

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХМЕРНОЙ ТРЕЩИНЫ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛА ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА И БЫСТРОГО АЛГОРИТМА ПОИСКА

© 2020 г. Абдеррахман Аббасси^{1,*}, Тарик Бушала^{1,2,**}, Абдельхак Абду^{2,3,***},
Башир Абдельхади^{3,****}

¹Университет Касди Мербаха, Гардая, Уаргла, Алжир

²Университет Мохамеда Будиафа, Мсила, Алжир

³Университет Батна 2, Батна, Алжир

E-mail: *abbassi.abderrahmane@univ-ouargla.dz; **tarik.bouchala@univ-msila.dz; ***abdelhak.abdou@univ-msila.dz; ****abdelhadi3b@yahoo.com

Поступила в редакцию 29.03.2019; после доработки 24.07.2019

Принята к публикации 23.03.2020

Исследование трехмерной системы вихретоковой неразрушающего контроля для определения параметров трещин с использованием метода конечных элементов требует большого количества вычислительного времени и объема памяти. В этой статье мы проверили разработанную модель и затем непосредственно определили длину трещины, проанализировав полный сигнал. После этого мы извлекли из полного сигнала сканирования датчика максимальную амплитуду, которую мы использовали для оценки глубины трещины.

Ключевые слова: вихретоковый датчик, определение параметров трещины, 3D-конечные элементы, обработанный сигнал.

DOI: 10.31857/S0130308220050036

1. ВВЕДЕНИЕ

Любая поломка оборудования при эксплуатации — это аварийная ситуация, которая может иметь значительные последствия. Разрушение детали, как элемента конструкции, может привести к ряду событий, в результате которых может произойти поломка других деталей либо всей конструкции в целом, что приводит к необходимости в восстановлении, а, соответственно, и к простоям оборудования [1]. В менее серьезных случаях эти поломки могут привести к выводу из эксплуатации оборудования и систем, что приостанавливает производство. В промышленных применениях некоторые задачи нацелены на использование вихретоковой неразрушающего контроля (EC-NDT) [1, 2]. В нашем случае задача состоит в том, чтобы определить длину трещины L_d и глубину D_d в то время как ширина трещины составляет около 0,2 мм [3, 4]. В качестве первого шага в этой статье мы сначала непосредственно определяем длину трещины L_d , проанализировав полный сигнал, полученный при перемещении датчика вдоль оси дефекта. Фактически, с помощью этой процедуры мы определяем длину дефекта L_d и сопротивление датчика R_{mes} , которые мы используем в качестве входных данных в алгоритме, реализованном в Comsol multiphysics и поиске детерминированных алгоритмов [5].

Итак, в результате находится глубина дефекта, а размер и форма трещины могут быть легко реконструированы.

2. ИССЛЕДУЕМАЯ СИСТЕМА

Вихретоковая система неразрушающего контроля состоит из абсолютного датчика, которым сканируется пластина с трещиной в форме параллелепипеда, как показано на рис. 1.

Таблица 1

Физические и геометрические характеристики исследуемой системы [4]

Проводящая пластина		Катушка		Трещина	
Длина L_p	25 мм	Внутренний радиус R_i	0,6 мм	Длина L_d	10 мм
Ширина W_p	15 мм	Внешний радиус R_o	1,6 мм	Глубина D_d	0,75 мм
Глубина D_d	1,25 мм	Длина h	0,8 мм	Ширина W_d	0,2 мм
Проводимость σ	$1 \cdot 10^6$ См/м	Число витков N	140	Частота	150 кГц
Проницаемость μ	1	Зазор	0,5 мм		

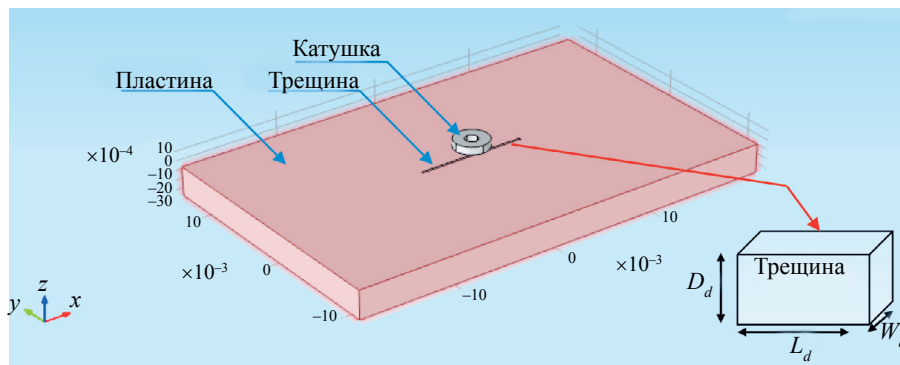


Рис. 1. Геометрическая конфигурация исследуемой системы.

