитный векторный потенциал удовлетворяет однородному условию Дирихле при  $r = h$ , граничное условие может быть задано следующим образом:

$$A|_{r=h} = 0, \quad (9)$$

где  $h$  — искусственная граница. Подставляя (4) и (8) в граничное условие (9) и учитывая  $Z(z) \neq 0$ , получаем:

$$J_1(a_i h) = 0. \quad (10)$$

Таким образом, соответствующая собственная функция:

$$R_i(r) = CJ_1(a_i r), \quad i = 1, 2, \dots \quad (11)$$

Подставляя  $a_i$  в (6) и полагая  $\lambda_i^2 = k^2 + a_i^2$ , может быть получено решение (6) в виде:

$$Z_i(z) = C_i e^{\lambda_i z} + D_i e^{-\lambda_i z}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (12)$$

Суммируя все особые решения (11) и (12), можно получить общее решение магнитного векторного потенциала:

$$A(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} J_1(a_i r) (C_i e^{\lambda_i z} + D_i e^{-\lambda_i z}). \quad (13)$$

Следовательно, магнитные векторные потенциалы в трех областях могут быть выражены как:

$$A_2(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} J_1(a_i r) (C_2 e^{a_i z} + D_2 e^{-a_i z}), \quad (14)$$

$$A_3(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} J_1(a_i r) (C_3 e^{\lambda_i z} + D_3 e^{-\lambda_i z}), \quad (15)$$

$$A_5(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} C_5 J_1(a_i r) e^{\lambda_i z}. \quad (16)$$

Первая часть магнитного векторного потенциала области 2 представляет собой действие поля источника, а вторая часть — влияние индуцированного вихревого тока в проводнике.

Чтобы задать магнитный векторный потенциал области 4, вводятся собственные значения  $p_i$  и  $q_i$ . С точки зрения распространения электромагнитной волны,  $p_i$  можно интерпретировать как число поперечных волн, а  $q_i$  можно интерпретировать как число продольных волн. Как правило, необходимо обеспечить, чтобы экспоненциальные члены в выражении магнитного векторного потенциала области 4, включающей зону коррозии и зону проводника, были одинаковыми. Между тем, чтобы отличаться от других слоев, потенциал магнитного вектора в области 4 можно выразить в следующем виде, учитывая, что решение, ограниченное при  $r = 0$ , является расходящимся:

$$\begin{cases} A_{4(1)}(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} J_1(q_i r) (C_{4(1)} e^{q_i z} + D_{4(1)} e^{-q_i z}), & 0 \leq r \leq r_1, \\ A_{4(2)}(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} [C'_{4(2)} J_1(p_i r) + D'_4 Y_1(p_i r)] (C_{4(2)} e^{q_i z} + D_{4(2)} e^{-q_i z}), & r_1 \leq r \leq h, \end{cases} \quad (17)$$

где  $q_i^2 = p_i^2 + k^2$ . Подставляя условие (9) в  $A_{4(2)}$ , имеем

$$D'_{4(2)} = -\frac{J_1(p_i h)}{Y_1(p_i h)} C'_{4(2)}. \quad (18)$$

Подстановка (18) в  $A_{4(2)}$  дает

$$A_{4(2)}(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} [Y_1(p_i h) J_1(p_i r) - J_1(p_i h) Y_1(p_i r)] (C_{4(2)} e^{q_i z} + D_{4(2)} e^{-q_i z}). \quad (19)$$

Для того, чтобы удовлетворить непрерывность  $A_\phi$  на коррозионной поверхности  $r = r_1$ , можно получить

$$A_{4(2)}(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i [Y_1(p_i h) J_1(p_i r) - J_1(p_i h) Y_1(p_i r)] (C_{4(1)} e^{q_i z} + D_{4(1)} e^{-q_i z}), \quad (20)$$

где  $b_i = \frac{J_1(q_i r_1)}{Y_1(p_i h) J_1(p_i r_1) - J_1(p_i h) Y_1(p_i r_1)}$ .

Таким образом, выражения для двух подобластей области 4 может быть переписано как

$$\begin{cases} A_{4(1)}(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} J_1(q_i r) (C_4 e^{q_i z} + D_4 e^{-q_i z}), & 0 \leq r \leq r_1, \\ A_{4(2)}(r, z) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i [Y_1(p_i h) J_1(p_i r) - J_1(p_i h) Y_1(p_i r)] (C_4 e^{q_i z} + D_4 e^{-q_i z}), & r_1 \leq r \leq h. \end{cases} \quad (21)$$

Собственные значения  $p_i$  и  $q_i$  могут быть рассчитаны, используя непрерывность тангенциальной компоненты магнитного поля  $H_z$  при  $r = r_1$  в области 4 и  $q_i^2 = p_i^2 + k^2$ .

Граничные условия между двумя различными областями:

$$\begin{cases} A_2(r, 0) = A_3(r, 0), \\ (\partial/\partial z) A_2(r, z)|_{z=0} = (1/\mu_r) (\partial/\partial z) A_3(r, z)|_{z=0}, \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} A_3(r, -d_2) = A_4(r, -d_2), \\ (1/\mu_r) (\partial/\partial z) A_3(r, z)|_{z=-d_2} = (\partial/\partial z) A_{4(1)}(r, z)|_{z=-d_2}, \\ (\partial/\partial z) A_3(r, z)|_{z=-d_2} = (\partial/\partial z) A_{4(2)}(r, z)|_{z=-d_2}, \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} A_4(r, -d_2 - d_1) = A_5(r, -d_2 - d_1), \\ (\partial/\partial z) A_{4(1)}(r, z)|_{z=-d_2-d_1} = (1/\mu_r) (\partial/\partial z) A_5(r, z)|_{z=-d_2-d_1}, \\ (\partial/\partial z) A_{4(2)}(r, z)|_{z=-d_2-d_1} = (\partial/\partial z) A_5(r, z)|_{z=-d_2-d_1}. \end{cases} \quad (24)$$

Подстановка (14) и (15) в (22) дает:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{\infty} J_1(a_j r) (C_{2j} + D_{2j}) = \sum_{j=1}^{\infty} J_1(a_j r) (C_{3j} + D_{3j}), \\ \sum_{j=1}^{\infty} a_j J_1(a_j r) (C_{2j} - D_{2j}) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_r} \lambda_j J_1(a_j r) (C_{3j} - D_{3j}). \end{cases} \quad (25)$$