Моделирование любой электромагнитной системы требует знания всех физических и геометрических характеристик в разных областях модели. Физические и геометрические параметры исследуемой системы приведены в табл. 1 [4].

3. ГЕНЕРАЦИЯ СЕТКИ

Для лучшего разрешения требуется очень мелкая сетка исследуемой области. Однако использование очень мелкой сетки приводит к росту времени расчета модели. По этой причине более мелкое разбиение проводится только для таких зон, как катушка и соседнее пространство трещины. Сетка показана на рис. 2.

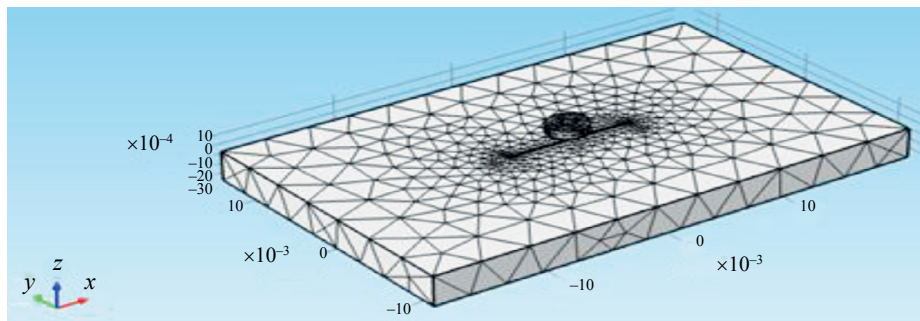


Рис. 2. Трехмерная сетка конечных элементов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы спрогнозировать и оценить распределение плотности вихревых токов в объеме пластины для различных частот (100, 150 и 300 кГц) [6, 7], была выполнена серия расчетных экспериментов с использованием описанной численной модели. На рис. 3 представлена распределение плотности индуцированных токов.

5. ВЫДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ИЗ ПОЛНОГО СИГНАЛА

На рис. 4 представлено изменение импеданса в зависимости от смещения датчика при различных значениях глубины трещины D_d [8]. Можно заметить, что фактическая ширина трещин обычно составляет около 0,2 мм [5, 9]. На рис. 4а, б показаны параметры изменения импеданса в зависимости от смещения катушки вдоль поверхности пластины.

В результате, когда датчик находится далеко от дефекта, величина изменения импеданса равна нулю. Таким образом, когда датчик попадает в область дефекта, наблюдается увеличение этих компонентов. Кроме того, можно отметить, что для всех частот величина сигнала увеличивается