Подставляя (15) и (21) в (23) и используя свойства ортогональности, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{h^2}{2} J_0^2(a_i h) \cdot (e^{-\lambda_j d_2} C_{3j} + e^{\lambda_j d_2} D_{3j}) &= \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \int_0^{r_1} r J_1(a_i r) J_1(q_j r) dr + \int_{r_1}^h b_j r J_1(a_i r) \times \right. \\ &\times [Y_1(p_j h) J_1(p_j r) - J_1(p_j h) Y_1(p_j r)] dr \left. \right] \times (e^{-q_j d_2} C_{4j} + e^{q_j d_2} D_{4j}), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{h^2}{2} J_0^2(a_i h) \cdot \lambda_j (e^{-\lambda_j d_2} C_{3j} - e^{\lambda_j d_2} D_{3j}) &= \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \mu_r q_j \int_0^{r_1} r J_1(a_i r) J_1(q_j r) dr + b_j q_j \int_{r_1}^h r J_1(a_i r) \times \right. \\ &\times [Y_1(p_j h) J_1(p_j r) - J_1(p_j h) Y_1(p_j r)] dr \left. \right] \times (e^{-q_j d_2} C_{4j} - e^{q_j d_2} D_{4j}). \end{aligned} \quad (27)$$

Аналогично, подстановка (16) и (21) в (24) и использование такого же метода для (26), (27) дает:

$$\sum_{j=1}^{\infty} \left[ \int_0^{r_1} r J_1(a_i r) J_1(q_j r) dr + \int_{r_1}^h b_j r J_1(a_i r) [Y_1(p_j h) J_1(p_j r) - J_1(p_j h) Y_1(p_j r)] dr \right] \times$$

$$\times \left( e^{-q_j(d_2+d_1)} C_{4j} + e^{q_j(d_2+d_1)} D_{4j} \right) = \frac{h^2}{2} J_0^2(a_i h) \cdot e^{-\lambda_j(d_2+d_1)} C_{5j}, \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^{\infty} \left[ \int_0^{r_1} i_j q_j r J_1(a_i r) J_1(q_j r) dr + \int_{r_1}^h r J_1(a_i r) q_j b_j [Y_1(p_j h) J_1(p_j r) - J_1(p_j h) Y_1(p_j r)] dr \right] \times$$

$$\times \left( e^{-q_j(d_2+d_1)} C_{4j} - e^{q_j(d_2+d_1)} D_{4j} \right) = \frac{h^2}{2} J_0^2(a_i h) \lambda_j e^{-\lambda_j(d_2+d_1)} C_{5j}. \quad (29)$$

После решения для различных коэффициентов мы получим магнитные векторные потенциалы в каждой из областей. Без учета проводящей пластины магнитный векторный потенциал в области 2 для катушки возбуждения определяется выражением  $\nabla^2 A_2 = -\mu_0 \mu_i J$ ,  $J = nI$ , где  $n$  — плотность витка,  $\text{м}^{-2}$ ; а  $I$  — амплитуда тока, А. Коэффициент  $C_2$  является исходным коэффициентом, который имеет вид [6]

$$C_2 = \mu_0 i \frac{\chi(a_i r_{c1}, a_i r_{c2})}{a_i^4 [h J_0(a_i h)]^2} (e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2}), \quad (30)$$

где  $i = N_c I / [(r_{c2} - r_{c1})(z_2 - z_1)]$  — плотность тока источника в катушке,  $N_c$  — число витков катушки,  $\chi(a_i r_{c1}, a_i r_{c2})$  определяет  $a$  — конечный интеграл функции Бесселя. Величины радиальных и осевых компонент магнитной индукции в области 2 в результате коррозии можно рассчитать как:

$$B_r = -\partial A_2 / \partial z = -\sum_{i=1}^N a_i J_1(a_i r) (C_{2i} e^{a_i z} - D_{2i} e^{-a_i z}), \quad (31)$$

$$B_z = \partial A_2 / \partial r = \sum_{i=1}^N a_i J_0(a_i r) (C_{2i} e^{a_i z} + D_{2i} e^{-a_i z}). \quad (32)$$

После расчета и анализа конечное число слагаемых  $N = 50$  полностью соответствует требованию. Влияние частоты и амплитуды тока возбуждения на оценку коррозии анализируется для будущих применений этой аналитической модели.

## 2. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Влияние частоты тока возбуждения на определение радиуса коррозии

Толщина коррозии  $d_1 = 0,4$  мм и скрытая глубина (глубина внутренней коррозии)  $d_2 = 0,1$  мм остаются неизменными. При изменении радиуса коррозии  $r_1$  ( $r_1 = 0,01, 0,5, 1, 1,5$  и  $2$  мм) изучалось влияние различных частот тока возбуждения на определение радиуса коррозии. Параметры катушки следующие:  $r_{c1} = 2$  мм,  $r_{c2} = 4$  мм,  $z_1 = 1$  мм,  $z_2 = 4$  мм и  $N_c = 800$ . Параметры образца следующие:  $\sigma = 3,6 \times 10^7$  См/м,  $\mu r = 5$ . На рис. 2а–г показано, что величина радиальной магнитной индукции при  $z = 0,5$  мм изменяется в зависимости от радиуса коррозии при частотах тока возбуждения 100, 500, 2000 и 5000 Гц соответственно. Поэтому из рис. 2 можно сделать следующие выводы.

1. Распределения радиальной магнитной индукции в основном схожи при разных частотах тока возбуждения. По мере увеличения расстояния магнитная индукция постепенно увеличивается, достигая максимального значения в центре катушки ( $r = (r_{c1} + r_{c2}) / 2 = 3$  мм), а затем постепенно уменьшается и приближается к нулю.

2. Частота тока возбуждения оказывает определенное влияние на магнитную индукцию. По мере увеличения частоты магнитная индукция в одной и той же точке увеличивается. Возьмем для примера  $r_1 = 1$  мм: частота увеличивается от 100 до 5000 Гц, максимальная величина магнитной

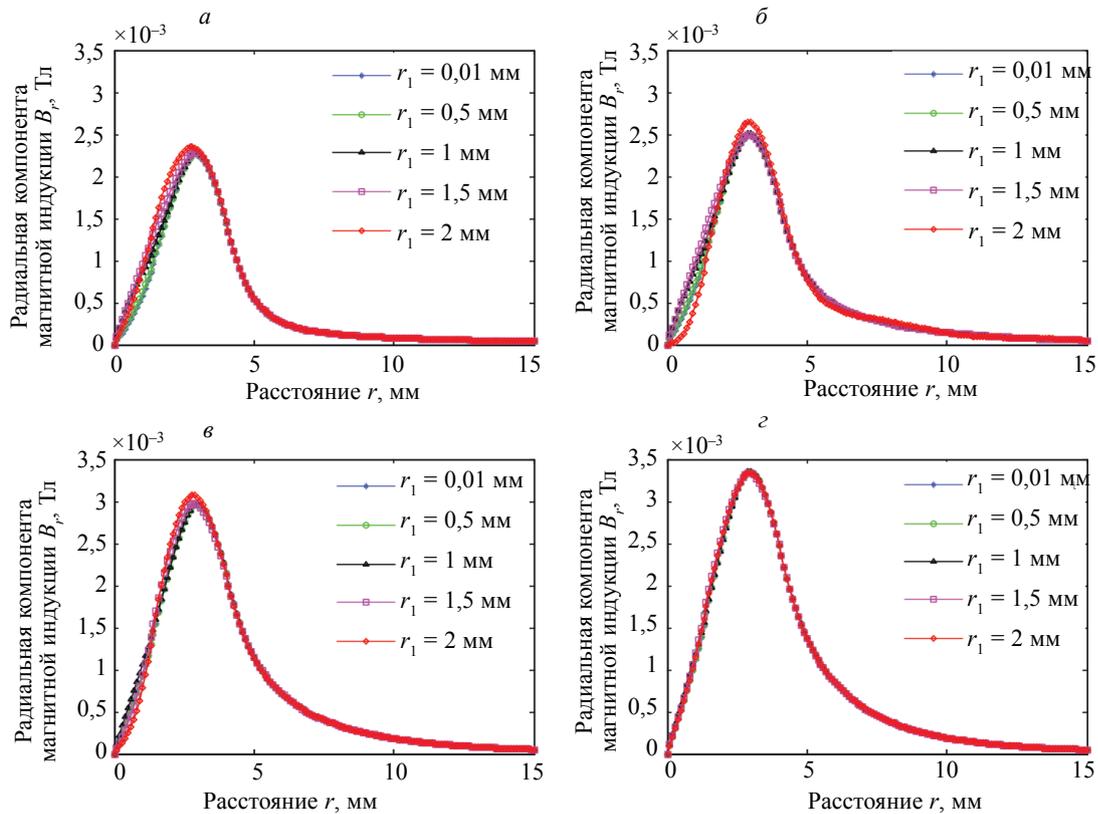


Рис. 2. Зависимость величины радиальной компоненты магнитной индукции от радиуса коррозии при  $f = 100$  Гц (а),  $f = 500$  Гц (б),  $f = 2000$  Гц (в) и  $f = 5000$  Гц (г).

индукции возрастает с  $2,27 \times 10^{-3}$  до  $3,35 \times 10^{-3}$  Тл. Поэтому разумно утверждать, что увеличение частоты тока возбуждения способствует обнаружению магнитного поля.

3. Далее рассматривается влияние частоты тока возбуждения и радиуса коррозии на магнитное поле на поверхности. Как показано на рис. 2а, б, частота тока возбуждения увеличивается от 100 до 500 Гц, а также увеличивается диапазон изменения радиальной компоненты магнитного поля, вызванного большим коррозионным отверстием (таким как  $r_1 = 2$  мм). Это является преимуществом при контроле изделий с более крупными коррозионными отверстиями. Однако для отверстий с меньшим радиусом (например,  $r_1 \leq 1,5$  мм) изменение радиальной магнитной индукции в точке  $r = 1$  мм составляет 0,378 мТл, тогда как радиус коррозии увеличивается от 0,01 до 1,5 мм и частота тока возбуждения  $f = 100$  Гц. При частоте тока возбуждения  $f = 500$  Гц изменение радиальной магнитной индукции в точке  $r = 1$  мм составляет 0,318 мТл, тогда как радиус коррозии увеличивается от 0,01 до 1,5 мм. Вышеуказанные расчеты показали, что увеличение частоты тока возбуждения немного снижает чувствительность к обнаружению меньших отверстий. Когда частота тока возбуждения дополнительно увеличивается, из рис. 2в, г видно, что диапазон изменения радиальной компоненты магнитного поля, вызванного коррозионным отверстием, значительно ослаблен. Это проявляется на всех типах отверстий, в большей или меньшей степени. Следовательно, для определения радиуса коррозии частота тока возбуждения должна быть выбрана обосновано. Используя аналитическую модель, можно заранее рассчитать оптимальную частоту тока возбуждения, что полезно для контроля небольших изменений радиуса коррозии.

Посредством расчета и анализа было обнаружено, что изменение осевой компоненты магнитного поля, вызванное радиусом коррозии при различных частотах тока возбуждения, в основном, согласуется с ранее проанализированной радиальной компонентой магнитного поля. Однако увеличение частоты тока возбуждения уменьшает величину осевой компоненты магнитной индукции. На рис. 3 показан график в форме бабочки, который изменяется в зависимости от радиуса коррозии при разных частотах тока. Из рис. 3 можно заключить следующее.