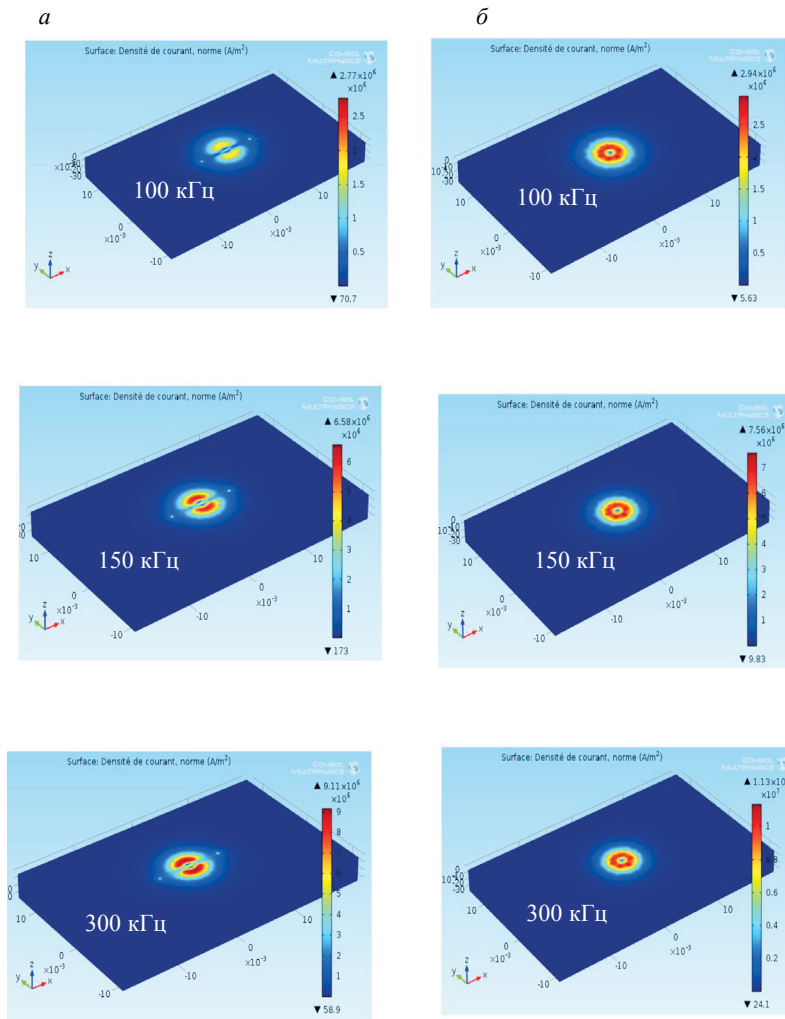


Рис. 3. Распределение плотности вихревых токов для частот 100, 150 и 300 кГц: с трещиной (а); без трещины (б).

пропорционально с увеличением глубины дефекта [10]. Из этого следует очень ценное замечание, позволяющее сделать прямой вывод, что длина трещины L_d точно равна расстоянию между двумя точками перегиба, как показано на рис. 4а. Следовательно, полный сигнал на рис. 4а может быть заменен дискретным, содержащим полезную информацию, такую как полное сопротивление датчика Z_{mes} на оси дефекта ($x = 0$ мм) и длина дефекта L_d (рис. 4б). Следовательно, глубина дефекта D_d может быть легко определена при выборе адекватного метода решения обратной задачи, такого как быстрый алгоритм, который был недавно нами разработан [8].

6. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТ ИМПЕДАНСА В СООТВЕТСТВИИ С ГЛУБИНОЙ ДЕФЕКТА

После внедрения конечно-элементного моделирования в программное обеспечение Matlab мы изучаем влияние глубины трещины (D_d) на такие компоненты импеданса датчика, как амплитуда, активное сопротивление и реактивное сопротивление; металлический лист изготовлен из нержавеющей стали 304L и титана. Результаты приведены на рис. 5 и 6.

Из этих результатов четко видно, что сопротивление R уменьшается с увеличением глубины трещины D_d . Кроме того, большие изменения происходят при высоких частотах, потому что дефект находится на поверхности. Наша цель в этом разделе не состоит в том, чтобы провести глубокий анализ этих результатов, потому что эта задача уже рассматривалась в предыдущих работах, мы хотим доказать, что изменение активного сопротивления датчика происходит быстрее по сравнению с изменением реактивного сопротивления. По этой причине следующий раздел посвя-