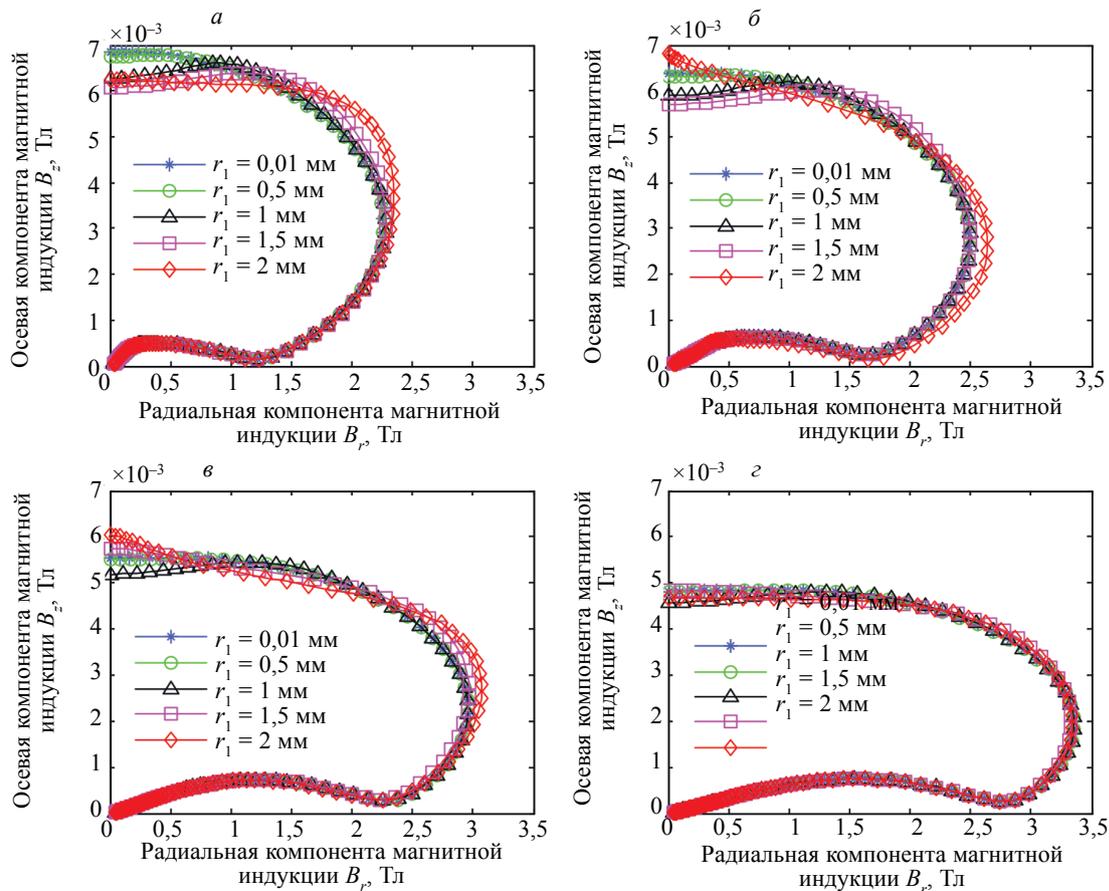


Рис. 3. Изменения графиков в форме бабочки в зависимости от радиуса коррозии при  $f = 100$  Гц (а),  $f = 500$  Гц (б),  $f = 2000$  Гц (в) и  $f = 5000$  Гц (г).

1) При увеличении частоты тока возбуждения величина радиальной магнитной индукции увеличивается, а осевой — уменьшается. Поэтому при различных частотах тока возбуждения график, показывающий зависимость осевой компоненты от радиальной, значительно изменяется. По мере увеличения частоты график расширяется по горизонтали и сжимается по вертикали. При частоте  $f = 100$  Гц график сжат по горизонтальной оси, в то время как при частоте  $f = 5000$  Гц график обладает вытянутой формой.

2) При различных частотах тока возбуждения величины изменений магнитного поля в зависимости от радиуса коррозии также различны. Из рис. 3 видно, что при  $f = 100$  Гц изменение графика, вызванное изменением радиуса коррозии, является наиболее очевидным. При  $f = 5000$  Гц, хоть радиус коррозии и изменяется, заметных изменений в форме графика не происходит. Поэтому для определения радиуса коррозии следует выбирать более низкую частоту тока возбуждения.

3) При использовании узла влияния в качестве количественного параметра определения радиуса коррозии из рисунка можно увидеть, что кривые при разных радиусах коррозии имеют очевидные точки пересечения на более низких частотах, которые полезны для определения радиуса. На более высоких частотах кривые практически перекрываются, что затрудняет выделение количественного параметра.

4) Мы знаем, что для обнаружения дефектов на основе ЭДС индукции, возникающей в катушке, должна быть выбрана более высокая частота тока возбуждения. Это связано с тем, что ЭДС индукции пропорционально скорости изменения магнитного потока. Следовательно, увеличение частоты способствует улучшению чувствительности контроля. Чтобы получить требуемую ЭДС индукции, следует выбирать более высокую частоту тока возбуждения. В этом случае из-за скин-эффекта могут быть обнаружены только дефекты на поверхности объектов, а более глубоких дефекты не могут быть обнаружены. Метод, основанный на измерении поверхностного магнитного поля, не столкнется с такими проблемами. На низких частотах может быть получена высокая

чувствительность контроля, а также определены глубокие дефекты. Это преимущество при контроле дефектов на основе магнитного поля поверхности.

## 2.2. Влияние частоты тока возбуждения на определение глубины скрытой коррозии

Толщина коррозии  $d_1 = 0,5$  мм и радиус  $r_1 = 1$  мм остаются неизменными. Взаимосвязь между величиной радиальной компоненты магнитной индукции и скрытой глубиной коррозии показана на рис. 4. На рис. 4а—г представлены результаты расчетов при частоте тока возбуждения  $f = 100, 500, 2000$  и  $5000$  Гц соответственно. Скрытая глубина  $d_2$  составляет 0,01, 0,1, 0,5, 1 и 2 мм соответственно. Остальные параметры такие же, как в разделе 2.1.