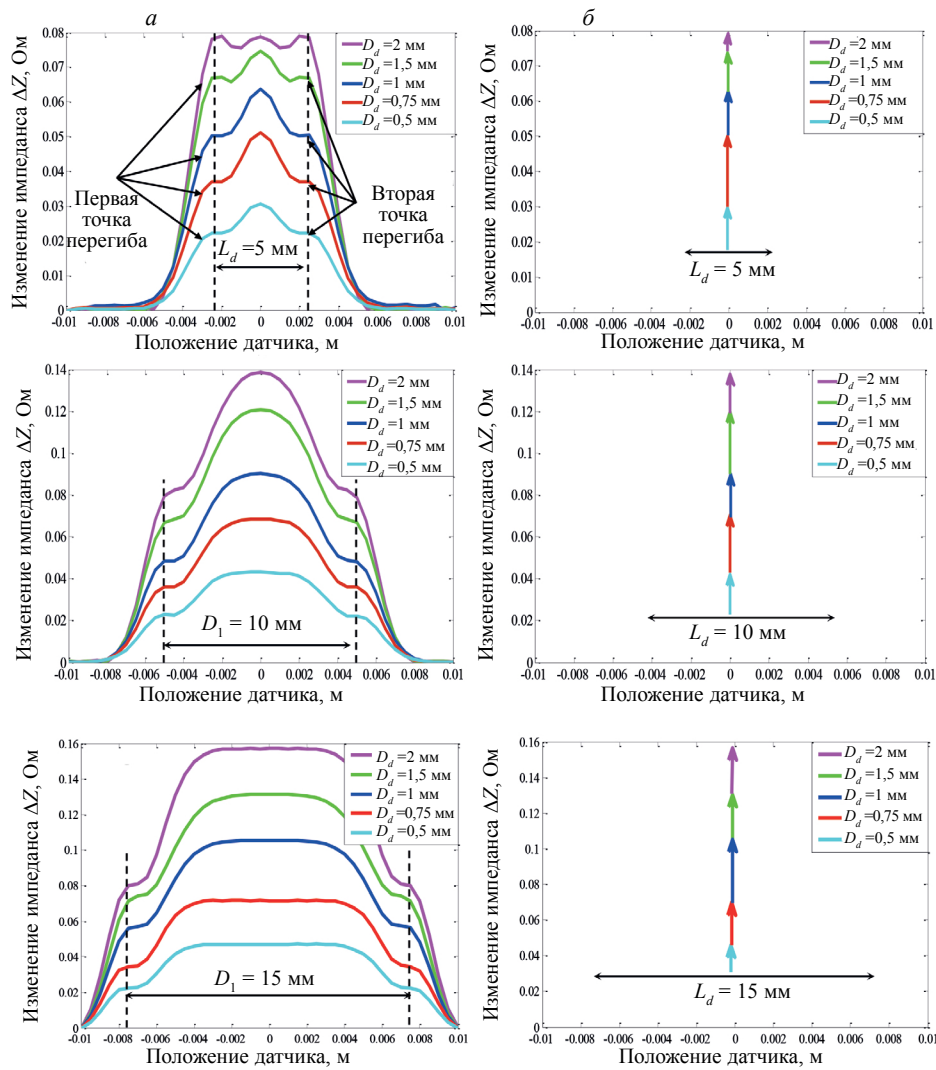


Рис. 4. Изменение импеданса при перемещении датчика: полная развертка (а); обработанные сигнал (б).

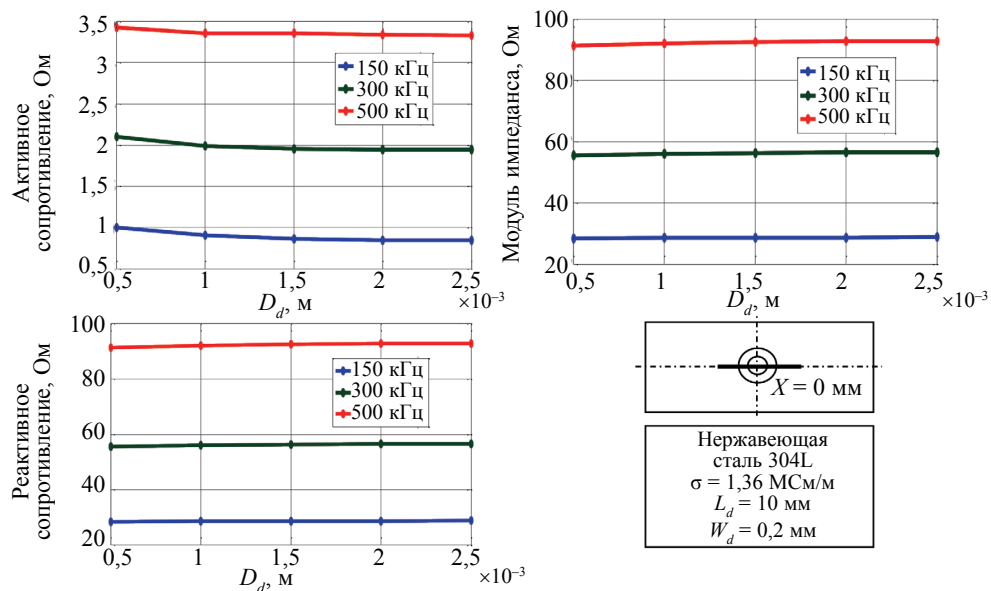


Рис. 5. Компоненты импеданса для дефекта в листе из нержавеющей стали.

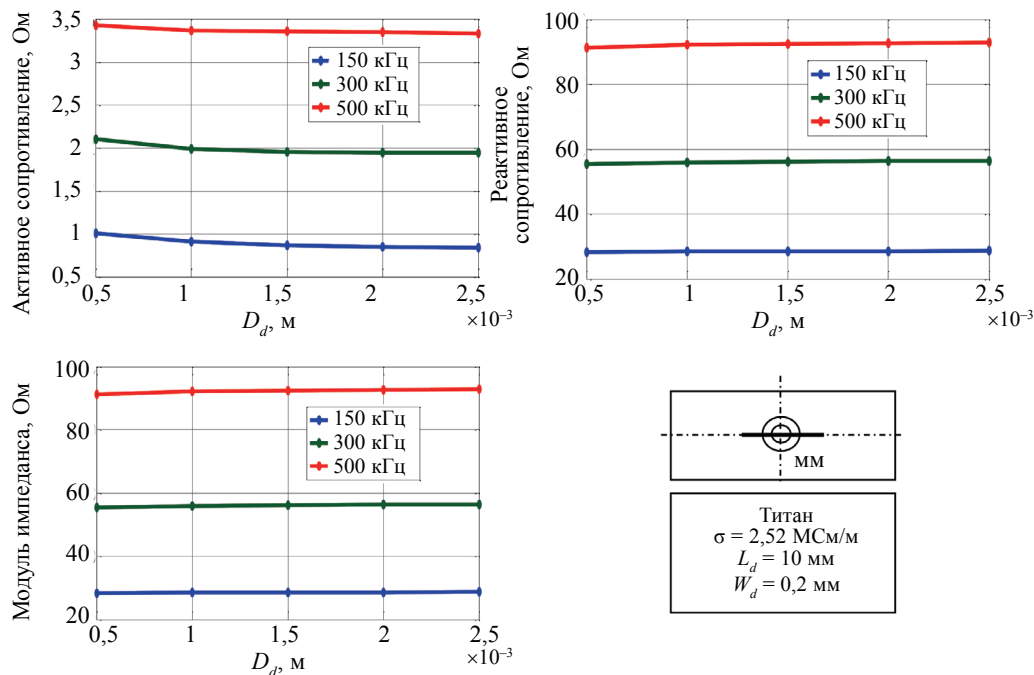


Рис. 6. Компоненты импеданса для дефекта в титановом листе.

щен использованию результатов решения прямой задачи для решения обратной задачи, которая состоит в измерении глубины дефекта D_d .

7. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИНЫ

Обратный метод, который мы предлагаем, основан на связи трехмерного прямого конечно-элементного моделирования и алгоритма поиска [3]. Алгоритм использует тот факт, что активное сопротивление датчика в зависимости от глубины трещины является убывающей функцией ($R = f(D_d)$). Если знать физические и геометрические параметры исследуемой системы и пределы начального интервала (Dd_{\min} и Dd_{\max}), с помощью прямой модели можно определить активное сопротивление датчика R_{mes} , соответствующее промежуточной глубине трещины. Если рассчитанное активное сопротивление R меньше, чем R_{mes} , глубина трещины Dd_{\min} заменяется на $\frac{Dd_{\min} + Dd_{\max}}{2}$. В противном случае, если R больше, чем R_{mes} , глубина трещины Dd_{\max} заменяется на $\frac{Dd_{\min} + Dd_{\max}}{2}$. Этот процесс повторяется до тех пор, пока разница между ними не станет ниже

предела допускаемой погрешности ($|R - R_{mes}| \leq \epsilon$). Эти этапы процесса обобщены на рис. 7.

Этот алгоритм имеет следующее преимущество: заранее можно гарантировать получение верного решения, если искомое значение принадлежит начальному интервалу. Естественно, в промышленных приложениях эксперт знает начальный интервал глубины трещины (Dd_{\min} и Dd_{\max}).

В следующих разделах мы применяем разработанный обратный метод для определения глубины трещины в нержавеющей стали 304L, алюминии и титане. Итак, изменение глубины трещины для частоты возбуждающего поля 150 кГц согласно номеру итерации показано на рис. 8.