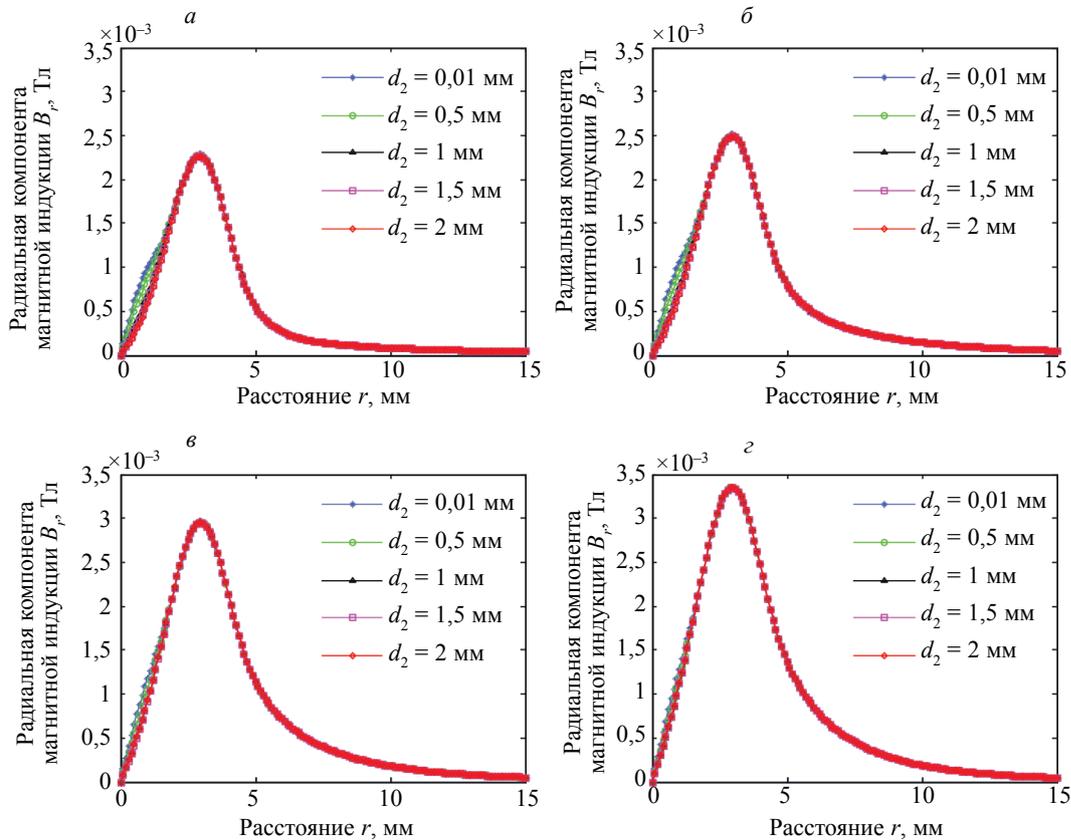


Рис. 4. Зависимость величины радиальной компоненты магнитной индукции от глубины при  $f = 100$  Гц (а),  $f = 500$  Гц (б),  $f = 2000$  Гц (в) и  $f = 5000$  Гц (г).

Из рис. 4 можно обобщить результаты расчетов. Когда дефекты имеют одинаковые параметры ( $r_1$ ,  $d_1$  и  $d_2$ ), магнитное поле изменяется при различной частоте возбуждения тока. При  $f = 100$  Гц может наблюдаться значительное изменение радиальной компоненты магнитного поля для коррозии на 0,1 мм ниже поверхности. При  $f = 2000$  Гц дефект оказывает незначительное влияние на радиальное магнитное поле поверхности. При дальнейшем увеличении частоты тока возбуждения до  $f = 5000$  Гц никаких изменений магнитного поля поверхности не наблюдается, даже если коррозия находится на 0,01 мм ниже поверхности образца. Поэтому увеличение частоты тока возбуждения неблагоприятно сказывается контроле скрытой глубины коррозионного отверстия. Для обнаружения коррозии, находящейся глубоко в образце, следует использовать более низкую частоту тока возбуждения. Это явление еще можно объяснить классическим скин-эффектом. Когда частота тока возбуждения выше, вихревые токи в основном концентрируются на поверхности образца. Находящийся глубоко дефект не нарушает распределение вихревых токов на поверхности образца; следовательно, часть магнитного поля поверхности, создаваемого вихревым током, изменяться не будет.

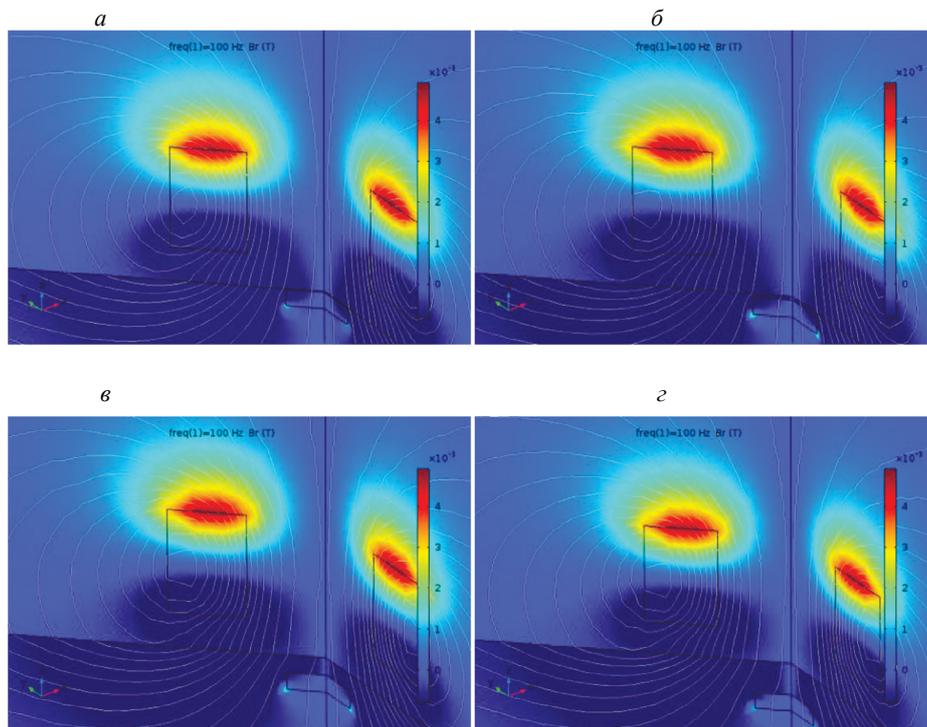


Рис. 5. Конечно-элементное моделирование величины радиальной компоненты магнитной индукции при различных глубинах скрытой коррозии:  $d_2 = 0,01$  мм (а);  $d_2 = 0,1$  мм (б);  $d_2 = 0,5$  мм (в);  $d_2 = 1$  мм (г) при  $f = 100$  Гц.