В ходе этих операций мы увидели, что значения, полученные предлагаемым способом, являются очень точными и близкими к желаемым, что показывает надежность этого метода. Фактически, для всех типов металлических листов для определения глубины трещины (0,5, 1,5 и 2,5 мм) достаточно менее 10 итераций. Кроме того, мы знаем, что вероятностные методы, такие как генетический алгоритм, очень дороги с точки зрения времени вычислений из-за большого количества оценок целевых функций на каждой итерации. С другой стороны, для достижения приемлемой точности объем генеральной совокупности должен быть увеличен, что приводит к значительному времени вычислений. В результате предлагаемый способ является более предпочтитель-

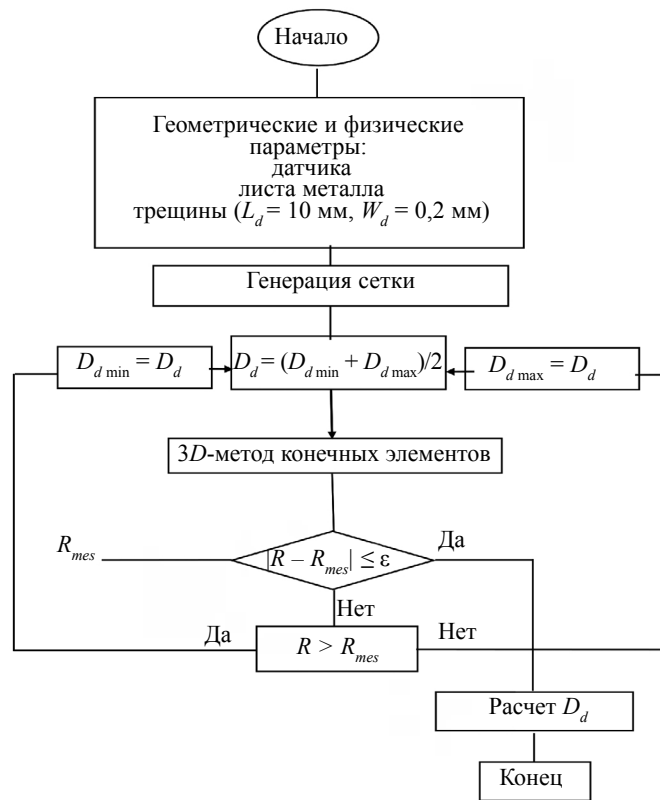


Рис. 7. Блок-схема детерминированного алгоритма поиска.

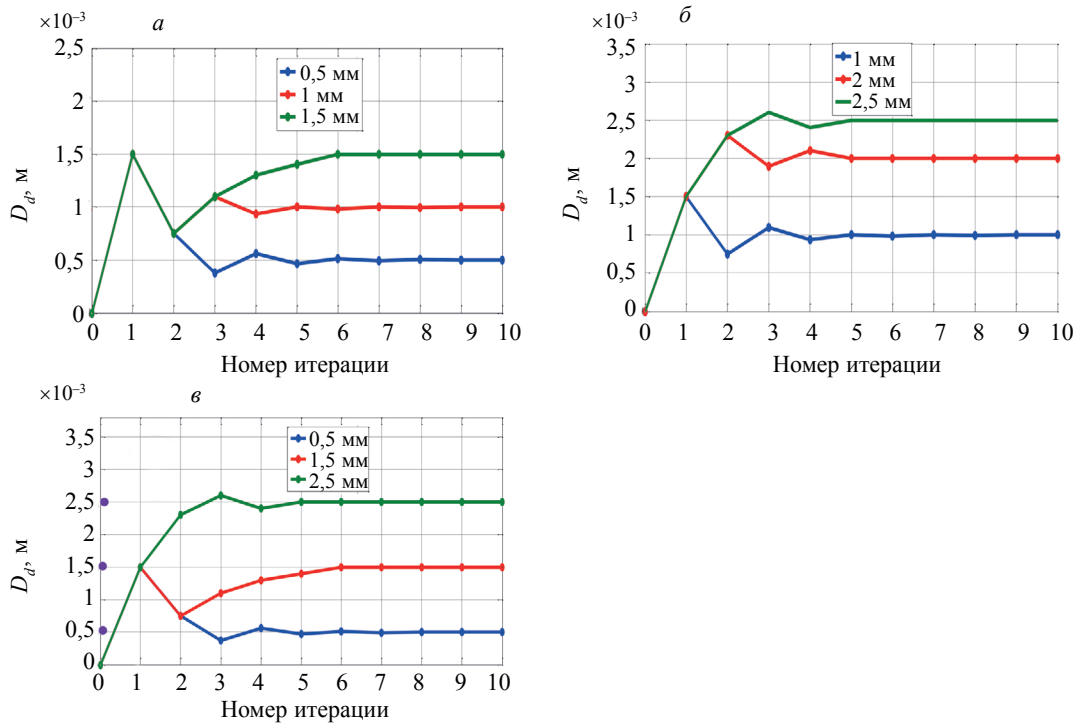


Рис. 8. Глубина дефекта согласно итерационному алгоритму ($f=150\text{кГц}$):
 а — нержавеющая сталь; б — титан; в — алюминий.

ным, потому что он быстрее и его эффективность не меняется при новых вычислениях, что не относится к другим стохастическим методам [11].