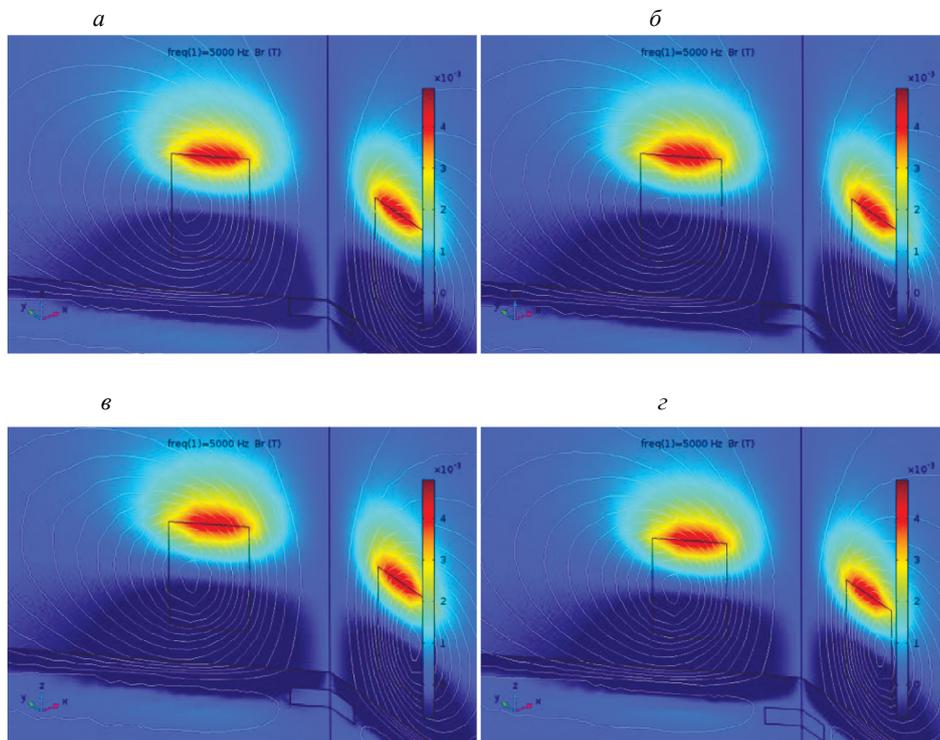


Рис. 6. Конечно-элементное моделирование величины радиальной компоненты магнитной индукции при различных глубинах скрытой коррозии:  $d_2 = 0,01$  мм (а);  $d_2 = 0,1$  мм (б);  $d_2 = 0,5$  мм (в);  $d_2 = 1$  мм (г) при  $f = 5000$  Гц.

Приведенные выше выводы подтверждаются конечно-элементным моделированием. Результаты моделирования изменения радиальной компоненты магнитной индукции при скрытой глубине при

$f = 100$  Гц и  $f = 5000$  Гц показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Распределение величины радиальной компоненты магнитной индукции хорошо видно по цветам. Как видно из рис. 5, поскольку скрытая глубина коррозионного отверстия изменяется от 0,01 до 0,1 мм при  $f = 100$  Гц, величина радиальной компоненты магнитной индукции существенно не изменяется. При дальнейшем увеличении скрытой глубины коррозионного отверстия до 0,5 мм темная тень (величина отрицательной радиальной магнитной индукции больше 0,0008 Тл) на верхней поверхности образца уменьшается, и форма тени становится близкой к эллиптической. В то же время цвет, соответствующий величине радиальной компоненты магнитной индукции в области контроля, явно светлее, что указывает на то, что величина магнитной индукции значительно снижается. Поскольку скрытая глубина коррозионного отверстия увеличилась до 1 мм, цвет величины радиальной магнитной индукции в области контроля немного светлее, чем у  $d_2 = 0,5$  мм, что указывает на то, что величина магнитной индукции немного уменьшается, но незначительно. Параметры, представленные на рис. 5, соответствуют характеристикам, показанным на рис. 4а. Это доказывает, что установленная аналитическая модель верна и с ее помощью можно определить влияние скрытой глубины коррозии на магнитное поле поверхности.

При  $f = 5000$  Гц темная тень на верхней поверхности образца значительно увеличивается, что указывает на то, что величина радиальной компоненты магнитной индукции у поверхности образца значительно выше, чем при  $f = 100$  Гц. Однако мы также видим, что форма темной тени все еще близка к трапеции; несмотря на то, что скрытая глубина коррозионного отверстия изменяется, на четырех диаграммах моделирования нет очевидных изменений. Таким образом, результаты моделирования подтверждают, что высокая частота тока возбуждения может играть отрицательную роль при контроле скрытой глубины коррозионного отверстия.

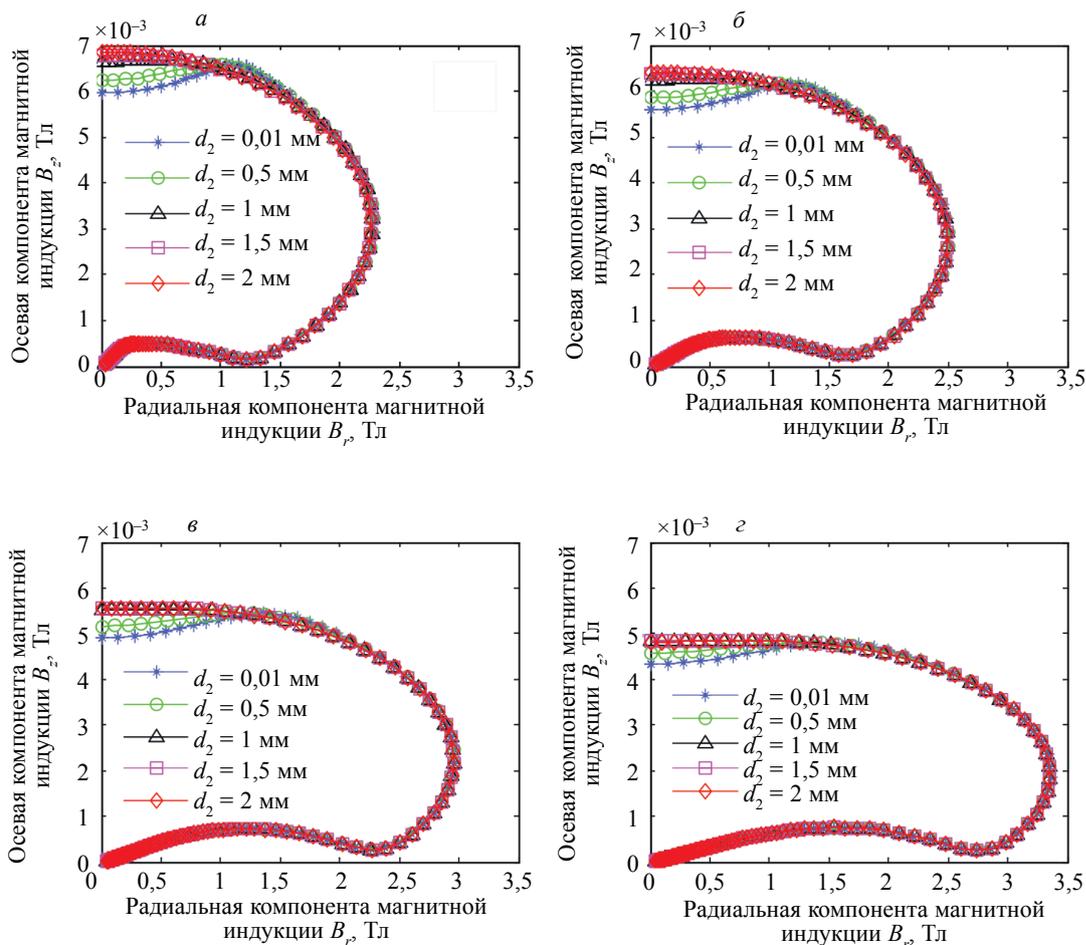


Рис. 7. Зависимость кривой от глубины скрытой коррозии при  $f = 100$  Гц (а),  $f = 500$  Гц (б),  $f = 2000$  Гц (в) и  $f = 5000$  Гц (г).

Аналогично, увеличение частоты тока возбуждения уменьшает величину осевой компоненты магнитной индукции. Однако, в отличие от радиальной компоненты магнитной индукции, влияние частоты тока возбуждения на изменение скрытой глубины не является очевидным. Когда скрытая глубина коррозии изменяется от 0,01 до 2 мм, величина осевой компоненты магнитной индукции не сильно зависит от различных частот тока возбуждения.

Как показано на рис. 7, графики изменяются при изменении скрытой глубины. Кроме того, скрытая глубина имеет только определенное влияние на магнитное поле вблизи центра коррозионного отверстия и оказывает незначительное влияние на поверхностное магнитное поле позади него. Частота тока возбуждения не может изменить этот параметр. Частота тока возбуждения влияет только на начальное положение графика. Когда частота тока возбуждения становится больше, степень вогнутости на графике становится меньше. Поэтому для контроля более глубоких дефектов целесообразно использовать низкую частоту тока возбуждения. Чем глубже скрытая глубина, тем менее заметным становится углубление на графике и тем ближе он к бездефектной форме. Анализ также показывает, что глубина вогнутости на графике все еще может использоваться в качестве параметра для контроля скрытой глубины, и она подходит для более низких частот тока возбуждения.

### 2.3. Влияние амплитуды тока возбуждения на магнитное поле поверхности корродированной пластины

Геометрические параметры коррозии следующие:  $r_1 = 1$  мм,  $d_1 = 0,5$  мм,  $d_2 = 0,1$  мм, а частота тока возбуждения составляет 1 кГц. Амплитуда тока возбуждения выбрана равной 0,01, 0,04, 0,1 и 0,2 А соответственно. На рис. 8 а—г показаны кривые величины радиальной компоненты магнитной индукции, осевой компоненты магнитной индукции, фазы радиальной компоненты магнитной индукции и фазы осевой компоненты магнитной индукции, изменяющиеся в соответствии с амплитудой тока возбуждения.