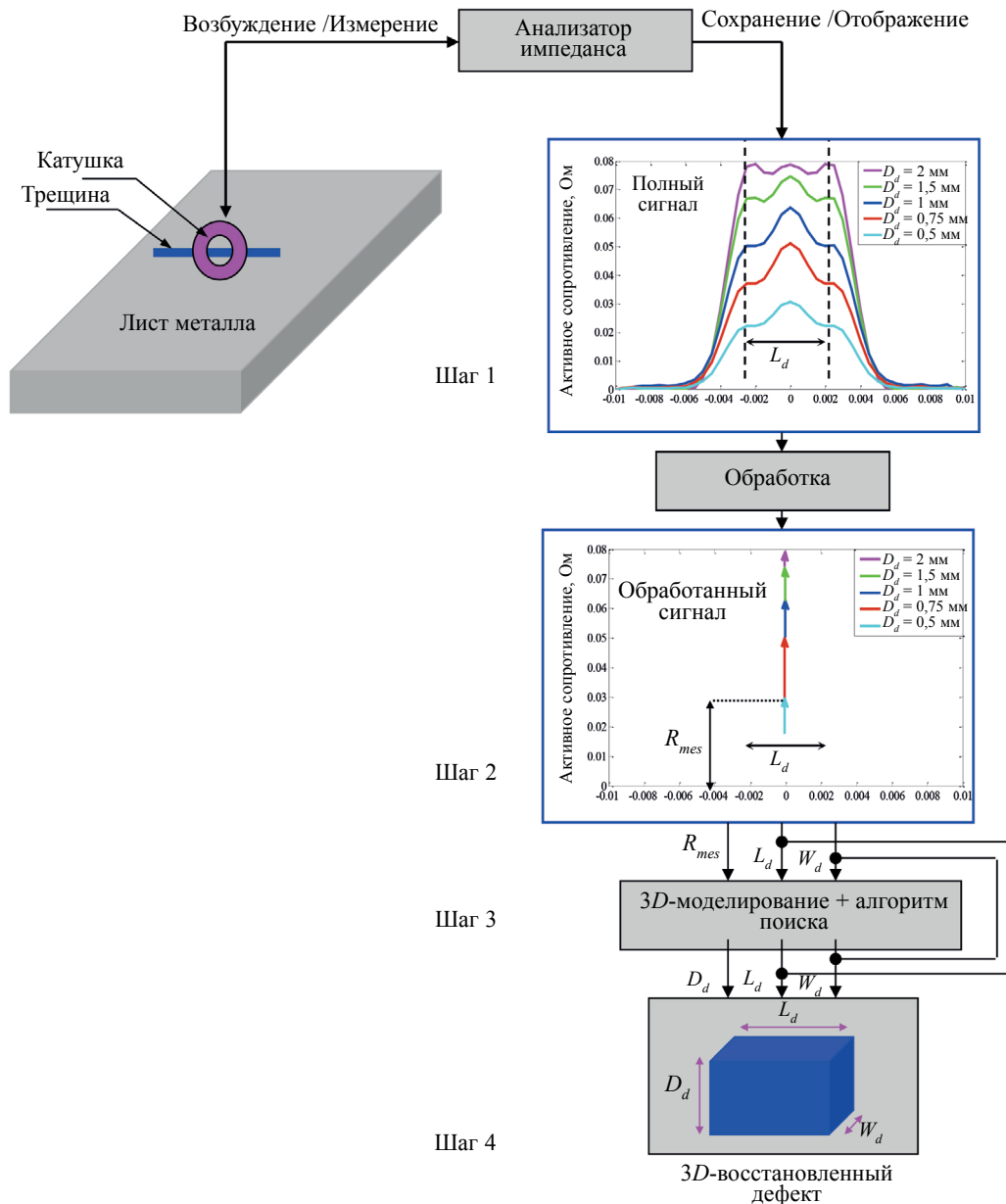


Рис. 9. Обобщение различных этапов для восстановления трещины.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье, после сопряжения Comsol multiphysics и Matlab, мы используем форму сигнала датчика на графике, полученного для полной развертки вдоль оси дефекта. Таким образом, стоит отметить, что длина трещины L_d точно равна расстоянию от двух вторых точек перегиба всего сигнала. Следовательно, полный сигнал можно заменить дискретным, содержащим полезную информацию, такую как полное сопротивление датчика Z_{mes} на оси дефекта ($x = 0 \text{ мм}$) и длина дефекта L_d (см. рис. 4в). После этого, зная L_d и R_{mes} , мы использовали детерминированный алгоритм, который был нами разработан [9]. Таким образом, после внедрения и запуска метода решения обратной задачи в среде Matlab, в результате моделирования рассчитывается глубина трещины D_d . Преимущественно, результаты расчета показали быстроту и надежность предложенного метода при разумном выборе конфигурации для начальных параметров, таких как начальный интервал поиска (D_{dmin} и D_{dmax}) и количество итераций. На самом деле, при использовании этого алгоритма достаточно нескольких итераций для реконструкции трещины в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ]

1. *Chen Zh., Rebican M., Yusaand N., Miya K.* Fast Simulation of ECT Signal due to a Conductive Crack of Arbitrary Width // IEEE Trans. Magn. 2006. V. 42. P. 683—686.
2. *Yuting L., Fangji G., Zhengjun W., Junbi L., Wenqiang L.* Novel Method for Sizing Metallic Bottom Crack Depth using Multi-Frequency Alternating Current Potential Drop Technique // J. MEAS. Science Review. 2015. V. 15. P. 268—273.
3. *Helifa B., Féliachi M., Lefkaier I.K., Boubenider F., Zaoui A., Lagraa N.* Characterization of Surface Cracks using Eddy Current NDT Simulation by 3D-FEM and Inversion by Neural Network // ACES Journal. 2016. V. 31. P. 187—194.
4. *Choua Y.* Application de la Méthode des Eléments Finis pour la Modélisation de Configuration de Contrôle non Destructif par Courants de Foucault / Thèse de Doctorat. Université Paris Sud, 2009. № 11.
5. *Maouche B., Rezak A., Feliachi M.* Semi Analytical Calculation of the Impedance of Differential Sensor for Eddy Current non-Destructive Testing // Nondestruct. Test. Eval. Int. 2009. V. 42. P. 573—580.
6. *Abdou A., Bouchala T., Benhadda N., Abdelhadi B., Benoudjit A.* Influence of Conductive Pollution on Eddy Current Sensor Signals // Journal of Nondestructive Testing. 2018. Springer. V. 54. P. 1—03.
7. *Bouchala T., Abdelhadi B., Benoudjit A.* Novel Coupled Electric Field Method for Defect Characterization in Eddy Current non Destructive Testing // J. Non-Destr. Eval. 2013. Springer. V. 32. P. 1—11.
8. *Bouchala T., Abdelhadi B., Benoudjit A.* New Contactless Eddy Current Nondestructive Methodology for Electric Conductivity Measurement // Journal Non-Destr., Tes. & Eval., Taylor & Francis. 2015. P. 1—11.
9. *Bennoud S., Zergoug M.* Modeling and Simulation for 3D Eddy Current Testing in Conducting Materials / World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal Mech., Aerospace. 2014.
10. *Rachekand M., Feliachi M.* 3-D Movement Simulation Techniques using FE Methods: Application to Eddy Current non-Destructive Testing // NDT&E International. 2007. V. 40. P. 35—42.
11. *Rosell A., Persson G.* Finite Element Modeling of Closed Cracks in Eddy Current Testing // Int. Journal Fat. 2012. V. 41. P. 30—38.