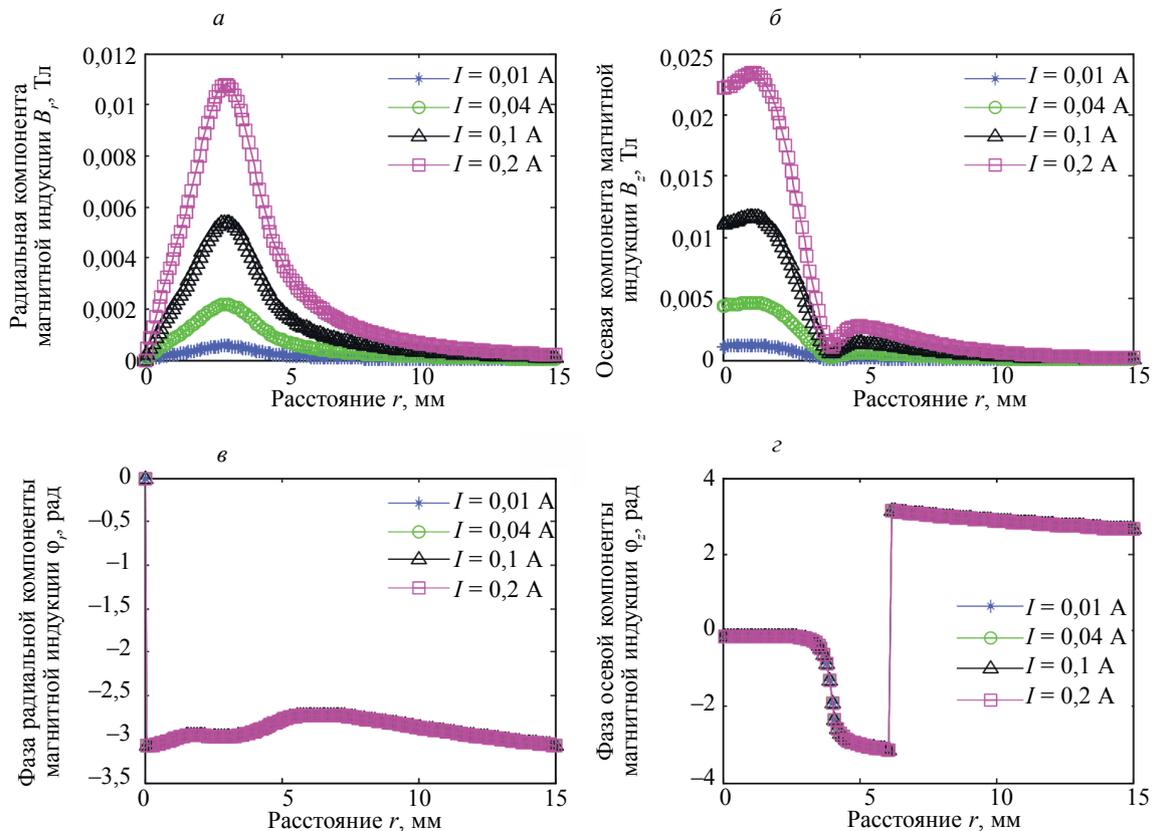


Рис. 8. Зависимости величины радиальной компоненты магнитной индукции (а), величины осевой компоненты магнитной индукции (б), фазы радиальной компоненты магнитной индукции (в) и фазы осевой компоненты магнитной индукции от амплитуды тока возбуждения (г).

Как показано на рис. 8а, б, величина магнитной индукции увеличивается с увеличением амплитуды тока возбуждения и демонстрирует линейную пропорциональную зависимость. Это пропорциональное соотношение может быть проверено с помощью уравнений (30)—(32). Амплитуда тока возбуждения не изменяет распределение индукции магнитного поля, то есть независимо от величины радиальной компоненты магнитной индукции или величины осевой компоненты магнитной индукции форма кривой не изменяется. Поэтому характеристические параметры неизменны при контроле коррозии в плоском проводнике. Улучшение чувствительности контроля выгодно при оценке параметров коррозии с использованием датчиков магнитного поля. Поскольку амплитуда тока возбуждения имеет одинаковое влияние на параметры коррозии (такие как глубины коррозии), влияние частоты тока возбуждения и амплитуды тока возбуждения на величину магнитной индукции различаются существенным образом. Как показано на рис. 8в, г, фаза магнитной индукции не изменяется с увеличением амплитуды тока возбуждения. При контроле коррозии, когда фазу магнитной индукции используется в качестве характеристического параметра, никакого эффекта не может быть получено путем изменения амплитуды тока возбуждения. Согласно приведенному выше анализу, хоть фаза магнитной индукции и изменяется с частотой тока возбуждения, она не чувствительна к параметрам коррозии. Это похоже на фазу магнитной индукции, которая нечувствительна к амплитуде тока возбуждения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При увеличении частоты тока возбуждения величина радиальной компоненты магнитной индукции увеличивается, тогда как величина осевой компоненты магнитной индукции уменьшается. Обнаружено, что увеличение частоты тока возбуждения снижает чувствительность контроля для меньших отверстий.

2. По мере увеличения частоты график расширяется по горизонтали и сжимается по вертикали. При различных частотах тока возбуждения изменение магнитного поля, вызванное изменением радиуса коррозии, также различно на графике. Поэтому для определения радиуса коррозии должна быть выбрана подходящая частота тока возбуждения, например,  $f = 500$  Гц. Скрытая глубина оказывает определенное влияние только на магнитное поле вблизи коррозионного отверстия, и чем больше частота тока возбуждения, тем меньше степень вогнутости графика.

3. В отличие от частоты тока возбуждения амплитуда тока возбуждения одинаково влияет на параметры коррозии и пропорциональна величинам радиальной и осевой компонент магнитной индукции. Фазы радиальной и осевой магнитной индукции не зависят от амплитуды тока возбуждения.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (51575331 и 51175316).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., Vazquez-Sanchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing // *Sensors*. 2011. V. 11. No. 3. P. 2525—2565.
2. Xin J., Lei N., Udpa L., Udpa S.S. Rotating field eddy current probe with bobbin pickup coil for steam generator tubes inspection // *NDT&E Int.* 2013. V. 54. No. 3. P. 45—55.
3. Efimov A.G. Development of adaptive eddy-current instruments for flaw sizing // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2010. V. 46. No. 10. P. 780—788.
4. Chen Z., Yusa N., Miya K. Some advances in numerical analysis techniques for quantitative electromagnetic nondestructive evaluation // *Nondestruct. Test Eval.* 2009. V. 24 (1—2). P. 69—102.
5. Salemi A.H., Sadeghi S.H.H., Moini R. Thin-skin analysis technique for interaction of arbitrary-shape inducer field with long cracks in ferromagnetic metals // *NDT&E Int.* 2004. V. 37. P. 471—479.
6. Bowler J.R., Theodoulidis T.P. Coil impedance variation due to induced current at the edge of a conductive plate // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006. V. 39. No. 13. P. 2862—68.
7. Bowler J.R., Theodoulidis T.P. Eddy currents induced in a conducting rod of finite length by a coaxial encircling coil // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. No. 16. P. 2861—68.
8. Bowler J.R., Theodoulidis T.P., Poulakis N. Eddy current probe signals due to a crack at a right-angled corner // *IEEE Trans. Magn.* 2012. V. 48. No. 12. P. 4735—46.
9. Jiang F., Liu S.L., Xiao S.G. Quantitative estimation of rectangular surface crack based on the 2-D modeling of surface magnetic field with long straight rectangular wire // *IEEE Trans. Magn.* 2018. V. 54. No. 5. P. 1—12.

10. *Jiang F., Liu S.L.* Evaluation of cracks with different hidden depths and shapes using surface magnetic field measurements based on semi-analytical modelling // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. No. 12. P. 125002.

11. *Goldstein A.E., Kalganov S.A.* Eddy-current nondestructive testing of long cylindrical components using spatial magnetic field components of different frequencies // *Russ. J. Nondestr. Test.* 2000. V. 36. No. 5. P. 360—365.

12. *Karpenko O., Ye C., Udpa L.* Dual frequency fusion for defect signal enhancement in EC-GMR inspection of riveted multilayer structures // *NDT&E Int.* 2017. V. 92. P. 97—103.

---